

ВЕСТНИК

Магнитогорского государственного технического
университета им. Г.И. Носова

2021. Т.19, №2

Журнал включен в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук (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, ВИНТИИ 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
Б.М. Колокольцев (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. Ращников (Россия), Г.А. Роджерсон (Великобритания),
В.М. Счастливцев (Россия), О.Н. Тулупов (Россия),
Ю Фэнг (Китай), В.Р. Храмшин (Россия),
Р. Цин (Великобритания)

РЕДАКЦИЯ

Главный редактор О.Н. Тулупов

Первый заместитель главного редактора
М.А. Полякова

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

Ответственный секретарь М.В. Шубина
Редактор Н.П. Боярова

Технический редактор И.В. Клюнникова
Перевод на английский О.Е. Сухих

© ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2021

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:

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

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

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

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

Адрес редакции:

455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»
пр. К. Маркса, 45/2, оф. 402
Тел.: (3519) 22-14-93.
URL: <http://www.vestnik.magtu.ru>
Email: rio_mgtu@mail.ru; vestnik@magtu.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 28.06.2021. Заказ 146. Тираж 500 экз. Цена свободная.

VESTNIK

of Nosov Magnitogorsk State Technical University

2021. Vol.19, no.2

The Journal is included in the List of Russian Peer-Reviewed Scientific Journals which are supposed to publish the major results of doctoral and PhD 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. Khramshin (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. Khramshin, N.N. Orekhova

Executive Secretary M.V. Shubina

Editor N.P. Boyarova

Technical Editor I.V. Klyunnikova

Translated into English O.E. Sukhikh

© Federal State Budgetary Institution of Higher Education
Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2021

Registration certificate PI № FS 77-59632 dated October 10, 2014 is issued by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology, and Mass Media.

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

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

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

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.magt.ru>
Email: rio_mgtu@mail.ru; vestnik@magtu.ru

Publication date: 28.06.2021. Order 146. Circulation: 500. Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

Разработка полезных ископаемых.....	5
<i>Секисов А.Г., Чебан А.Ю.</i>	
Кристаллосберегающая технология открытой разработки сложноструктурных кимберлитовых месторождений.....	5
<i>Хрунина Н.П.</i>	
Совершенствование комплекса средств для переработки высокоглинистых золотоносных песков россыпей.....	14
Технологии обработки материалов	23
<i>Гун И.Г., Вахитов А.Р., Столяров Ф.А., Смирнов А.В., Михайловский И.А.</i>	
Расчетное определение усилия начала пластической деформации при изгибе пальца шарового наружного рулевого наконечника автомобиля посредством моделирования процесса статических испытаний.....	23
Литейное производство.....	32
<i>Ганеев А.А., Рамазанов А.К.</i>	
Оптимизация химического состава коррозионно-стойкой стали 12Х18Н9ТЛ для отливок трубопроводной арматуры.....	32
Технологии обработки материалов	40
<i>Латфулина Ю.С., Дубенская М., Самодурова М.Н., Трофимов Е.А., Барков Л.А.</i>	
Реализация процесса нанесения покрытия медь-вольфрам методом холодного газодинамического напыления.....	40
Материаловедение и термическая обработка металлов	50
<i>Хлыбов А.А., Мальцев И.М., Беляев Е.С., Гетмановский Ю.А., Беляева С.С.</i>	
Исследование зависимости жаростойкости от концентрации стеклянного наполнителя в металлостеклянных композитах на основе никеля.....	50
Наноматериалы и нанотехнологии.....	58
<i>Щегольков А.В.</i>	
Многоступенчатая механоактивация МУНТ для улучшения перколяционных переходов в системе эластомер/МУНТ: подходы для реализации и практика модификации эластомеров	58
<i>Полещенко К.Н., Коротаев Д.Н., Ерёмин Е.Н., Несов С.Н., Тарасов Е.Е., Теплоухов А.А., Семеник Н.А., Иванова Е.В., Ласица А.М., Иванов А.Л.</i>	
Формированиеnanoструктурных топокомпозитов с кластерно-градиентной архитектурой комбинированной ионно-вакуумной обработкой	68
Новые технологические процессы и оборудование.....	79
<i>Гасанов Б.Г., Бабец А.В., Баев С.С.</i>	
Получение биметаллических колец для седел клапанов ДВС из активированных порошков быстрорежущей стали	79

CONTENTS

Mining	5
<i>Sekisov A.G., Cheban A.Yu.</i>	
Crystal-Saving Technology of Open Mining of Complex Structure Kimberlite Deposits	5
<i>Khrunina N.P.</i>	
Improving the Complex of Means for the Processing of High-Clay Gold-Bearing Sands of Placers.....	14
Material Process Engineering	23
<i>Gun I.G., Vakhitov A.R., Stolyarov F.A., Smirnov A.V., Mikhailovskiy I.A.</i>	
Calculation of Starting Force of Plastic Deformation, When Bending an Outer Tie Rod Ball Stud, by the Simulation of Static Tests	23
Foundry.....	32
<i>Ganeev A.A., Ramazanov A.K.</i>	
Optimization of a Chemical Composition of Corrosion-Resistant Steel 12KH18N9TL for Pipeline Valve Castings.....	32
Material Process Engineering	40
<i>Latfulina Yu.S., Doubenskaia M., Samodurova M.N., Trofimov E.A., Barkov L.A.</i>	
Implementation of a Copper- Tungsten Coating by Cold Gas-Dynamic Spraying.....	40
Materials Science and Heat Treatment of Metals.....	50
<i>Khlybov A.A., Maltsev I.M., Belyaev E.S., Getmanovsky Yu.A., Belyaeva S.S.</i>	
Research on the Dependence of Heat Resistance on the Concentration of a Glass Filler in Metal-Glass Composites Based on Nickel.....	50
Nanomaterials and Nanotechnologies	58
<i>Shchegolkov A.V.</i>	
Multistage Mechanical Activation of MWCNTS to Improve Percolation Transitions in the Elastomer / MWCNTS System: Approaches to the Implementation and Practice of Modifying Elastomers.....	58
<i>Poleshchenko K.N., Korotaev D.N., Eremin E.N., Nesov S.N., Tarasov E.E., Teploukhov A.A., Semenyuk N.A., Ivanova E.V., Lasitsa A.M., Ivanov A.L.</i>	
Formation of Nanostructured Topocomposites with Cluster-Gradient Architecture by Combined Ion-Vacuum Processing.....	68
New Technological Processes and Equipment.....	79
<i>Gasanov B.G., Babets A.V., Baev S.S.</i>	
Producing Bimetallic Rings for Valve Seats of Internal Combustion Engines from Activated Powders of High-Speed Steel.....	79

Надежность и долговечность металлургического оборудования	90
<i>Некрасов И.И., Федулов А.А., Паршин В.С.</i> Выбор состава оборудования главной линии прокатного стана для производства труб с оребрением	90
Стандартизация, сертификация и управление качеством	98
<i>Извеков Ю.А.</i> Научно-методическая база оценки качества технических систем металлургического предприятия.....	98
<i>Наркевич М.Ю., Корниенко В.Д.,</i> <i>Логунова О.С., Полякова М.А., Извеков Ю.А.</i> Анализ эффективности существующей системы оценки качества материалов, изделий и конструкций на опасных производственных объектах.....	103
Энергетика металлургии, энергосбережение и электротехнические комплексы	112
<i>Николаев А.А., Тулупов П.Г., Ивекеев В.С.</i> Разработка универсальных алгоритмов обработки токовых сигналов для усовершенствованной системы управления электродуговой печи.....	112
Reliability and Durability of Metallurgical Equipment	90
<i>Nekrasov I.I., Fedulov A.A., Parshin V.S.</i> Choosing the Components of the Rolling Mill Main Line for the Ribbed Tube Production	90
Standardization, Certification and Quality Management.....	98
<i>Izvekov Yu.A.</i> Scientific and Methodological Base for Assessing the Quality of Technical Systems of a Metallurgical Enterprise.....	98
<i>Narkovich M.Yu., Kornienko V.D.,</i> <i>Logunova O.S., Polyakova M.A., Izvekov Yu.A.</i> Analysis of Efficiency of the Existing Quality Assessment System for Materials, Products, and Structures at Hazardous Production Facilities.....	103
Metallurgical Power Engineering, Energy Saving and Electrical Systems	112
<i>Nikolaev A.A., Tulupov P.G., Iveykeev V.S.</i> Design of Universal Algorithms for Processing of Multi-Source Current Signals for an Improved Control System of an Electric Arc Furnace	112

РАЗРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

MINING

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

УДК 622.271

DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-2-5-13



КРИСТАЛЛОСБЕРЕГАЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОТКРЫТОЙ РАЗРАБОТКИ СЛОЖНОСТРУКТУРНЫХ КИМБЕРЛИТОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Секисов А.Г., Чебан А.Ю.

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

Аннотация. Актуальность и цель исследования. Извлечение из недр кимберлитовых руд должно вестись с максимальным сохранением природного качества минерального сырья. Стоимость содержащихся в руде кристаллов зависит, прежде всего, от крупности отдельных алмазов и их дефектности. Повысить сохранность добываемого кристаллосыря возможно за счет отказа от взрывного рыхления и перехода на механический способ выемки руды, в том числе с ее предварительным физико-химическим разупрочнением. При этом наибольший эффект от механической выемки достигается при разработке руд высокой ценности. В настоящее время в связи с развитием горного оборудования основная часть массива кимберлитов может быть отработана с применением механических средств выемки циклического или непрерывного действия. **Цель работы.** Научное обоснование усовершенствованной кристаллосберегающей технологии разработки месторождений на основе гибкого комбинирования технологических процессов подготовки к выемке с дифференцированием кимберлитовых руд по комплексу показателей, учитывающих их ценность и прочностные параметры. **Результат.** В статье предлагается технология освоения сложноструктурных рудных месторождений алмазов с применением селективной подготовки кимберлитов к выемке и собственно выемки. Первоначально путем бурения сети скважин и поинтервального опробования минеральной массы производится дифференциация участков рудного массива на зоны с последующим локальным сгущением сети скважин в зоне руд высокой ценности. При выявлении отдельных интервалов руд аномально высокой ценности производится ее извлечение путем выбуривания керна большого диаметра с дальнейшей переработкой руд щадящими методами. Подготовка зон руд высокой ценности к выемке механическим способом производится посредством разупрочнения за счет пропитки массива активной жидкостно-газовой смесью, полученной путем электрохимической обработки природного рассола, с последующим извлечением ослабленных руд одноковшовым экскаватором. Зоны руд рядовой ценности и зона руд низкой ценности и невысокой прочности отрабатываются с применением машины послойного фрезерования, обеспечивающей возможность получения мелкокусковой или среднекусковой рудной массы, последующая селективная выемка разрыхленной руды проводится погрузчиками. Зона руд низкой ценности и относительно высокой прочности подготавливается к выемке посредством взрывоинъекционной подготовки с применением кумулятивных зарядов специальной конструкции. Данная зона оконтуривается посредством буферного слоя, формируемого путем бурения технологических скважин и пропитки через них массива, для уменьшения отрицательного действия взрыва на смежные рудные зоны. Взорванная рудная масса извлекается из навала погрузчиками.

Ключевые слова: сложноструктурные месторождения, кристаллическое сырье, дифференциация руд, разупрочнение, механическая выемка, экскаватор, погрузчик.

© Секисов А.Г., Чебан А.Ю., 2021

Для цитирования

Секисов А.Г., Чебан А.Ю. Кристаллосберегающая технология открытой разработки сложноструктурных кимберлитовых месторождений // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №2. С. 5–13. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-2-5-13>



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

CRYSTAL-SAVING TECHNOLOGY OF OPEN MINING OF COMPLEX STRUCTURE KIMBERLITE DEPOSITS

Sekisov A.G., Cheban A.Yu.

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

Abstract. Relevance and purpose of the study. Extraction of kimberlite ores should be carried out with the maximum preservation of the natural quality of mineral raw materials. The cost of crystals contained in the ore depends primarily on the size of individual diamonds and their defectiveness. It is possible to increase the safety of the extracted crystal raw materials by abandoning explosive loosening and switching to a mechanical method of ore extraction, including its preliminary physicochemical softening. At the same time, the greatest effect from such mechanical extraction is achieved when mining high-value ores. Currently, in connection with the development of mining equipment, a main part of the kimberlite massif can be mined using mechanical means of extraction of a cyclic or continuous action. **Objective.** The research is aimed at providing a scientific rationale for the improved crystal-saving technology of field development based on a flexible combination of technological processes of preparation for mining with the differentiation of kimberlite ores by a set of indicators, taking into account their value and strength parameters. **Result.** The paper proposes a technology for the development of complex structure diamond ore deposits with the use of selective preparation of kimberlites for excavation and the actual excavation. Initially, by drilling a network of wells and interval sampling of the mineral mass, sections of the ore massif are differentiated into zones, followed by local thickening of the network of wells in the zone of high-value ores. When individual intervals of ores of an anomalously high value are identified, they are extracted by drilling out a large diameter core with further processing of ores using improved methods. High-value ore zones are prepared for extraction by a mechanical method by softening due to the impregnation of the massif with an active liquid-gas mixture produced by electrochemical processing of the natural brine followed by the extraction of weakened ores with a single-bucket excavator. Zones of common value ores and a zone of ores of a low value and low strength are mined using a layer-by-layer milling machine, which makes it possible to obtain small lump or medium lump ore mass, followed by selective mining of loosened ore by loaders. The zone of ores of a low value and relatively high strength is prepared for extraction by means of blast-injection preparation using shaped charges of a special design. This zone is delineated by means of a buffer layer formed by drilling technological wells and impregnating the massif through them to reduce the negative effect of the explosion on adjacent ore zones. The exploded ore mass is removed from the heap by loaders.

Keywords: complex structure deposits, crystal raw materials, ore differentiation, softening, mechanical excavation, excavator, loader.

For citation

Sekisov A.G., Cheban A.Yu. Crystal-Saving Technology of Open Mining of Complex Structure Kimberlite Deposits. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021, vol. 19, no. 2, pp. 5–13. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-2-5-13>

Введение

Разработка сложноструктурных месторождений ценного минерального сырья должна вестись с применением технологий, основанных на обеспечении принципов малоотходности и ресурсосбережения с максимальным сохранением природного качества минерального сырья в процессе подготовки его к выемке и собственно выемки [1, 2]. Особенno важно обеспечить сохранение природного качества сырья при разработке месторождений кимберлитов. Стоимость содержащихся в руде кристаллов зависит прежде всего от крупности отдельных алмазов и их дефектности, то есть наличия трещин, сколов, посторонних включений, в зависимости от которых алмазы подразделяются на ювелирные, око-

лювельирные и технические. Так, согласно [3] технические алмазы массой 0,0256–0,116 карат оценивались в 5,4–14 долл./кар, а массой 0,117–0,302 карат – в 23–34 долл./кар, ювелирные алмазы массой 0,45–0,89 карат оценивались в 46–73 долл./кар, а массой 0,90–1,79 карат и 1,80–10,79 карат, соответственно в 126 и 388 долл./кар. Таким образом, при равном содержании по общему весу алмазов в руде ее стоимость может различаться в десятки раз.

В настоящее время основной объем алмазов добывается открытым способом, при этом наибольшее распространение получила традиционная технология с применением буровзрывных работ, последующей выемкой горной массы экскаваторами и транспортировкой автосамосвалами. Взрывное рыхление кимберлитовых руд

приводит к повреждениям кристаллов, что значительно снижает их качество и рыночную стоимость. Исследования, проводившиеся в АК «АЛРОСА», показали, что при взрывании кимберлитов по традиционной технологии степень разрушения алмазов может достигать 45% [4], также АК «АЛРОСА» отмечаются многочисленные технологические повреждения кристаллов алмазов. Например, из 177 ювелирных алмазов массой более 50 каратов 28,2% кристаллов носят признаки повреждений. Исследования поверхности и формы многих именных кристаллов гигантов массой 240–320 каратов показывают, что ранее они являлись частями более крупных алмазов массой около 1000 каратов и более. В работе [4] представлены данные по степени разрушения кристаллов алмазов в зависимости от их крупности на рудниках компании «Де Бирс», согласно которым при взрывном рыхлении доля разрушенных алмазов составляет 14,3, 28,6, 42,9, 57,2, 71,5, 85,8, 100% в размерных группах кристаллов соответственно 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 2,5, 3,0, 3,5 см. Повысить сохранность добываемого кристаллосыря возможно за счет отказа от взрывного рыхления. Переход на механический способ выемки руды обеспечивает увеличение стоимости получаемой продукции на 10–14% за счет роста выхода крупных кристаллов алмазов [5, 6]. При этом наибольший эффект от механической выемки достигается при разработке руд высокой ценности.

Состояние вопроса и постановка проблемы

Развитие горного оборудования дает возможность вести безвзрывную разработку все более прочных горных пород [7–9]. В настоящее время основная часть массива кимберлитовых руд может быть отработана с применением механических средств выемки, таких как гидравлические одноковшовые экскаваторы, роторные экскаваторы, бульдозерно-рыхлительные агрегаты, комбайны различных конструкций, буровые агрегаты и др. [10–14]. Так, на карьере трубки «Удачная» впервые в мире в условиях Крайнего Севера на низких горизонтах глубокого карьера были проведены испытания роторного экскаватора К-650 [10]. Испытания выявили принципиальную возможность экскавации кимберлитов крепостью до 8 единиц роторным экскаватором с повышенным усилием копания, при последующей переработке руды достигнуто увеличение сохранности алмазов и снижение энергоемкости подготовки руды в сравнении с традиционной технологией на 15–20%. На карьере открытого подземного рудника Koala (США, Аляска) ве-

дется разработка кимберлита двумя комбайнами Wirtgen 2200SM-TT в арктическом исполнении, позволяющим им работать при температуре до -40°C [12]. Переход на послойную выемку позволил вести открытые работы вблизи подземных выработок. Для разработки ценных руд с высоким содержанием алмазов на подземных рудниках «АЛРОСА» впервые в мировой практике разработана и успешно внедрена технология с комбайновой выемкой руды (комбайны АМ-75 и АМ-105) и закладкой выработанного пространства [13]. Наибольший эффект комбайновая выемка обеспечила при отработке высокоценных руд, хотя при этом себестоимость добычи возросла на 20–25% по сравнению с буровзрывной технологией.

На трубке им. Карпинского-1 АО «Севералмаз» проводилась выемка кимберлитовых руд путем бурения скважины большого диаметра (4 м), технология доказала высокую степень сохранности алмазов и полноту их извлечения из недр [14]. Известна технология выбуривания руды вертикальными цилиндрическими выработками, заключающаяся в бурении пилотной скважины на высоту этажа и последующим разбуриванием скважины обратным ходом посредством расширителя [14]. Институтом горного дела Севера СО РАН предложен буровой способ разработки кимберлитов, который предусматривает разбивку рудного поля на прилегающие друг к другу правильные шестиугольники со стороной, равной диаметру буримой скважины, выбуривание и подрезание керна кимберлита большого диаметра, подъем керна стреловым самоходным краном с последующей закладкой выработанного пространства [10]. Недостатками буровых способов выемки являются относительно низкая производительность и высокая себестоимость работ.

Перспективным направлением развития технологий безвзрывной выемки является применение для разупрочнения горных массивов поверхностно-активных веществ (ПАВ) и природных рассолов [15–17]. Разупрочнение кимберлитов посредством воздействия на них растворами ПАВ приводит к снижению прочности на одноосное сжатие на 50% [15]. Способ разработки кимберлитовых трубок [16] предполагает дезинтеграцию массива мерзлых пород с применением высоконапорного гидравлического воздействия с последующей выемкой кимберлитов экскаватором с активным рабочим органом. Недостатками подобных способов являются многооперационность, относительно высокая себестоимость и низкая производительность работ, в связи с чем, валовая выемка кимберлитовых руд с их приме-

нением нецелесообразна. В работе [17] предлагается в зонах месторождения, содержащих руды особо высокой ценности с повышенным содержанием ювелирных алмазов, разупрочнение массива производить через скважины посредством электрогидравлического устройства, обеспечивающего инъектирование активной жидкостно-газовой смеси природного рассола в массив и последующую выемку ослабленной руды посредством разбуривания скважин.

Увеличить эффективность разработки коренных месторождений кимберлитов возможно за счет использования технологий и технических средств, учитывающих природные свойства отдельных участков месторождения, позволяющих значительно снизить потери качества сырья при его выемке и уменьшить затраты на разработку [6]. Существенно различающиеся прочностные характеристики и ценность руд месторождений и их отдельных участков (природно-технологических зон) обуславливают необходимость применения методического подхода к дифференцированному выбору технологий разработки [18]. При этом максимальная эффективность разработки будет обеспечиваться при наилучшей совместимости технических характеристик оборудования с природными условиями зоны, обеспечивающими необходимую производительность и сохранность кристаллосырья при приемлемой себестоимости и энергоемкости процессов.

В способе селективной разработки [6] предлагается вести оконтуривание кимберлитовых руд по физико-механическим свойствам и ценности с выделением зон по пределу прочности на сжатие (свыше 60, 40–60, 30–40 и менее 30 МПа) и по ценности руды (высокой, средней и низкой ценности). Технологические зоны руд низкой ценности предлагается отрабатывать с использованием буровзрывной подготовки и последующей выемки одноковшовым экскаватором. Руды высокой ценности с пределом прочности на сжатие до 40 МПа предлагается рыхлить бульдозерно-рыхлительным агрегатом с последующим перемещением руды бульдозером в разрезной котлован с высокоминерализованным рассолом для ее замачивания и разупрочнения [6]. Рыхление и отгрузка руд высокой ценности прочностью 40–60 МПа ведется посредством роторного экскаватора специального исполнения. В этой же работе для открытой разработки трубы «Удачная» было предложено разделение рабочих горизонтов на три природно-технологические зоны. Одну из зон рекомендовалось отрабатывать карьерным комбайном по слойного фрезерования, вторую зону – гидрав-

лическим экскаватором без предварительного рыхления массива, породы третьей зоны, подготовленные к выемке взрывным рыхлением с последующим разупрочнением рассолами, извлекать с применением канатного экскаватора.

Несмотря на обеспечение большей сохранности кристаллов при механической выемке в сравнении с взрывным рыхлением очевидно, что механическое разрушение также может вызывать разрушение кристаллов алмазов.

Целью исследования является создание усовершенствованной кристаллосберегающей технологии разработки месторождений на основе комбинирования современных технических и технологических решений.

Результаты исследования

В Институте горного дела ДВО РАН разработан способ освоения сложноструктурных рудных месторождений алмазов с применением селективной подготовки горных пород к выемке. Первоначально путем бурения сети скважин производится дифференциация участков рудного массива на зоны в зависимости от ценности и прочности руд. Предлагается осуществлять выделение этих зон по комплексному критерию, включающему пороговые значения двух параметров:

$$\begin{cases} f_i > f_{nj} \\ d_i \geq d_m \end{cases}. \quad (1)$$

при соблюдении ограничивающих условий:

$$C_c > C_{\min}; \quad (2)$$

$$\sigma C_{dmi} \geq \sigma \bar{C}_{dm}, \quad (3)$$

где f_i – коэффициент прочности массива по Протодьяконову в i -й зоне; f_{nj} – допустимый предел прочности массива для использования j -й технологии; d_i – средний размер кристалла алмаза в i -й зоне; d_m – размер кристалла ювелирного класса; C_c – общее содержание алмазов, карат/т; C_{\min} – минимально допустимое содержание по экономическим условиям; σC_{dmi} , $\sigma \bar{C}_{dm}$ – содержание ювелирных алмазов в i -й зоне текущее и предельное.

В целом в соответствии с вышеуказанными показателями выделены: зоны с рудами низкой ценности и невысокой прочности 1, зоны с рудами низкой ценности и относительно высокой прочности 2, зоны с рудами рядовой ценности и невысокой прочности 3, зоны с рудами рядовой ценности и относительно высокой прочности 4; зоны с рудами высокой ценности и невысокой

прочности 5, зоны с рудами высокой ценности и относительно высокой прочности 6, как частный случай в независимости от прочности могут быть выделены участки руд аномально высокой ценности 7 (рис. 1).

При вскрытии скважинами руд высокой ценности производится локальное сгущение сети скважин с оконтуриванием зоны руд высокой ценности. В случае выявления в скважинах зоны руд высокой ценности отдельных интервалов руд аномально высокой ценности производится уточнение местоположения участков руд аномально высокой ценности путем опробования бурового материала, полученного при сегментном нарезании круговых щелей в околоскважинном пространстве посредством устройства для подрезания керна, оснащенного элементами подачи и отсоса аэросмеси [19]. При этом проходка щелей на удалении порядка 1,0–1,5 м от стенки скважин позволяет, анализируя долю пиропов и магнийсодержащих оливинов с примесью хрома, прогнозировать контуры участков руд аномально высокой ценности 7, т.е. имеющие повышенную вероятность встречи относительно крупных алмазов ювелирного класса.

Подготовка зон руд высокой ценности 5, 6 к выемке механическим способом производится посредством щадящего ослабления (разупрочнения) путем пропитки массива с помощью инъектирования активной жидкостно-газовой смеси, полученной электрохимической обработкой природного хлоридно-кальциевого рассола, через технологические скважины 8 с применением электрогидравлических устройств, установленных на агрегате 9 (см. рис. 1). При этом в зоне с рудами высокой ценности и невысокой прочности 5 технологические скважины 8 бурятся одна от другой на большем расстоянии, чем в зоне с рудами высокой ценности и относительно высокой прочности 6. Расстояние между технологическими скважинами 8 подбирается исходя из возможности обеспечения пропитки и ослабления всего объема руд зон. После разупрочнения природным рассолом производится локальное выбуривание участка руд аномально высокой ценности 7 в виде керна большого диаметра буровой установкой 10. После извлечения керн отправляется на специальную переработку с щадящей дезинтеграцией и ручной разборкой материала. Предварительно разупрочненные руды высокой ценности зон 5, 6 извлекаются из массива с применением гидравлического экскаватора 11, который также может быть оснащен сменным рыхлительным оборудованием для дополнительной подготовки руд относительно высокой прочности к выемке. Извлеченная рудная масса транс-

портируется к месту обогащения автосамосвалами 12. Зоны руд рядовой ценности 3, 4 и зона руд низкой ценности и невысокой прочности 1 отрабатываются с применением машины послойного фрезерования 13, обеспечивающей возможность получения мелкокусковой 14 или среднекусковой 15 рудной массы, последующая селективная выемка разрыхленной руды проводится погрузчиками 16 (см. рис. 1).

Для снижения энергоемкости процесса рыхления и повышения сохранности кристаллов алмазов при выемке руд различной прочности предлагается применение машины послойного фрезерования 1, оснащенной усовершенствованным рабочим органом 2 с изменяемой схемой расстановки резцов 3, 4 (рис. 2).

Удлиненные резцы 3 и укороченные резцы 4 установлены на поворотных ступицах 5, взаимодействующих с приводными валами 6, расположенными в корпусе рабочего органа 2. При разработке руд невысокой прочности 7 с целью снижения энергоемкости рыхления и уменьшения повреждений кристаллов, содержащихся в руде, в рабочее положение поворачиваются удлиненные резцы 3, расположенные по разреженной схеме с большим шагом 8. При отработке кимберлитовых руд относительно высокой прочности 9 удлиненные резцы 3 на поворотных ступицах 5 посредством приводных валов 6 поворачиваются внутрь корпуса и в работу вступают укороченные резцы 4, расположенные по схеме с вдвое уменьшенным шагом расстановки 10. Таким образом, при рыхлении кимберлитов невысокой прочности 7 удлиненными резцами 3 получается среднекусковая рудная масса 11, а при рыхлении кимберлитов относительно высокой прочности 9 укороченными часто расположенными резцами 4 – мелкокусковая рудная масса 12 (см. рис. 2).

Зона руд низкой ценности и относительно высокой прочности 2 отделяется от остальных типов руд посредством буферного слоя 17 (см. рис. 1), формируемого из руд зоны 2 по ее границам за счет бурения технологических скважин 8 и пропитки через них массива природным хлоридно-кальциевым рассолом с применением электрогидравлических устройств, установленных на агрегате 9. В зоне 2 буровой установкой 10 производится бурение взрывных скважин 18, в которых размещаются кумулятивные заряды ВВ специальной конструкции 19. Наличие буферного слоя 17 уменьшает отрицательное действие взрыва на смежные рудные зоны, предназначенные для механической выемки. Взорванная рудная масса извлекается из навала погрузчиками.

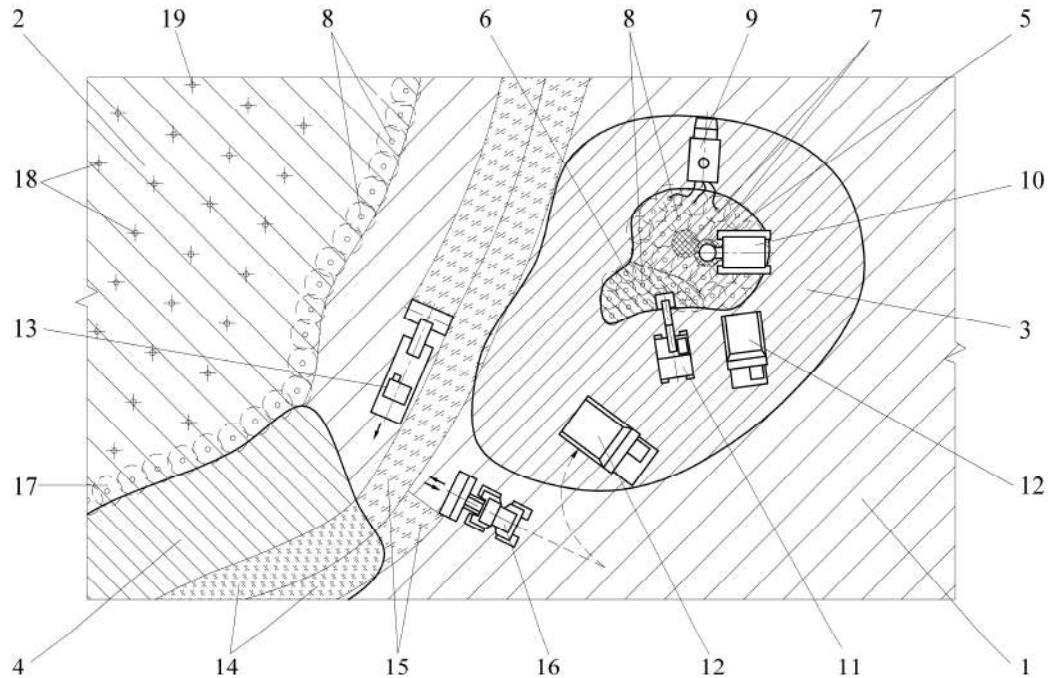


Рис. 1. Схема комбинированной разработки сложноструктурного месторождения кимберлитов
Fig. 1. Combined development of a complex structure deposit of kimberlites

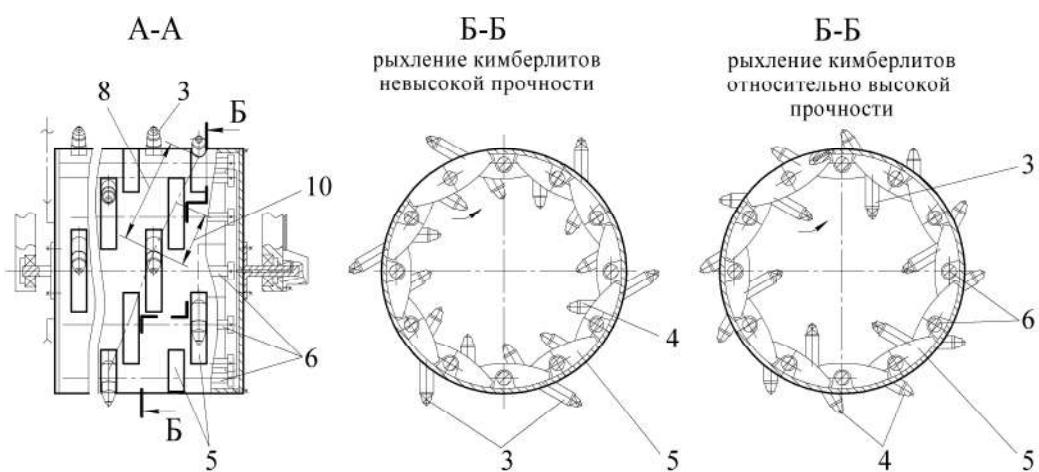
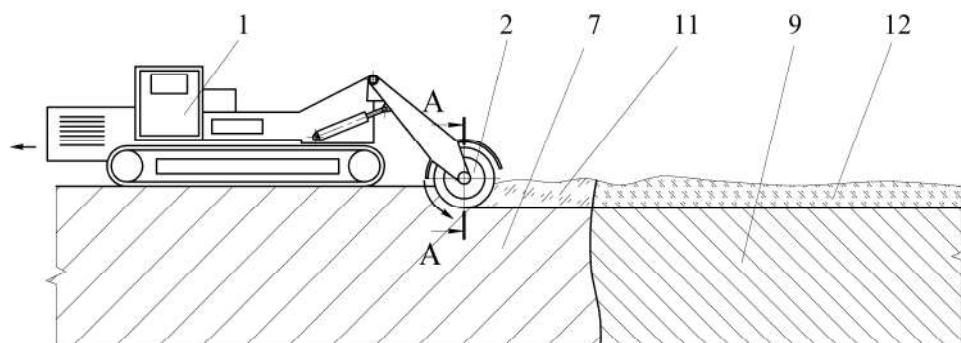


Рис. 2. Схема выемки кимберлитовой руды машиной послойного фрезерования с усовершенствованным рабочим органом с изменяемой расстановкой резцов
Fig. 2. Kimberlite ore excavation using the machine for layer-by-layer milling with a variable arrangement of cutters on the working body

Кумулятивные заряды специальной конструкции для обеспечения щадящего взрывного воздействия на массив включают внутреннюю 1 и наружную 2 полости с природным рассолом, кумулятивные полости 3, обеспечивающие формирование направленных потоков газопаровой смеси, а также имеют коаксиальное размещение взрывчатых веществ 4 (рис. 3).

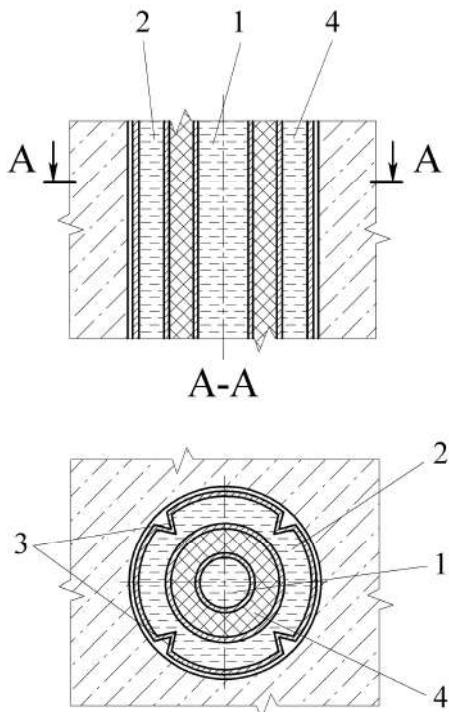


Рис. 3. Схема кумулятивного заряда ВВ специальной конструкции, снаряженного трубками с рассолом для щадящего взрывания массива

Fig. 3. Shaped charges of a special design equipped with tubes with brine for damage minimizing blasting of the massif

При взрыве заряда ВВ 4 образуются взрывные газы, которые под давлением разрушают оболочки внутренней и наружной полостей с природным рассолом, в результате чего образуется газопаровая смесь, а давление в скважине нарастает плавно в сравнении с зарядом ВВ обычной конструкции. Плоские поверхности кумулятивных полостей 3, как известно, обеспечивают высокое качество дробления руд [20].

Выводы

Предлагаемые в статье технико-технологические решения направлены на повышение сохранности природного качества кристаллосыря при его добывче с применением взрывного и механического рыхления массива. Предварительная дифференциация массива кимберлитов с

оконтуриванием зон руд высокой ценности и участков руд аномально высокой ценности позволяет локально использовать технологии, обеспечивающие наибольшую сохранность кристаллов, в частности выбуривание керна большого диаметра и пропитки массива под давлением природными рассолами через технологические скважины. Руды средней ценности предлагается рыхлить механическим способом, при этом в зависимости от их прочности варьирует схема расположения резцов на рабочем органе фрезерной машины. Также обеспечивается повышение сохранности кристаллов, содержащихся в рудах низкой ценности за счет обеспечения щадящего взрывного рыхления с применением кумулятивных зарядов специальной конструкции. Применение дифференцированных подходов к разработке сложноструктурных месторождений кристаллосыря позволит обеспечить выполнение принципа ресурсосбережения и повысить рентабельность горного производства.

Список литературы

- Научное обоснование технологий комплексного ресурсосберегающего освоения месторождений стратегического минерального сырья / Трубецкой К.Н., Капунов Д.Р., Викторов С.Д., Рыльникова М.В., Радченко Д.Н. // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014. № 12. С. 5–12.
- Трубецкой К.Н., Шапарь А.Г. Малоотходные и ресурсосберегающие технологии при открытой разработке месторождений. М.: Недра, 1993. 272 с.
- Методические рекомендации по применению классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. Алмазы. Москва: МПР, 2007. 37 с.
- Власов В.М., Андросов А.Д., Бескрованов В.В. Уровень современных кристаллосберегающих технологий добычи алмаза на Севере // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2001. № 8. С. 5–6.
- Чаадаев А.С., Зырянов И.В., Иван Ф.Б. Состояние и перспективы развития горнообогатительных технологий на алмазодобывающих предприятиях АК «АЛРОСА» (ПАО) // Горная промышленность. 2017. № 2. С. 6–13.
- Анистратов Ю.И., Борщ-Компониц Л.В., Анистратов К.Ю. Эффективность открытой разработки месторождений по природно-технологическим зонам // Горный журнал. 1990. № 8. С. 19–24.
- Чебан А.Ю. Способ и оборудование для открытой разработки маломасштабных кругопадающих месторождений // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т.15. №3. С. 18–23.
- Рыльникова М.В., Швабенланд Е.Е. Особенности управления качеством рудной массы при разработке сложноструктурных месторождений апатитовых руд

- с применением комбайновой выемки // Рациональное освоение недр. 2019. № 2–3. С. 80–86.
9. Palei S., Karmakar N., Paliwal P., Schimm B. Optimization of productivity with surface miner using conveyor loading and truck dispatch system // International Journal of Research in Engineering and Technology. 2013, vol. 2, no 9, pp. 393–396.
 10. Ермаков С.А., Бураков А.М. Совершенствование геотехнологий открытой разработки месторождений криолитозоны // Проблемы недропользования. 2014. № 3. С. 96–104.
 11. Laubscher D., Guest A., Jakubec J. Guidelines on Caving Mining Methods: The Underlying Concepts. – Queensland: The University of Queensland, 2017. 282 p.
 12. Пихлер М., Дикк Ф., Панкевич Ю.Б. Комбайны Wirtgen Surface Miner на добыче алмазов на Аляске // Горная промышленность. 2009. № 4. С. 14–15.
 13. Монтиянова А.Н. К вопросу автоматизации технологии закладочных работ при комбайновой отбойке руды коренных алмазных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2010. № 2. С. 343–353.
 14. Углубочный комплекс для доработки кимберлитовых карьеров / В.Л. Яковлев, П.И. Тарасов, В.О. Фурин, И.В. Зырянов. Екатеринбург: УрО РАН, 2015. 268 с.
 15. Шоболова Л.П., Коворова В.В. О создании комбинированной технологии разработки кимберлитов с применением жидких и газообразных ПАВ // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2000. № 1. С. 178–179.
 16. Пат. 2158827 Российская Федерация, МПК E21C 41/26. Способ разработки кимберлитовых трубок / А.Д. Андросов, В.М. Власов, С.П. Альков, А.Н. Акишев; заявитель и патентообладатель Якутский государственный университет им. М.К. Аммосова. № 97115793/03; заявл. 23.09.1997; опубл. 10.11.2000.
 17. Пат. 2664283 Российская Федерация, МПК E21C 41/22, E21C 37/06, E21C 37/18. Способ разработки рудных месторождений алмазов с применением селективной подготовки горных пород к выемке / И.Ю. Рассказов, Г.В. Секисов, А.Г. Секисов, А.Ю. Чебан, Н.П. Хрунина; заявитель и патентообладатель ФГБУН «Институт горного дела ДВО РАН». № 2017136239; заявл. 12.10.2017; опубл. 16.08.2018.
 18. Геотехнологии извлечения мелкого и тонкого золота из техногенного минерального сырья Забайкальского края / Секисов А.Г., Лавров А.Ю., Шевченко Ю.С., Манзырев Д.В. // Вестник Забайкальского университета. 2012. № 1. С. 34–41.
 19. Егоров Д.Г. Преимущества выбуривания цилиндрических изделий из камня на карьерах и способы их отделения от массива горных пород // Записки горного института. 2006. Т. 167. С. 10–12.
 20. Совершенствование скважинной отбойки / А.В. Будько, В.М. Закалинский, С.К. Рубцов, А.А. Блинов. М.: Недра, 1981. 199 с.

References

1. Trubetskoy K.N., Kaplunov D.R., Viktorov S.D., Rylnikova M.V., Radchenko D.N. Scientific rationale of technologies for comprehensive resource-saving exploitation of strategic mineral resources. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin], 2014, no. 12, pp. 5–12. (In Russ.)
2. Trubetskoy K.N., Shapar A.G. *Malootkhodnye i resursosoberegayushchie tekhnologii pri otkrytoj razrabotke mestorozhdeniy* [Low-waste and resource-saving technologies in open-pit mining]. Moscow: Nedra, 1993, 272 p. (In Russ.)
3. *Metodicheskie rekomendatsii po primeneniyu klassifikatsii zapasov mestorozhdeniy i prognoznykh resursov tverdykh poleznykh iskopaemykh. Almazy*. [Methodological recommendations for the application of the Classification of reserves of deposits and predicted resources of solid minerals. Diamonds]. Moscow: MPR, 2007, 37 p. (In Russ.)
4. Vlasov V.M., Androsov A.D., Beskrovanov V.V. The level of modern crystal-saving technologies for diamond mining in the North. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin], 2001, no. 8, pp. 5–6. (In Russ.)
5. Chaadaev A.S., Zyryanov I.V., Bondarenko I.F. The state and prospects of the development of mineral processing technologies at diamond mines of JSC ALROSA (PJSC). *Gornaya promyshlennost* [Mining Industry], 2017, no. 2, pp. 6–13. (In Russ.)
6. Anistratov Yu.I., Borshch-Komponiets L.V., Anistratov K.Yu. Efficiency of opencast development of deposits in natural and technological zones. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal], 1990, no. 8, pp. 19–24. (In Russ.)
7. Cheban A.Yu. Method and equipment for opencast mining of small steeply dipping deposits. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2017, vol. 15, no. 3, pp. 18–23. (In Russ.)
8. Rylnikova M.V., Shvablenland E.E. Features of ore mass quality management in the open mining of complex structure apatite ore deposits by surface miners. *Ratsionalnoe osvoenie nedr* [Mineral Mining and Conservation], 2019, no. 2–3, pp. 80–86. (In Russ.)
9. Palei S., Karmakar N., Paliwal P., Schimm B. Optimization of productivity with surface miner using conveyor loading and truck dispatch system. International Journal of Research in Engineering and Technology. 2013, vol. 2, no. 9, pp. 393–396.
10. Ermakov S.A., Burakov A.M. Improvement of geotechnologies of surface mining the deposits of permafrost zone. *Problemy nedropolzovaniya* [Problems of Subsurface Use], 2014, no. 3, pp. 96–104. (In Russ.)
11. Laubscher D., Guest A., Jakubec J. Guidelines on Caving Mining Methods: The Underlying Concepts. – Queensland: The University of Queensland, 2017. 282 p.
12. Pikhler M., Dikk F., Pankevich Yu.B. Wirtgen surface miners are mining diamonds in Alaska. *Gornaya promyshlennost* [Mining Industry], 2009, no. 4, pp. 14–15. (In Russ.)

13. Montyanova A.N. On the issue of automation of the technology of stowing operations during the combine breaking of ore from primary diamond deposits. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin], 2010, no. 2, pp. 343–353. (In Russ.)
14. Yakovlev V.L., Tarasov P.I., Furin V.O., Zyryanov I.V. *Uglubochnyi kompleks dlya dorabotki kimberlitovykh karerov* [A deep complex for the completion of kimberlite quarries]. Yekaterinburg: UB RAS, 2015, 268 p. (In Russ.)
15. Shobolova L.P., Kovorova V.V. On the creation of a combined technology for the development of kimberlites with the use of liquid and gaseous surfactants. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin], 2000, no. 1, pp. 178–179. (In Russ.)
16. Androsov A.D., Vlasov V.M., Alkov S.P., Akishev A.N. *Sposob razrabotki kimberlitovykh trubok* [Method of development of kimberlite pipes]. Patent RF, no. 2158827, 2000.
17. Rasskazov I.Yu., Sekisov G.V., Sekisov A.G., Cheban A.Yu., Khrunina N.P. *Sposob razrabotki rudnykh mestorozhdeniy almazov s primeneniem selektivnoy podgotovki gornykh porod k vyemke* [Method of development of diamond ore deposits with the use of selective preparation of rocks for excavation]. Patent RF, no. 2664283, 2018.
18. Sekisov A.G., Lavrov A.Yu., Shevchenko Yu.S., Manzyrev D.V. Geotechnology of extracting dispersed and "thin" gold from industrial minerals of Zabaikalsky Krai. *Vestnik Zabaykalskogo universiteta* [Vestnik of Transbaikal University], 2012, no. 1, pp. 34–41. (In Russ.)
19. Egorov D.G. Advantages of drilling out cylindrical products from stone in quarries and methods of separating them from the rock mass. *Zapiski gornogo instituta* [Journal of Mining Institute], 2006, vol. 167, pp. 10–12. (In Russ.)
20. Budko A.V., Zakalinsky V.M., Rubtsov S.K., Blinov A.A. *Sovershenstvovanie skvazhinnoy otboiki* [Improvement of borehole drilling]. Moscow: Nedra, 1981, 199 p. (In Russ.)

Поступила 19.03.2021; принята к публикации 30.04.2021; опубликована 28.06.2021
Submitted 19/03/2021; revised 30/04/2021; published 28/06/2021

Секисов Артур Геннадиевич – 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

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

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

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

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

УДК 622.271.1:236.73

DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-2-14-22



СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОМПЛЕКСА СРЕДСТВ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ВЫСОКОГЛИНИСТЫХ ЗОЛОТОНОСНЫХ ПЕСКОВ РОССЫПЕЙ

Хрунина Н.П.

Институт горного дела Дальневосточного отделения Российской Академии наук, Хабаровск, Россия

Аннотация. В настоящее время рост ресурсного потенциала страны во многом зависит от изучения природных и техногенных высокоглинистых золотоносных россыпей Дальневосточного региона, а также развития технологической и технической базы освоения. Проанализированы известные методы и средства переработки высокоглинистых золотоносных песков, применяемые и предлагаемые к применению на объектах с повышенным содержанием мелких фракций ценных компонентов. Исследована и экспериментально-аналитическим путем установлена полиминеральность россыпи золотоносного месторождения Антуанской площади южной части Хабаровского края. Выявлено в песках преобладание по содержанию золота, серебра, марганца, ванадия, цинка, вольфрама, никеля и других ценных компонентов. С помощью лазерного дифракционного микроанализатора установлен значительный объем частиц микронного размера, в том числе ценных компонентов, при этом установлено преобладающее распределение частиц минералов по размерам менее 45 мкм. Во вмещающей породе установлено преобладание глинистого минерала монтмориллонита. С учетом обеспечения экологичности и эффективности процесса переработки обоснована необходимость развития направления, связанного с использованием гидродинамического воздействия на высокоглинистые породы россыпей. При проектировании комплекса средств учитываются также гранулометрия, массовая доля илисто-глинистой фракции, морфология золота и других ценных компонентов. Представлены практические подходы к освоению рассматриваемого месторождения посредством усовершенствованных технических средств. Для обеспечения технологической эффективности и ресурсосбережения при переработке высокоглинистых пород предлагается геотехнологический комплекс с гидродинамическими кавитационными реакторами, не требующими дополнительных энергозатрат, и автоматические установки гравитационного обогащения с обеспечением автоматизированного подъема трафаретов или автоматизированного сполоска посредством поворота улавливающей поверхности. Выполнение автоматизированных установок многоуровневыми позволит повысить производительность также за счет увеличения площади улавливающей поверхности в 40 раз.

Ключевые слова: высокоглинистые пески, дезинтеграция, геотехнологический комплекс, кавитационный реактор.

© Хрунина Н.П., 2021

Для цитирования

Хрунина Н.П. Совершенствование комплекса средств для переработки высокоглинистых золотоносных песков россыпей // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №2. С. 14–22. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-2-14-22>



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

IMPROVING THE COMPLEX OF MEANS FOR THE PROCESSING OF HIGH-CLAY GOLD-BEARING SANDS OF PLACERS

Khrunina N.P.

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

Abstract. Now, growth of the country's resource potential largely depends on the study of natural and man-made high-clay gold-bearing placer deposits of the Far Eastern Region, and development of technologies and equipment for exploitation. This paper analyzes known methods and means of processing high-clay gold-bearing sands applied and proposed for their use at facilities with a higher content of fine fractions of valuable components. The author studied and proved by experiments and analysis a polymimetallic nature of placers of gold-bearing deposits on Antoine Square in the southern part of the Khabarovsk Territory. Sands mainly contain gold, silver, manganese, vanadium, zinc, tungsten, nickel and other valuable components. A laser diffraction microanalysis has established a significant amount of micron-sized particles, including valuable components. It was found that a predominant distribution of mineral particles in sizes is less than 45 μm . Enclosing rock is dominated by montmorillonite, a clay mineral. Taking into account sustainability and efficiency of the processing technology, it is reasonable to develop the use of hydrodynamic effects on high-clay rocks of placers. When designing a set of facilities, it is required to factor in granulometry, a mass fraction of a silt-clay fraction, gold morphology and other valuable components. The paper presents practical approaches to the development of the field in question with improved technical facilities. To ensure technological efficiency and resource conservation, when processing high-clay rocks, it is proposed to use a geotechnical complex with hydrodynamic cavitation reactors that do not require additional energy, and automatic gravity dressing plants with automated lifting of riffles or automated washing by turning a collecting surface. By designing such automated plants as multi-level ones, we can improve performance by increasing a collecting surface area by 40 times.

Keywords: high-clay sands, disintegration, geotechnical complex, cavitation reactor.

For citation

Khrunina N.P. Improving the Complex of Means for the Processing of High-Clay Gold-Bearing Sands of Placers. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021, vol. 19, no. 2, pp. 14–22. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-2-14-22>

Введение

Рост ресурсного потенциала страны в области добычи полезных ископаемых все больше определяется совершенствованием гравитационных технических средств переработки, имеющих преимущества экологического плана. В настоящее время потери мелкого и тонкого золота в процессе эксплуатации высокоглинистых россыпей порой достигают 80%. Обоснована возможность совместной переработки золотосодержащих руд и техногенных отходов россыпной золотодобычи. Это дает возможность рассматривать в комплексе минерально-сырьевые базы как запасы единого месторождения. Данный подход обеспечивает снижение удельных капитальных вложений и эксплуатационных затрат за счет увеличения производственной мощности предприятия [1, 2]. Однако освоение таких комплексов требует применения оборудования, обеспечивающего достаточно эффективное разрушение и дезинтеграцию вмещающих пород. Развиваются нетрадиционные высокоэнергетические методы исследования дезинтеграции и вскрытия тонкодисперсных минеральных комплексов на основе излучающих систем [3].

Анализ работы барабанных дезинтеграторов и гидравлических центробежных дезинтеграторов (ГЦД), которые являются наиболее известными новейшими и испытанными в производственных условиях конструкциями, показывает, что данные установки применимы для предварительной дезинтеграции глинистых песков [4]. К недостаткам их эксплуатации можно отнести неизбежное окомковывание с образованием глинистых окатышей при повышенном содержании глины в песках. Однако надо отметить, что тангенциальный и противоточный принцип подачи пульпы в ГЦД, а также использование кавитирующих элементов на внутренней поверхности, позволяет надеяться, при определенной доработке, на существенное достижение необходимого эффекта при использовании на высокоглинистых россыпях. В уплотненной высокоглинистой среде частицы песков и минеральных компонентов имеют достаточно прочные связи. Исследования дезинтеграции песков с повышенным содержанием глин лежат в области происходящих динамических взаимодействий между рабочим органом и породной массой. Сюда относятся разнообразные эффекты понижения прочности вслед-

ствие физико-механического влияния, состоящего в понижении удельной свободной поверхностной энергии твердого тела. Из-за отрицательного влияния на технологический процесс окатышей глины, образующихся на наклонных грохотах с круговой амплитудой колебаний, а также процесса окомкования при применении скруббер-бутар для более полноценной работы комплекса рекомендовано использовать два двухдечных промывочных горизонтальных грохотов с линейной амплитудой колебаний [5]. Также для частичного устранения данных недостатков предложена установка HAVER HYDRO-CLEAN, предназначенная для процесса отделения глинистых агрегатов от кристаллической части минерального сырья путем их дезинтеграции с промывкой под высоким давлением воды.

В зависимости от размера установка оснащается двумя и более роторами и разным числом форсунок. Под струями высокого давления форсунок (50–140 атм) вращающегося ротора (около 100 об/мин) упорная руда фрагментами 0–120 мм дезинтегрируется на кристаллическую и илистую фракции. В зависимости от процентного содержания, вязкости глины и качества промывки оператор регулирует скорость разгрузочного конвейера [5]. К недостаткам данной конструкции можно отнести сложность изготовления и эксплуатации, а также дополнительное энергопотребление, затрачиваемое на вращение ротора и дополнительную подачу воды. Кроме того, применение данной конструкции на объектах с преимущественно тонкодисперсными частицами ценных компонентов не обеспечит снижение их потерь.

Большое значение имеют исходные механические свойства песков и их структура, дисперсность, наличие пористости, процессы возникновения и развития дефектов, зарождения, движения и выхода дислокаций. Характер механических деформационных воздействий влияет на скорость и степень понижения прочности или на стимуляцию пластического течения породы [6–18]. Эксплуатация широко используемого оборудования на ряде предприятий показывает, что существующие промывочные аппараты не позволяют эффективно отделять глинистые и шламистые составляющие от кристаллической части руды.

Постановка проблемы и методы исследований

Характеристика вмещающих пород, величина глинистой составляющей, крупность и форма

золотин, повышенное содержанием мелких и тонких фракций, режим работы промывочных агрегатов и ряд других факторов влияют на технологические параметры переработки золотоносных песков. Исследования в данном направлении позволяют получить новые знания и обосновать последствия этих процессов для возобновления ресурсного потенциала россыпных месторождений. Освоение новых объектов высокоглинистых песков россыпей Дальневосточного региона требует их детального изучения, при этом особого внимания заслуживают пески с повышенным содержанием мелкого, тонкодисперсного, пластинчатого золота. Одним из характерных месторождений, участки которого имеют высокое содержание мелких и тонкодисперсных глинистых частиц, является золотоносная россыпь Антуанской площади южной части Хабаровского края.

Целью настоящего исследования является развитие направления, связанного с использованием гидродинамического воздействия на высокоглинистые породы россыпей с учетом гранулометрии, массовой доли илисто-глинистой фракции, морфологии золота и других ценных компонентов. Для достижения поставленной цели на основе феноменологического подхода предложено обоснование инновационных средств, интенсифицирующих процесс переработки на основе конструкций комплексного действия.

Результаты исследования и их обсуждение

Для прогнозирования комплекса мер и моделирования эффектов, влияющих на процессы дезинтеграции, принципиальное значение имеет оценка минимального размера частиц в образцах (рис. 1). Посредством оборудования Центра коллективного пользования ИГД ДВО РАН (ХФИЦ ДВО РАН) исследовалась дисперсность фракции менее 1000 мкм, определялся глинистый состав, проведен анализ магнитной, слабомагнитной и немагнитной фракций шлихов комплексного золотоносного месторождения Антуанской площади южной части Хабаровского края. При спектральном и химико-спектральном анализе проб использовалась установка «Гранд» (Новосибирск) и электронный микроскоп JCM-600 PLUS NEOSCOPE (JEOL, Япония). Спектрометрический анализ элементов показал, что, кроме золота и серебра, имеет место преобладание по содержанию марганца, ванадия, цинка, вольфрама, никеля, фосфора, меди, хрома, кобальта, лития (рис. 2).



Рис. 1. Образец пробы комплексного золотоносного месторождения

Fig. 1. Sample of a compound gold deposit

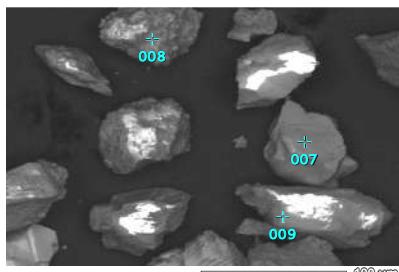


Рис. 2. Изображение сканируемых поверхностей исследуемых частиц с помощью электронного микроскопа

Fig. 2. Scanned surfaces of the particles under study using an electron microscope

С помощью лазерного дифракционного микронализатора установлен значительный объем частиц микронного размера, в том числе ценных компонентов, при этом распределение частицы минералов по размерам менее 45 мкм составляет от 41 до 92%. На лабораторных электронных весах OHAUS Scout Pro SPU202 (Mettler Toledo, Китай) с систематической погрешностью $\pm 0,001$ г определялась масса четырех фракций: +2; -2+1; -1+0,5; -0,5 мм. Исходный вес исследуемых выборок образцов составил 1500 ± 10 г. Среднее содержание в исследуемых образцах фракций размером более 4 мм составило от 1 до 19%, фракции -4 + 1 мм – от 5 до 16 %, фракции -1 + 0,5 мм – от 11 до 25%, а фракции менее 0,5 мм составили в среднем от 40 до 83% (рис. 3).

Фазовый анализ проб исследуемого объекта месторождения Нахи на наличие глинистых минералов изучался с помощью дифрактометра ДРОН-7, напряжение трубки 40 кВ, ток накала 20 μ A, шаг сканирования по углу 2Theta – 0,05 град. Для идентификации линий рентгеновских спектров использовался программный пакет PDWin (НПП «Буревестник»). Чувствительность к содержанию вещества у дифрактометра ДРОН-7 составляет 2–3%, погрешность угла луча 0,3°. Во вмещающей породе установлено преобладание глинистого минерала монтмориллонита.

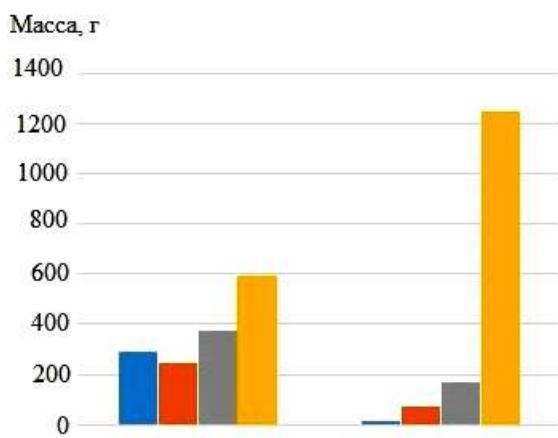


Рис. 3. Гистограмма распределения массы материала в граммах по фракциям слева на право по двум скважинам, мм: +4; -4 + 1; -1 + 0,5; -0,5

Fig. 3. Material mass distribution histogram in grams by fractions from left to right for two wells, mm: +4; -4 + 1; -1 + 0.5; -0.5

Технические и технологические разработки

Для переработки высокоглинистых золотоносных комплексных песков россыпей с преимущественно мелкими и тонкими частицами ценных компонентов предлагается геотехнологический комплекс (рис. 4) с автоматическими установками гравитационно-кавитационного типа [19–23].

Комплекс включает насосные установки, системы напорного гидротранспортирования, установки для предварительного размыва пород и классификации на фракции +4 и -4 мм. Фракция +4 мм поступает на установку с автоматическим сполоском. При гравитационном обогащении на первичных стадиях концентрат быстрее и в большем количестве накапливается в головной части шлюзов, на оптимальной длине, составляющей 1,5 м. Автоматизация процесса сполоска позволяет исключить ручной труд, применяемый на практике, дополнительные затраты энергии для подачи воды, исключить снос накопившегося концентрата в головной части, обеспечив достаточную частоту сполоска при экономии энергоресурсов [19–22]. Последующее разделение осуществляется посредством тонкослойного двухуровневого шлюза, отсадочной машины, центробежного концентратора и концентрационного стола. Фракция – 40 мм направляется на кавитационные реакторы [23] и винтовые сепараторы. Кавитационный реактор (рис. 5) включает скоростную подачу струи в диффузор 1 гидродинамического генератора, обработку гидросмеси в условиях активных гидродинамических воздействий посредством влияния размещенных внутри цилиндрического корпуса с конфузором 2 и последовательно установленных стационарных кавитационных элементов 3, в том числе пластинчатых кавитационных элементов 4.

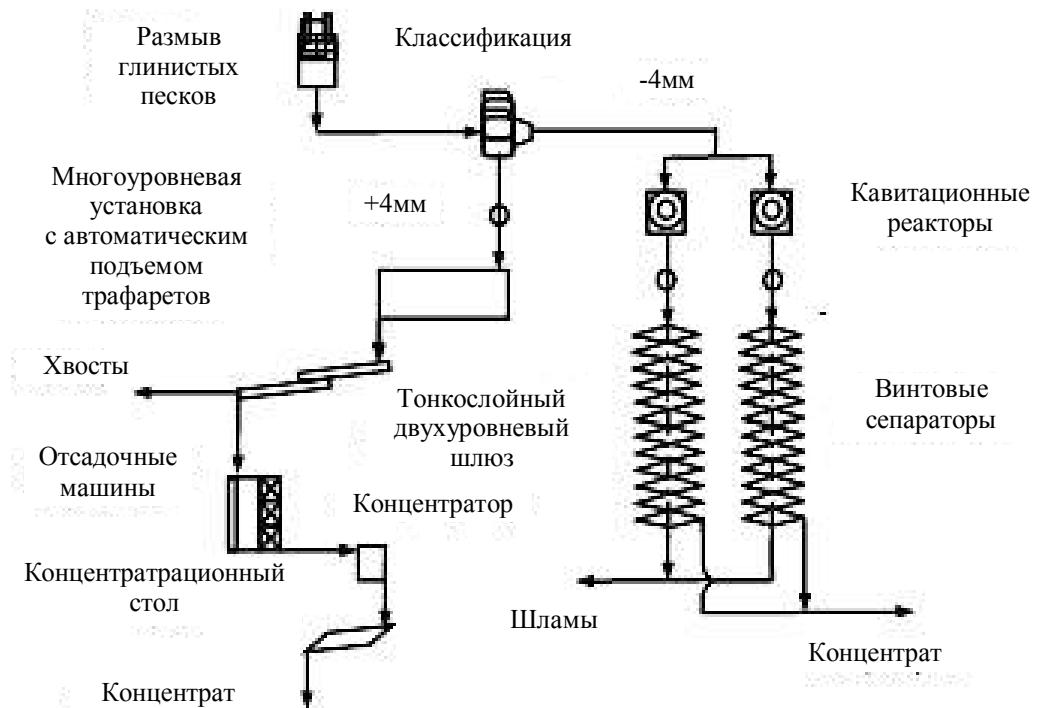


Рис. 4. Геотехнологический комплекс для переработки высокоглинистых песков россыпного месторождения
Fig. 4. Geotechnical complex for processing high-clay sands of the placer deposit

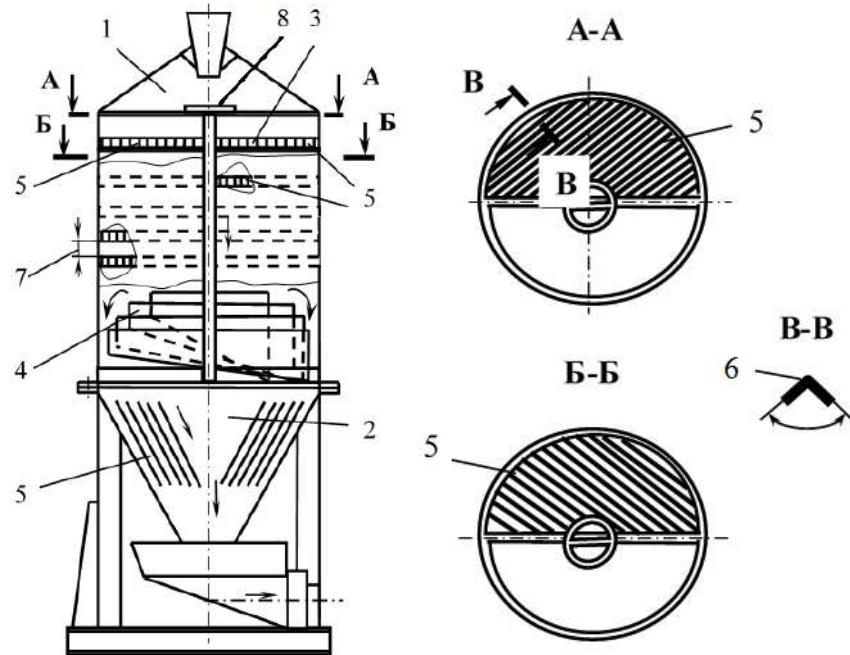


Рис. 5. Гидродинамический кавитационный реактор: 1 – диффузор; 2 – конфузор; 3 – стационарный кавитационный элемент; 4 – пластинчатый кавитационный элемент; 5 – балка-уголок; 6 – прямой угол; 7 – расстояние между балками-уголками по вертикали; 8 – отражательная поверхность

Fig. 5. Hydrodynamic cavitation reactor: 1 is a diffuser; 2 is a confuser; 3 is a stationary cavitation element; 4 is a plate-type cavitation element; 5 is a beam-angle; 6 is a right angle; 7 is a vertical distance between the beams-angles; 8 is a deflecting surface

Давление струи минеральной гидросмеси P на неподвижную отражательную поверхность 8 (см. рис. 5), расположенную по центру на входе, зависит от плотности гидросмеси ρ , расхода гидросмеси Q , скорости истечения струи V и расстояния l от входного патрубка до поверхности:

$$P = (\rho Q V) / l.$$

Часть струи веерообразно расходится, попадая на заостренные выступы кавитационных балок-уголков 5, и, частично отражаясь затем от стенок диффузора, вновь падает вниз. Осуществляется тонкоструйное разделение с обеспечением глубокой дезинтеграции минеральной составляющей гидросмеси до микроуровня посредством преобразования кинетической энергии потока жидкости в энергию акустических колебаний [23]. Для усиления полей первичной гидродинамической дезинтеграции на выходе из диффузора 1 создают турбулентность и раздвинутую разреженность посредством съемных кассет с решетками, перекрытия которых выполнены под углом в горизонтальной плоскости по отношению к горизонтальным осям цилиндрического корпуса, из балок-уголков 5, прямой угол 6 которых повернут вверх. Каждый из последующих слоев балок-уголков 5 установлен с противоположным наклоном по отношению к предыдущему слою, а расстояние между балками-уголками по горизонтали изменяется от предыдущего слоя к последующему слою по вертикали в соответствии с прогнозируемым уменьшением максимального размера элементов твердой составляющей гидросмеси и фазового соотношения твердой минеральной составляющей и жидкой Т:Ж, которое может составлять минимально 1:10 или максимально 4:10. Прогнозируемое расстояние между кромками балок-уголков по горизонтали на верхнем слое может варьировать от 20 до 60 мм, а на самом нижнем слое – не менее 20 мм.

Расстояние по вертикали между предыдущим слоем и последующим слоем балок-уголков зависит от физико-механических (прочностных, упругореологических и теплофизических) характеристик и структурно-механических (дисперсности – содержание, например, фракций менее 45 мкм 40 или 90%, фазового соотношения твердой и жидкой составляющей гидросмеси). Резонансное возбуждение, турбулентные вихри и кавитационный эффект, приводящий к акустической деструкции дисперсно-агрегатного состояния гидросмеси и разрушению механических связей твердого, будет достигаться посредством

гидродинамической составляющей и расстояния между кромками балок-уголков по горизонтали, т.е. площади щелеобразного отверстия. За счет изменения расстояния между внешними линиями прямых углов 1, 2 (рис. 6) и нижними кромками 3, 4 происходит изменение скоростного режима. Возрастание скорости потока гидросмеси на входе в узкую область приводит к снижению давления в гидросмеси при проходе между нижними кромками 3, 4 балок-уголков, образуется разреженная область, инициирующая кавитацию.

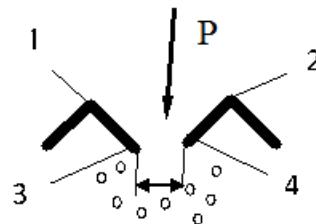


Рис. 6. Схема инициирования кавитации в реакторе
Fig. 6. Diagram of initiating cavitation in the reactor

Прогнозируемое расстояние по вертикали между слоями балок-уголков находится за пределами кавитационной области. Если кавитационная область составит по высоте 50 мм, то расстояние между балками-уголками должно быть не менее 200 мм.

Последующее тонкоструйное разделение с кавитацией осуществляется с помощью пластинчатых кавитационных элементов, установленных в нижней части цилиндрического корпуса гидродинамического генератора под съемными кассетами с решетками с изменением верхних горизонтальных линий поверхностей ступенчато с понижением к центральной оси цилиндрического корпуса, а нижних линий поверхностей – с обеспечением дополнительного турбулентного режима посредством одностороннего косого среза и свободного вхождения потока гидросмеси в конфузор. Использование добычного комплекса с кавитационными реакторами и автоматическими установками шлюзового типа повысит технологический уровень переработки полезного ископаемого посредством обеспечения глубокой дезинтеграции минеральной составляющей гидросмеси глинистых песков золотоносного месторождения. За счет использования гидродинамической кавитации в гидропотоке реакторов обеспечится разрушение связей мелких глинистых частиц, снижается потеря тонких фракций ценных компонентов, сокращаются энергозатраты и эксплуатационные показатели по обслуживанию комплекса, повысится

рентабельность производства и экологическая безопасность. Выполнение автоматизированных установок в виде многоуровневых шлюзов с расширением улавливающей площади на каждом уровне в 9–10 раз и использованием 3–4-х уровней позволит повысить производительность до 40 раз.

Заключение

На стадии предварительной оценки месторождения Антуанской площади южной части Хабаровского края и выработки подходов к одному их основных процессов переработки – дезинтеграции проведены исследования структурных характеристик горных пород. Установлен значительный объем частиц микронного размера, в том числе ценных компонентов, при этом распределение частицы минералов по размерам менее 45 мкм составляет большую часть. Во вмещающей породе установлено преобладание глинистого минерала монтмориллонита. Кроме золота и серебра спектрометрическим анализом установлено повышенное содержание марганца, ванадия, хрома, никеля, меди и других элементов. Основными процессами для достижения эффекта комплексной и глубокой переработки минерального сырья полиминеральных россыпей на микроуровне являются дезинтеграция в комбинации с диспергированием. Расширение применения технологии кавитационно-гидродинамической микродезинтеграции высокоглинистой полиминеральной составляющей гидросмеси посредством предлагаемых кавитационных реакторов и автоматизированных шлюзовых установок, в том числе многоуровневых, обеспечит сокращение потерь тонких частиц ценных компонентов, сократит потребление энергоресурсов, снизит эксплуатационные затраты и повысит экологическую безопасность.

Список литературы

1. Евдокимов С.И., Герасименко Т.Е., Троценко И.Г. Технико-экономическое обоснование эффективности совместной переработки руд и россыпей золота // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. № 4. Т.18. С. 12–23. doi: 10.18503/1995-2732-2020-18-4-12-23.
2. Хрунина Н.П. Совершенствование процессов разработки высокоглинистых рудно-россыпных месторождений Дальневосточного региона // Горный журнал. 2018. № 10. С. 39–42. doi: 10.17580/gzh.2018.10.07. ISSN 0017-2278
3. Чантuria В.А., Бунин И.Ж. Нетрадиционные высокоэнергетические методы дезинтеграции и вскрытия тонкодисперсных минеральных комплексов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2007. № 3. С. 107–128.
4. Кочнев В.Г., Грушинская О.В. Дезинтеграция труднопромывистых песков с высокопластичной глиной // Золотодобыча. 2021. № 2 (267). URL: drive.google.com (дата обращения: 25.03.2021).
5. Златев М., Александр Коломиец А. HYDRO-CLEAN: извлекать больше золота из упорных руд возможно // Журнал «Глобус». 2021. № 1 (65). URL: www.vnedra.ru (дата обращения 24.03.2021).
6. Elshin V.V., Melnyk S.A. Current state and prospects of development of technology of desorption of gold from the saturated activated carbons // Austrian journal of technical and natural sciences. 2014. No. 9–10. P. 114–118.
7. Rukovich A.V., Rochev V.F. Disintegration of frozen clay rocks under the influence of chemical fields and the aquatic environment // Scientific journal Advances in current natural sciences. 2017. No. 5. P. 123–127. ISSN 1681–7494.
8. Кисляков В.Е., Никитин А.В. Подготовка глинистых песков россыпных месторождений к дезинтеграции управляемым водонасыщением // Горный журнал. 2010. № 2. С. 28–30.
9. Хрунина Н.П., Чебан А.Ю. Оценка влияния водонасыщения на дезинтеграцию высокоглинистых песков при разработке россыпей благородных металлов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. № 4 (52). С. 50–55.
10. Мязин В.П. Повышение эффективности переработки глинистых золотосодержащих песков. Ч. 2. Чита: ЧитГТУ, 1996. 119 с.
11. Мирзеханов Г.С., Литвинцев В.С. Состояние и проблемы освоения техногенных россыпных месторождений благородных металлов в Дальневосточном регионе // Горный журнал. 2018. №10. С. 25–30.
12. Мирзеханов Г.С., Литвинцев В.С., Алексеев В.С. Перспективы масштабного освоения техногенных россыпных месторождений благородных металлов // Маркшейдерия и недропользование. 2019. №6. С. 22–30.
13. Литвинцев В.С. Основные направления стратегии освоения техногенных рудных и россыпных месторождений благородных металлов // Горный журнал. 2013. №10. С. 38–41.
14. Семенов А.Н., Серый Р.С. Исследование процессов дезинтеграции труднопромывистых песков россыпных месторождений золота // Известия вузов. Горный журнал. 2019. № 8. С. 88–96. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-8-88-96.
15. Карепанов А.В., Семенов А.Н. Исследования разупрочнения глины с использованием гидродинамической кавитации // Современные технологии освоения минеральных ресурсов: сб. науч. трудов. Красноярск: ГАЦМиЗ, 2005. С. 190–194.
16. Серый Р.С. Повышение эффективности разработки высокоглинистых россыпей // Маркшейдерия и недропользование. 2009. № 6. С. 51–53.

17. Ширман Г.В., Матвеев А.И. Исследование процесса промывки глинистых материалов в аппарате дезинтеграции и классификации // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2014. № 10. С.189–192.
18. Шкаруба Н.А., Кисляков В.Е., Борисов Ф.И. Особенности обоснования параметров моделирования размыва горных пород напорной струей гидромонитора // Вестник Забайкальского государственного университета. 2019. Т. 25. № 4. С. 32–38.
19. Патент 1559503 РФ. Установка для обогащения песков россыпей / Ю.А. Мамаев, Н.П. Хрунина; заявитель и патентообладатель ИГД ДВО РАН. Опубл. 10.10.1988.
20. Патент 2198734 РФ. Автоматическая установка для обогащения полезных ископаемых с боковым сплюском / Н.П. Хрунина, Ю.А. Мамаев, Е.К. Молоднякова; заявитель и патентообладатель ИГД ДВО РАН. Опубл. 20.02.2003. Бюл. № 5.
21. Патент 2200630 РФ. Автоматическая установка для обогащения руд и россыпей / Н.П. Хрунина, Ю.А. Мамаев, А.И. Щербунов; заявитель и патентообладатель ИГД ДВО РАН. Опубл. 20.03.2003. Бюл. № 8.
22. Патент 2203143 РФ. Автоматическая установка для обогащения руд и россыпей с установками доводки концентратра / Н.П. Хрунина, Ю.А. Мамаев, А.И. Щербунов; заявитель и патентообладатель ИГД ДВО РАН. Опубл. 27.04.2003. Бюл. № 12.
23. Патент 2652517 РФ. Способ активизации кавитационно-гидродинамической микродезинтеграции минеральной составляющей гидросмеси / Н.П. Хрунина; заявитель и патентообладатель ИГД ДВО РАН. Опубл. 26.04.2018. Бюл. № 12.

References

- Evdokimov S.I., Gerasimenko T.E., Trotsenko I.G. Feasibility study of the joint processing of gold ores and placers. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2020, no. 4, vol. 18, pp. 12–23. doi: 10.18503/1995-2732-2020-18-4-12-23.
- Khrunina N.P. Improving the development processes of high-clay ore placer deposits of the Far Eastern region. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal]. 2018, no. 10, pp. 39–42. doi: 10.17580/gzh.2018.10.07. ISSN 0017-2278
- Chanturiya V.A., Bunin I.Zh. Unconventional high-energy methods of disintegration and opening of fine-dispersed mineral complexes. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh* [Physical and Technical Problems of Mining], 2007, no. 3, pp. 107–128. (In Russ.)
- Kochnev V.G., Grushinskaya O.V. Disintegration of hard-to-wash sands with high plasticity clay. *Zoloto-dobycha* [Gold Mining]. 2021, no. 2 (267). Available at: drive.google.com (Accessed on March 25, 2021)
- Zlatev M., Kolomietts A. HYDRO-CLEAN: extracting more gold from refractory ores is possible. *Zhurnal Globus* [Globe Journal]. 2021, no. 1 (65). Available at: www.vnedra.ru (Accessed on March 24, 2021).
- Elshin V.V., Melnyk S.A. Current state and prospects of development of technology of desorption of gold from the saturated activated carbons. *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*. 2014, no. 9–10, pp. 114–118.
- Rukovich A.V., Rochev V.F. Disintegration of frozen clay rocks under the influence of chemical fields and the aquatic environment. *Advances in Current Natural Sciences*. 2017, no. 5, pp. 123–127. ISSN 1681–7494.
- Kislyakov V.E., Nikitin A.V. Preparation of clay sands from placer deposits for disintegration by controlled water saturation. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal], 2010, no. 2, pp. 28–30. (In Russ.)
- Khrunina N.P., Cheban A.Yu. Assessment of the impact of water saturation on the disintegration of high-clay sands in the development of placers of precious metals. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2015, no. 4 (52), pp. 50–55. (In Russ.)
- Myazin V.P. *Povyshenie effektivnosti pererabotki glinistykh zolotosoderzhashchikh peskov*. Ch. 2. [Improving the efficiency of processing clay gold sands. Part 2]. Chita: ChitaSTU, 1996, 119 p. (In Russ.)
- Mirzekhanov G.S., Litvintsev V.S. State and problems of development of man-made deposits of precious metals in the Far Eastern Region. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal], 2018, no. 10, pp. 25–30. (In Russ.)
- Mirzekhanov G.S., Litvintsev V.S., Alekseev V.S. Prospects for large-scale development of man-made placer deposits of precious metals. *Marksheideriya i nedropolzovanie* [Mine Surveying and Subsoil Use], 2019, no. 6, pp. 22–30. (In Russ.)
- Litvintsev V.S. Main directions of the strategy for the development of man-made ore and placer deposits of precious metals. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal], 2013, no. 10, pp. 38–41. (In Russ.)
- Semenov A.N., Seryi R.S. Study of the processes of disintegration of hard-to-wash sands of placer deposits of gold. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal* [News of the Higher Institutions. Mining Journal]. 2019, no. 8, pp. 88–96. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-8-88-96.
- Karepanov A.V., Semenov A.N. Research on clay softening using hydrodynamic cavitation. *Sovremennoye tekhnologii osvoeniya mineralnykh resursov: sb. nauch. trudov* [Modern technologies for the development of mineral resources: proceedings]. Krasnoyarsk: GATsMiZ, 2005, pp. 190–194. (In Russ.)
- Seryi R.S. Improving the efficiency of developing high-clay placers. *Marksheideriya i nedropolzovanie* [Mine Surveying and Subsoil Use], 2009, no. 6, pp. 51–53. (In Russ.)
- Shirman G.V., Matveev A.I. Study of the process of washing clay materials using the disintegration and classification plant. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tehnicheskiy zhurnal)* [Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)], 2014, no. 10, pp. 189–192. (In Russ.)

18. Shkaruba N.A., Kislyakov V.E., Borisov F.I. Features of rationale for the simulation parameters of the erosion of rocks by jets of pressure water of the hydraulic monitor. *Vestnik Zabaykalskogo gosudarstvennogo universiteta* [Vestnik of Transbaikal State University], 2019, vol. 25, no. 4, pp. 32–38. (In Russ.)
19. Mamaev Yu.A., Khrunina N.P. *Ustanovka dlya obogashcheniya peskov rossypei* [A dressing plant for sands of placers]. Patent RF, no. 1559503, 1988.
20. Khrunina N.P., Mamaev Yu.A., Molodnyakova E.K. *Avtomcheskaya ustanovka dlya obogashcheniya poleznykh iskopаемых s bokovym spoloskom* [An automatic plant for mineral dressing with side washing]. Patent RF, no. 2198734, 2003.
21. Khrunina N.P., Mamaev Yu.A., Scherbunov A.I. *Avtomaticheskaya ustanovka dlya obogashcheniya rud i rossypei* [An automatic plant for dressing of ores and placers]. Patent RF, no. 2200630, 2003.
22. Khrunina N.P., Mamaev Yu.A., Shcherbunov A.I. *Avtomaticheskaya ustanovka dlya obogashcheniya rud i rossypei s ustanovkami dovodki kontsentrata* [An automatic plant for dressing of ores and placers with concentrate recovery plants]. Patent RF, no. 2203143, 2003.
23. Khrunina N.P. *Sposob aktivizatsii kavitatsionno-gidrodinamicheskoy mikrodeintegratsii mineralnoy sostavlyayushchei gidrosmesi* [Method of activating the cavitation-hydrodynamic micro-disintegration of a mineral component of hydraulic fluid]. Patent RF, no. 2652517, 2018.

Поступила 01.04.2021; принята к публикации 15.04.2021; опубликована 28.06.2021
Submitted 01/04/2021; revised 15/04/2021; published 28/06/2021

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

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

ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

MATERIAL PROCESS ENGINEERING

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 62.23
DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-2-23-31



РАСЧЕТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЯ НАЧАЛА ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ИЗГИБЕ ПАЛЬЦА ШАРОВОГО НАРУЖНОГО РУЛЕВОГО НАКОНЕЧНИКА АВТОМОБИЛЯ ПОСРЕДСТВОМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА СТАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

Гун И.Г.¹, Вахитов А.Р.², Столяров Ф.А.², Смирнов А.В.¹, Михайловский И.А.²

¹АО НПО «БелМаг», Магнитогорск, Россия

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

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Шаровые шарниры подвески и рулевого управления автомобиля являются ответственными узлами, поскольку потеря их работоспособности влечет возникновение аварийных ситуаций с угрозой безопасности потребителя. В связи с этим шаровые шарниры подвески и рулевого управления автомобиля должны соответствовать комплексу технических требований, регламентированных в различных нормативных документах. В России требования к шаровым шарнирам автомобиля регламентируются ГОСТ Р 52433 и Техническим Регламентом Таможенного Союза ТР ТС 018/2011. Следует отметить, что данные стандарты являются наиболее общими документами, где требования к прочности, функциональности и эксплуатационной надежности отражены не в полном объеме. Руководствуясь лишь этими стандартами, существует вероятность упустить важные параметры при проектировании деталей или узлов, что может привести к потере или частичной потере работоспособности изделий. Наряду с этим заказчики OEM-уровня предъявляют дополнительные требования к готовой продукции. Одним из таких параметров является требование к усилию начала пластической деформации при изгибе пальца шарового наружного рулевого наконечника автомобиля. **Используемые методы.** В данной статье предлагается расчетное определение вышеупомянутого параметра посредством моделирования процесса статических испытаний с применением метода конечных элементов. **Новизна.** Анализ открытых источников не выявил наличия расчетных методов определения усилия начала пластической деформации шаровых пальцев при изгибе. **Практическая значимость.** Разработанная конечно-элементная модель позволяет определить усилие начала пластической деформации шарового пальца с приемлемой степенью точности на стадии проектирования, что позволяет избежать проведения большого числа физических экспериментов и повысить качество выпускаемой продукции.

Ключевые слова: наружный рулевой наконечник, шаровый палец, усилие начала пластической деформации при изгибе, конечно-элементная модель, заказчик OEM-уровня.

© Гун И.Г., Вахитов А.Р., Столяров Ф.А., Смирнов А.В., Михайловский И.А., 2021

Для цитирования

Расчетное определение усилия начала пластической деформации при изгибе пальца шарового наружного рулевого наконечника автомобиля посредством моделирования процесса статических испытаний / Гун И.Г., Вахитов А.Р., Столяров Ф.А., Смирнов А.В., Михайловский И.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №2. С. 23–31. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-2-23-31>



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

CALCULATION OF STARTING FORCE OF PLASTIC DEFORMATION, WHEN BENDING AN OUTER TIE ROD BALL STUD, BY THE SIMULATION OF STATIC TESTS

Gun I.G.¹, Vakhitov A.R.², Stolyarov F.A.², Smirnov A.V.¹, Mikhailovskiy I.A.²

¹JSC NPO BelMag, Magnitogorsk, Russia

²Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). Ball joints of a car suspension and steering are critical units, since the loss of their operability entails accidents with a threat to the safety of the user. In this regard, the ball joints of the car suspension and steering shall comply with a set of technical requirements provided by various regulatory documents. In Russia, the requirements for ball joints of a car are set forth by GOST R 52433 and Technical Regulations of the Customs Union TR CU 018/2011. It should be noted that these standards are the most general documents, where the requirements for strength, functionality and operational reliability are not fully reflected. Guided by these standards only, there is a high probability of missing important parameters in the design of parts or assemblies, which may lead to a full or partial loss of a normal operation of products. At the same time, OEM customers have additional requirements for the finished product. One of these requirements is starting force of plastic deformation during bending of an outer tie rod ball stud of a car. **Methods Applied.** This paper describes a proposed calculation of the above mentioned parameter by the simulation of static tests using the finite element method. **Originality.** The analysis of open sources did not reveal any calculation methods for determining starting force of plastic deformation of ball studs during bending. **Practical Relevance.** The developed finite element model makes it possible to determine starting force of plastic deformation of the ball stud with an acceptable degree of accuracy at the design stage to avoid a large number of physical experiments and increase the quality of the manufactured products.

Keywords: outer tie rod, ball stud, starting force of plastic deformation in bending, finite element model, OEM customer.

For citation

Gun I.G., Vakhitov A.R., Stolyarov F.A., Smirnov A.V., Mikhailovskiy I.A. Calculation of Starting Force of Plastic Deformation, When Bending an Outer Tie Rod Ball Stud, by the Simulation of Static Tests. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021, vol. 19, no. 2, pp. 23–31. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-2-23-31>

Введение

Шаровые шарниры подвески и рулевого управления автомобилей являются ответственными узлами [1], поскольку потеря их работоспособности влечет появление аварийных ситуаций, сопряженных с угрозой безопасности потребителя. Одним из наиболее ответственных деталей шаровых шарниров подвески и рулевого управления является шаровый палец. Критическим с точки зрения безопасности является излом шарового пальца либо под действием экстремальных сил, превышающих возможности изделия к восприятию нагрузок, либо по причине накопления усталостных повреждений [2]. В процессе эксплуатации шаровый палец испытывает различные по величине и направлению силы, возникающие в направляющем аппарате подвески при движении по опорной поверхности [3]. Поэтому вопрос статической и усталостной прочности шаровых пальцев очень важен при проектировании шаровых шарниров подвески и рулевого управления.

В этой связи шаровые шарниры подвески и рулевого управления автомобиля в нашей стране

должны соответствовать комплексу технических требований, регламентированных в следующих нормативных документах:

1. ГОСТ Р 52433-2005 «Автомобильные транспортные средства. Шарниры шаровые. Технические требования и методы испытаний».

2. Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 018/2011 «О безопасности колесных транспортных средств».

В рамках стандарта ГОСТ Р 52433-2005 в части требований к прочности шарового пальца регламентирована прочность шарового пальца на удар. Прочность шарового пальца на удар определяется на стенде копрового типа или специальном ударном устройстве, обеспечивающем заданную энергию удара. Выбор значения энергии удара производится в зависимости от диаметра сферы шарового пальца, если иное не предусмотрено в конструкторской документации (КД). Следует отметить, что приведенные в ГОСТ значения энергии удара не учитывают параметров самого автомобиля и его подвески. После испытания оценивается степень деформации пальца и наличие трещин

на изгибающихся поверхностях. При деформации пальца после одного удара более 3,5 мм палец бракуют. При деформации от одного удара менее 1,5 мм число ударов не ограничивают. При деформации в пределах от 1,5 до 3,5 мм пальца и появлении трещин на изгибающей поверхности палец бракуют.

В рамках Технического регламента Таможенного союза ТР ТС 018/2011 в части требований к прочности шарового пальца также регламентирована прочность шарового пальца на удар. Здесь требование носит декларативный характер без указания информации о средствах и методах оценки данного параметра.

Такой параметр, как прочность пальца шарового на удар, позволяет оценить прочность шарового пальца при действии динамической нагрузки, возникающей в подвеске и рулевом управлении автомобиля при экстремальных условиях, но не позволяет оценить прочность и жесткость шарового пальца при действии статической нагрузки. Статическая нагрузка, приводящая к пластической деформации пальца, не приводит к его излому, но к деформированному пальцу нужно приложить меньшую энергию до его долома в сравнении с недеформированным пальцем [4]. Также пластическая деформация пальца приводит к нарушению кинематики работы подвески. Таким образом, статические испытания позволяют оценить частичную потерю работоспособности.

Также следует отметить, что ГОСТ Р 52433-2005 и Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 018/2011 являются общими документами. Руководствуясь лишь требованиями этих стандартов, существует вероятность того, что при проектировании возможно упустить важные параметры, что может привести к потере или частичной потере работоспособности изделий.

Технические спецификации заказчиков OEM-уровня (общ. Original Equipment Manufacturer – «оригинальный производитель оборудования», в данном случае – «производитель автомобилей») представляют собой комплекс технических требований и методов испытаний, регламентирующих как прочностные, так и функциональные, эксплуатационные и другие требования. Выполнение требований спецификаций позволяет производителю выпускать более конкурентную продукцию на современном глобальном рынке.

Определение усилия начала пластической деформации при изгибе пальца шарового

Одним из требований технических спецификаций к наружному рулевому наконечнику автомобиля является определение параметров статического изгиба пальца шарового, в частности усилия начала пластических деформаций по диаграмме сила-перемещение. При этом палец закрепляется в специальной оснастке с заданным моментом затяжки, которая является либо частью реальной детали автомобиля (поворотного кулака или рычага), либо деталью с максимально близкими к реальным геометрическим размерами и механическими свойствами. После чего нагруженное устройство перемещается в направлении, перпендикулярном оси пальца, и передает нагрузку на сферу шарового пальца, как показано на схеме статических испытаний шарового пальца на изгиб (рис. 1). При этом записывается диаграмма сила-перемещение.

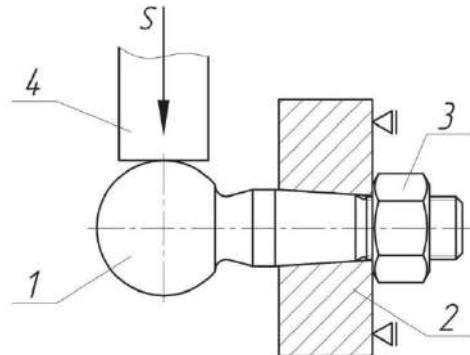


Рис. 1. Схема статических испытаний шарового пальца на изгиб: 1 – палец шаровый; 2 – оснастка; 3 – гайка; 4 – нагруженное устройство; S – направление перемещения нагруженного устройства

Fig. 1. Static bending tests of the ball stud: 1 is a ball stud; 2 is tooling; 3 is a nut; 4 is a loading device; S is a displacement direction of the loading device

Оценка усилия начала пластической деформации $F_{\text{пл}}$ по полученной диаграмме сила-перемещение осуществляется путем построения прямой, проходящей через две точки линейного участка полученной кривой. Ординаты указанной прямой являются значениями 20 и 80% от требуемого минимального по конструкторской документации (КД) значения усилия начала пластической деформации $F_{\text{пл}}^{\min}$. Усилие начала пластической деформации $F_{\text{пл}}$ определяется точкой пересечения построенной прямой с экспериментальной кривой изгиба (рис. 2).

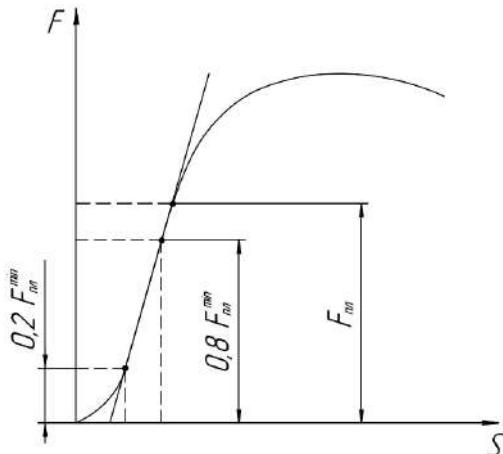


Рис. 2. Определение силы в момент начала пластических деформаций при испытании шаровых пальцев на изгиб: $F_{\text{пл}}^{\min}$ – требуемое минимальное по конструкторской документации (КД) значение усилия начала пластической деформации; $F_{\text{пл}}$ – усилие начала пластической деформации

Fig. 2. Determination of the force at the starting moment of plastic deformations, when testing ball studs for bending: $F_{\text{пл}}^{\min}$ is the required minimum initial value of plastic deformation according to the design documentation; $F_{\text{пл}}$ is starting force of plastic deformation

На стадии проектирования закономерно возникает вопрос определения усилия начала пластических деформаций расчетным способом без изготовления большого числа прототипов для экспериментальных исследований.

В открытых источниках предлагается расчет пальца на прочность по допускаемым напряжениям [3]. В опасных сечениях I-I и II-II (рис. 3) напряжения изгиба под действием указанной в КД максимальной изгибающей силы F , линия действия которой проходит через центр сферической головки, не должны превышать допускаемых напряжений на стали пальца шарового:

$$\sigma_{\text{и I-I}} = \frac{M_{\text{и I-I}}}{W_{\text{и I-I}}} = \frac{32 \cdot F \cdot l_{\text{изг-1}}}{\pi \cdot d_2^3} \leq [\sigma]; \quad (1)$$

$$\sigma_{\text{и II-II}} = \frac{M_{\text{и II-II}}}{W_{\text{и II-II}}} = \frac{32 \cdot F \cdot l_{\text{изг-2}}}{\pi \cdot d_{\text{бк}}^3} \leq [\sigma], \quad (2)$$

где $\sigma_{\text{и I-I}}$ и $\sigma_{\text{и II-II}}$ – напряжения шарового пальца при изгибе в сечениях I-I и II-II соответственно; $M_{\text{и I-I}}$ и $M_{\text{и II-II}}$ – изгибающий момент в сечениях I-I и II-II соответственно; $W_{\text{и I-I}}$ и $W_{\text{и II-II}}$ – момент сопротивления сечения изгибу; $l_{\text{изг-1}}$ – плечо изгибающей силы (расстояние от центра шаровой головки до сечения I-I); $l_{\text{изг-2}}$ – плечо изгибаю-

щей силы (расстояние от центра шаровой головки до базового диаметра конуса или до сечения II-II); $d_{\text{бк}}$ – базовый диаметр конуса пальца; $[\sigma]$ – допускаемое напряжение материала при изгибе.

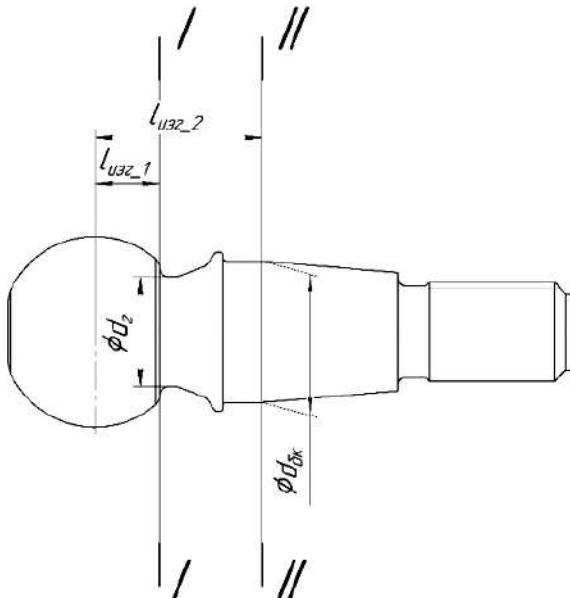


Рис. 3. Схема опасных сечений пальца шарового: $l_{\text{изг-1}}$ – расстояние от центра шаровой головки до сечения I-I; $l_{\text{изг-2}}$ – расстояние от центра шаровой головки до базового диаметра конуса или до сечения II-II; $\varnothing d_{\text{бк}}$ – базовый диаметр конуса пальца; $\varnothing d_2$ – диаметр галтели пальца шарового

Fig. 3. Dangerous sections of the ball stud:

$l_{\text{изг-1}}$ is a distance from the center of the ball head to section I-I, $l_{\text{изг-2}}$ is a distance from the center of the ball head to the base diameter of the cone or to section II-II, $\varnothing d_{\text{бк}}$ is a base diameter of the stud cone, $\varnothing d_2$ is a diameter of the fillet of the ball stud

Разработка конечно-элементной модели

Существенным недостатком расчета по допускаемым напряжениям является отсутствие возможности построения диаграммы сила-перемещение. Для расчетного определения усилия начала пластических деформаций предлагается смоделировать процесс статических испытаний в соответствии со схемой испытаний (см. рис. 1) с использованием метода конечных элементов с учетом физической и геометрической нелинейностей [2, 5].

В конечно-элементной модели (КЭМ) приняты следующие допущения [2, 5]:

- рассмотрена 1/2 часть шарового пальца с граничными условиями симметрии, так как задача является симметричной относительно продольной плоскости пальца шарового;

- упругопластическое поведение материала пальца шарового описывается билинейной диаграммой напряжения-деформации [6]. Материал оснастки, гайки и нагружочного устройства описывается линейной диаграммой напряжения-деформации. Свойства материалов представлены в табл. 1;

- резьбовое соединение палец-гайка смоделировано «склеенным» контактом двух цилиндрических поверхностей согласно принципу Сен-Венана [4].

Конечно-элементная сетка шарового пальца, гайки, оснастки и нагружочного устройства реализована в виде объемных восьмиузловых гексаэдров с тремя степенями свободы в узле для вычисления действующих силовых факторов и перемещений, а также одну точку интегрирования в центре гексаэдра для определения напряжений и деформаций. В модель введены балочные элементы типа RBE2 для определения искомого усилия.

КЭМ содержит следующие граничные условия [2, 5]:

- условие симметрии;
- заделки в узлах балочного элемента, ограничивающей перемещения вдоль трёх осей координат и вращения вокруг них;
- контакт поверхностей (палец-оснастка, палец-нагружочное устройство, оснастка-гайка), реализующий метод штрафных функций;
- статический и кинетический коэффициенты трения 0,2 и 0,1 соответственно [7, 8]. Графическое представление коэффициентов трения представлено на рис. 4;
- принудительное перемещение узлов, находящихся на свободной поверхности нагружочного устройства.

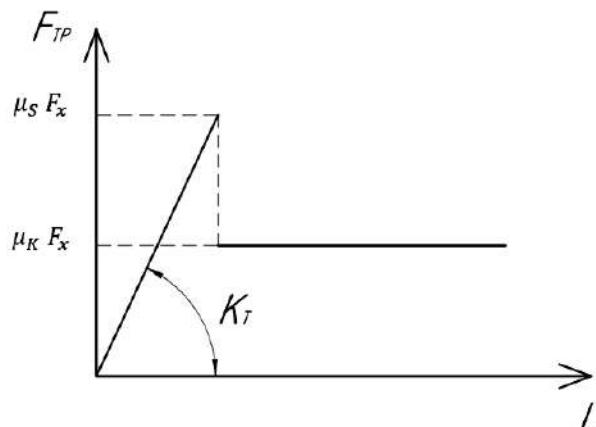


Рис. 4. Графическое представление коэффициентов трения: $\mu_s \cdot F_x$ – статическая сила трения; $\mu_k \cdot F_x$ – кинетическая сила трения; K_T – жесткость контакта

Fig. 4. Friction coefficients: $\mu_s \cdot F_x$ is static friction force, $\mu_k \cdot F_x$ is kinetic friction force, K_T is contact stiffness

Для верификации расчетной модели были отобраны 6 пальцев шаровых, максимально близких по геометрическим размерам с расчетной моделью. Произведены статические испытания на изгиб с записью диаграммы сила-перемещение.

Напряженно-деформированное состояние пальца шарового приведено на рис. 5, 6.

График сравнения расчетной зависимости силы от перемещения центра сферы и экспериментальных кривых изгиба пальцев шаровых представлен на рис. 7.

Как видно из графика, наклон линейных участков кривых, отличается в силу того, что при расчете не учитывается податливость нагружочного устройства и резьбового соединения [9].

Таблица 1. Свойства материалов
Table 1. Material properties

Объект	Твердость HRC	Твердость НВ, кгс/мм ²	Модуль упругости E, МПа	Коэффициент Пуассона μ	Предел текучести σ_t , МПа	Предел прочности σ_b , МПа	Относительное удлинение d_5	Модуль упрочнения H, МПа
Палец шаровый	37	344	$2 \cdot 10^5$	0,30	997	1150	0,2	761
Оснастка	-	-	$2 \cdot 10^5$	0,30	-	-	-	-
Гайка	-	-	$2 \cdot 10^5$	0,30	-	-	-	-
Нагружочное устройство	-	-	$2 \cdot 10^5$	0,30	-	-	-	-

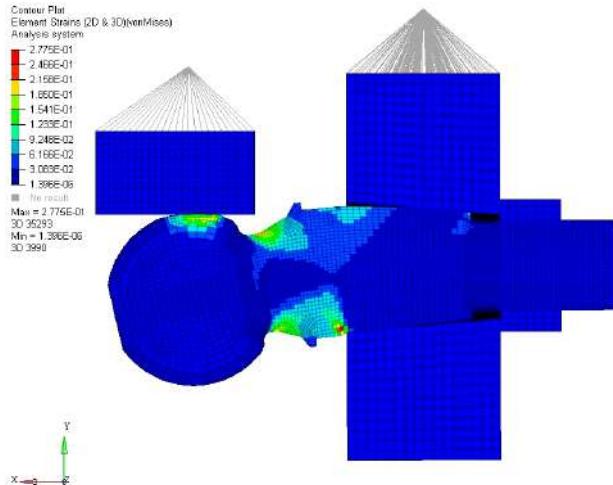


Рис. 5. Картина деформаций пальца шарового
Fig. 5. Deformations of the ball stud

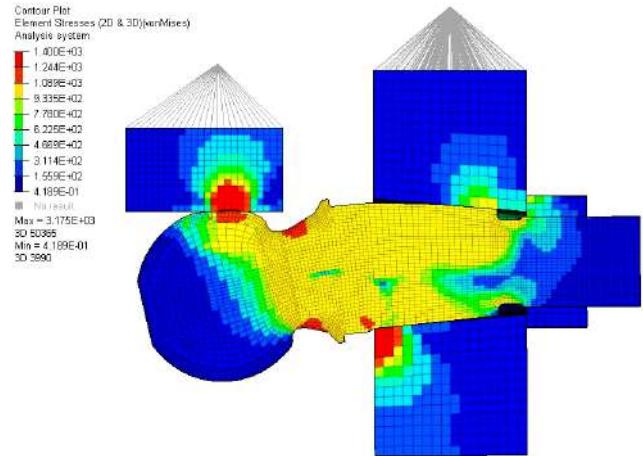


Рис. 6. Картина напряжений по Мизесу пальца шарового
Fig. 6. Von Mises stress of the ball stud

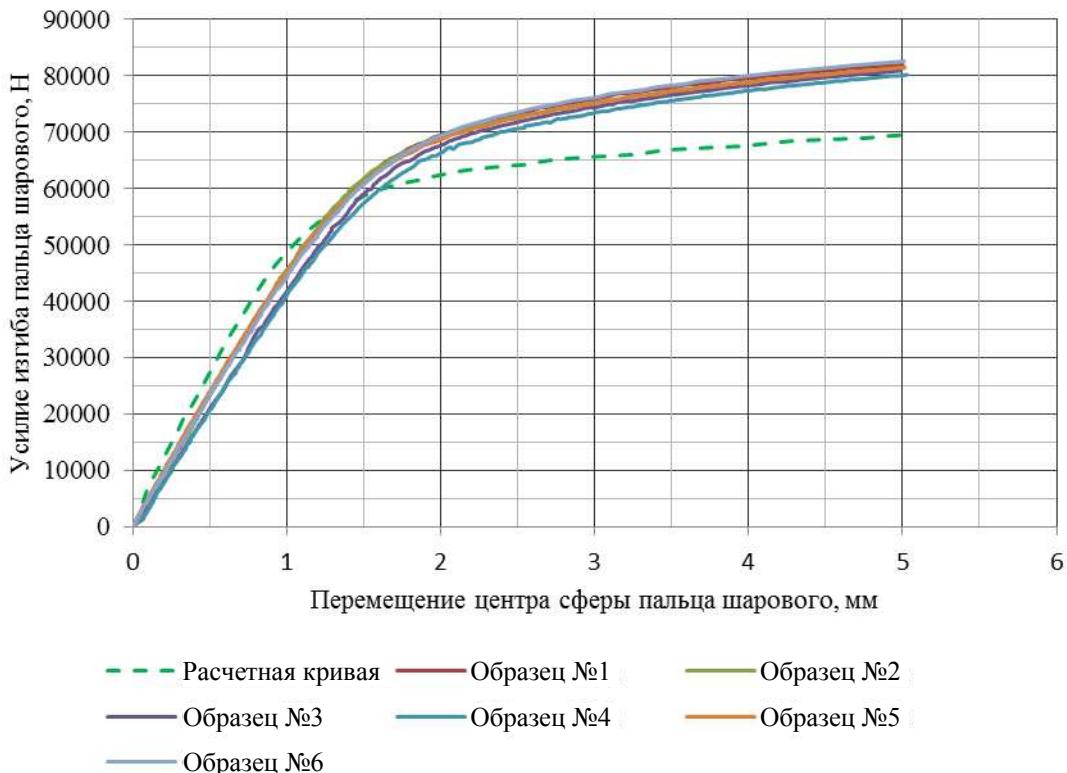


Рис. 7. График сравнения расчетной зависимости силы от перемещения центра сферы и экспериментальных кривых изгиба пальцев шаровых
Fig. 7. Comparison between the calculated dependence of force on the displacement of the center of the sphere and the experimental bending curves of the ball studs

Оценка полученных результатов и их обсуждение

Произведем оценку полученных экспериментальных значений усилий начала пластической деформации для функции распределения Вейбулла [10], поскольку указанные характеристики являются непрерывными.

Функция плотности вероятности имеет вид

$$f(F_{\text{пл}}) = \beta \frac{F_{\text{пл}}^{\beta-1}}{\eta^\beta} e^{-\left(\frac{F_{\text{пл}}}{\eta}\right)^\beta}, \quad (3)$$

где $F_{\text{пл}}$ – усилие начала пластической деформации; η – параметр масштаба распределения Вейбулла; β – параметр формы распределения Вейбулла.

Функция распределения Вейбулла имеет вид

$$F(F_{\text{пл}}) = 1 - e^{-\left(\frac{F_{\text{пл}}}{\eta}\right)^{\beta}}. \quad (4)$$

По результатам анализа экспериментальных значений параметр масштаба составил $\eta = 20,11$, параметр формы $\beta = 45841,51$.

Таблица 2. Полученные в результате эксперимента и расчета значения усилий начала пластической деформации пальца шарового при изгибе

Table 2. Starting forces of plastic deformation of the ball stud during bending determined as a result of the experiment and the calculation

Номер образца	Усилие начала пластической деформации (эксперимент), Н	Усилие начала пластической деформации (расчет), Н	Относительная погрешность, %
№1	45000	43100	3,6
№2	44000		
№3	48500		
№4	46500		
№5	42000		
№6	42200		
Среднее значение	44700		3,1
Значение, соответствующее 50% вероятности возникновения начала пластической деформации	44484		

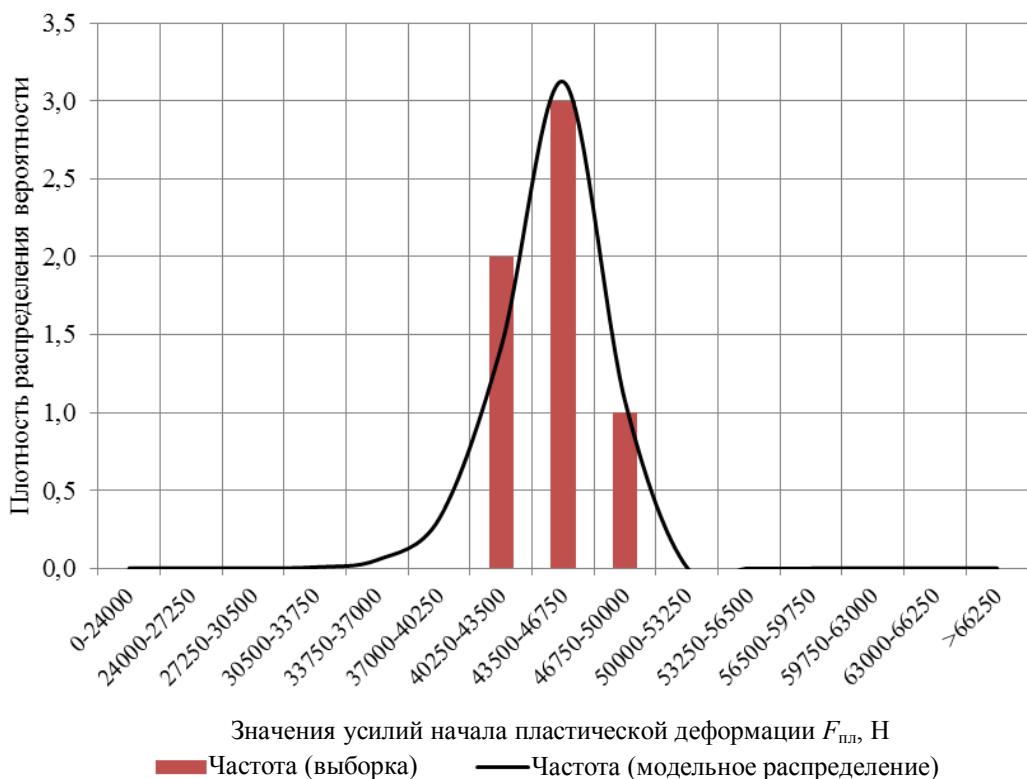


Рис. 8. Сравнение частотной гистограммы и нормированной плотности вероятности модельного распределения Вейбулла

Fig. 8. Comparison of the frequency histogram and the rated Weibull probability density function of the model

В табл. 2 приведены полученные в результате эксперимента и расчета значения усилий начала пластической деформации пальца шарового при изгибе.

На рис. 8 приведено сравнение частотной гистограммы и нормированной плотности вероятности модельного распределений Вейбулла.

Заключение

По результатам проведенной работы можно сделать следующие выводы:

- Ввиду неполноты технических требований к шаровым шарнирам подвески и рулевого управления автомобилей, изложенных в действующей на территории России нормативно-технической документации и с целью повышения конкурентоспособности выпускаемой продукции целесообразно использовать в качестве дополнительных требования технических спецификаций заказчиков OEM-уровня, поскольку при проектировании возможно упустить важные параметры, что может привести к потере или частичной потере работоспособности изделий.

- Разработанная КЭМ процесса статического испытания пальца шарового на изгиб позволяет определять усилие начала пластической деформации пальцев шаровых передней подвески и рулевого управления автомобилей с приемлемой степенью точности без большого объема проведения экспериментальных работ с физическими объектами. Сравнение расчетных и экспериментальных данных доказало адекватность разработанной КЭМ с приемлемой точностью.

- Разработанная КЭМ может быть применена для дальнейшего применения в процессе проектирования перспективных изделий.

Список литературы

1. Раймпель Й. Шасси автомобиля: Рулевое управление / пер. с нем. В.Н. Пальянова; под ред. А.А. Гальбрейха. М.: Машиностроение, 1987. 232 с.: ил.
2. Расчетное определение показателей прочности шаровых шарниров элементов шасси автомобиля путем моделирования процесса статических испытаний / И.А. Михайловский, И.Г. Гун, В.В. Сальников, В.И. Куцепендик, Е.И. Гун., Д.С. Вдовин // Журнал автомобильных инженеров. 2014. № 2(85). С. 20–24.
3. Проектирование полноприводных колесных машин: учебник для вузов: В 3 т. Т. 3 / Б.А. Афанасьев, Б.Н. Белоусов, Л.Ф. Жеглов и др.; под ред. А.А. Полунгина. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 432 с.: ил.
4. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов: учебник для вузов. 10-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. 592 с. (Сер. Механика в техническом университете. Т. 2).
5. Моделирование процесса опрессовки внутренних рулевых наконечников / Гун Е.И., Вахитов А.Р., Сальников В.В., Гун И.Г., Хон Ортуэта, Агустин Анита // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т.17. №1. С. 46–52.
6. Марковец М.П. Определение механических свойств металлов по твердости. М.: Машиностроение, 1979. 191 с.: ил.
7. Расчетное определение параметров модели кулоновского трения посредством моделирования процесса опрессовки внутреннего рулевого наконечника автомобиля / Гун И.Г., Вахитов А.Р., Столяров Ф.А., Михайловский И.А., Смирнов А.В. // Заготовительные производства в машиностроении. 2021. Том 19. № 2. С. 90–94.
8. MDPI and ACS Style Peng, Y.; Li, J.Q.; Zhan, Y.; Wang, K.C.P.; Yang, G. Finite Element Method-Based Skid Resistance Simulation Using In-Situ 3D Pavement Surface Texture and Friction Data. Materials 2019, 12, 3821.
9. Шаровые шарниры шасси: совершенствование конструкций, технологий, методов оценки качества: монография / И.А. Михайловский, И.Г. Гун, Е.И. Гун, Е.Г. Касаткина. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. 201 с.
10. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие для вузов. 9-е изд., стер. М.: Высш. шк., 2003. 579 с.: ил.

References

1. Reimpell J. *Shassi avtomobilya: Rulevoe upravlenie* [Car chassis: Steering]. Translated from German by Palyanov V.N., ed. by Galbreikh A.A. Moscow: Mashinostroenie, 1987, 232 p. (In Russ.)
2. Mikhailovskiy I.A., Gun I.G., Salnikov V.V., Kutsependik V.I., Gun E.I., Vdovin D.S. Calculation of the strength indicators of ball joints of the vehicle chassis elements by simulating a static test process. *Zhurnal avtomobilnykh inzhenerov* [Journal of Automotive Engineers], 2014, no. 2(85), pp. 20–24. (In Russ.)
3. Afanasev B.A., Belousov B.N., Zheglov L.F. et al. *Proektirovanie polnoprivednykh kolesnykh mashin: Uchebnik dlya vuzov* [Design of all-wheel drive vehicles: textbook for higher education institutions]. Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 2008, 432 p. (In Russ.)
4. Feodosev V.I. *Soprotivlenie materialov. Uchebnik dlya vuzov* [Strength of materials: textbook for higher education institutions]. Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 1999, 592 p. (In Russ.)
5. Gun E.I., Vakhitov A.R., Salnikov V.V., Gun I.G., Jon Ortueta, Agustin Anita. Simulation of the axial joint pressing process. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2019, vol. 17, no. 1, pp. 46–52. (In Russ.)
6. Markovets M.P. *Opredelenie mekhanicheskikh svoystv metallov po tverdosti* [Determination of the mechanical properties of metals by hardness]. Moscow: Mashinostroenie, 1979, 191 p. (In Russ.)
7. Gun I.G., Vakhitov A.R., Stolyarov F.A., Mikhailovskiy I.A., Smirnov A.V. Calculation of parameters for a Cou-

- lomb friction model by the simulation of a rod end pressing process. *Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroenii* [Blank Production in the Machine Industry], 2021, vol. 19, no. 2, pp. 90–94. (In Russ.)
8. Peng Y., Li J.Q., Zhan Y., Wang K.C.P., Yang G. Finite element method-based skid resistance simulation using in-situ 3D pavement surface texture and friction data. *Materials*, 12, 3821 (2019).
9. Mikhailovskiy I.A., Gun I.G., Gun E.I., Kasatkina E.G. *Sharovye sharniry shassi: sovershenstvovanie kon-* struktsii, tekhnologii, metodov otsenki kachestva: monografija [Ball joints of the chassis: improving designs, technologies, quality assessment methods: monograph]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2014, 201 p. (In Russ.)
10. Gmurman V.E. *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika: ucheb. posobie dlya vuzov* [Probability theory and mathematical statistics: study guide for higher education institutions], 2003, 579 p. (In Russ.)

Поступила 11.05.2021; принята к публикации 25.05.2021; опубликована 28.06.2021
Submitted 11/05/2021; revised 25/05/2021; published 28/06/2021

Гун Игорь Геннадьевич – доктор технических наук, профессор, генеральный директор, АО НПО «БелМаг», Магнитогорск, Россия.

Email: goun@belmag.ru. ORCID 0000-0002-6201-661X

Вахитов Александр Рафаэльевич – аспирант,

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: vakhitov_aka47@mail.ru. ORCID 0000-0001-7299-2035

Столяров Федор Алексеевич – студент,

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: stolyarov.f.a@yandex.ru. ORCID 0000-0001-7785-8417

Смирнов Алексей Вячеславович – кандидат технических наук, начальник отдела по развитию поставщиков, АО НПО «БелМаг», Магнитогорск, Россия.

Email: alexey.smirnov@belmag.ru. ORCID 0000-0003-4321-5012

Михайловский Игорь Александрович – доктор технических наук, профессор,

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: tssa@magtu.ru. ORCID 0000-0001-7479-0349

Igor G. Gun – DrSc (Eng.), professor,
CEO, JSC NPO BelMag, Magnitogorsk, Russia.
Email: goun@belmag.ru. ORCID 0000-0002-6201-661X

Alexander R. Vakhitov – postgraduate student,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: vakhitov_aka47@mail.ru. ORCID 0000-0001-7299-2035

Fedor A. Stolyarov – student,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: stolyarov.f.a@yandex.ru. ORCID 0000-0001-7785-8417

Aleksei V. Smirnov – PhD (Eng.), Head of the Supplier Development Department,
JSC NPO BelMag, Magnitogorsk, Russia
Email: alexey.smirnov@belmag.ru. ORCID 0000-0003-4321-5012

Igor A. Mikhailovskiy – DrSc (Eng.), professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: tssa@magtu.ru. ORCID 0000-0001-7479-0349

ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

FOUNDRY

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.74
DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-2-32-39



ОПТИМИЗАЦИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА КОРРОЗИОННО-СТОЙКОЙ СТАЛИ 12Х18Н9ТЛ ДЛЯ ОТЛИВОК ТРУБОПРОВОДНОЙ АРМАТУРЫ

Ганеев А.А.¹, Рамазанов А.К.²

¹Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия

²АО «Благовещенский арматурный завод», Благовещенск, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). При производстве отливок корпусных деталей трубопроводной арматуры из коррозионно-стойкой стали 12Х18Н9ТЛ в пределах ГОСТа наблюдается нестабильность ее механических свойств и структуры (наличие до 20% ферритной фазы) и, как следствие, снижение стойкости к межкристаллитной коррозии и эксплуатационных свойств. В статье проанализировано влияние элементов химического состава стали 12Х18Н9ТЛ на механические свойства и содержание ферритной фазы (далее СФФ) с использованием статистического анализа. Отмечено, что механические свойства и СФФ рассматриваемой стали существенно изменяются от ее химического состава в пределах ГОСТа. Оптимальные свойства и эксплуатационные характеристики отливок рассматриваемой стали достигаются при содержании ферритной фазы не более 5%. Поэтому повышение стабильности механических свойств и структуры литьих деталей ответственного назначения из austenитной стали марки 12Х18Н9ТЛ является важнейшей задачей, для решения которой необходима оптимизация ее химического состава. Цель работы. Исследование и оптимизация химического состава стали 12Х18Н9ТЛ в пределах ГОСТа, обеспечивающие стабильность и высокие показатели механических свойств, в частности предела текучести при минимальном СФФ. Используемые методы. Для определения характера и степени влияния содержания химических элементов на показатели механических свойств и СФФ проводился корреляционно-регрессионный анализ. Оптимизация состава стали 12Х18Н9ТЛ проводилась методом кругового восхождения. Новизна. Получены математические модели, прогнозирующие механические свойства и СФФ по заданному химическому составу. Результат. Сопоставлены величины парных и частных коэффициентов корреляции влияния химических элементов на механические свойства и СФФ стали. Построены графические диаграммы зависимости влияния соотношения титана к алюминию на механические свойства и СФФ. Практическая значимость. Оптимизирован химический состав коррозионно-стойкой austenитной стали в пределах ГОСТа с требуемым контролируемым СФФ. Полученные результаты исследования могут быть полезны при изготовлении литьих деталей из нержавеющей стали 12Х18Н9ТЛ.

Ключевые слова: химический состав, коррозионностойкая сталь, отливка, ферритная фаза, корреляционный и регрессионный анализ.

© Ганеев А.А., Рамазанов А.К., 2021

Для цитирования

Ганеев А.А., Рамазанов А.К. Оптимизация химического состава коррозионно-стойкой стали 12Х18Н9ТЛ для отливок трубопроводной арматуры // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №2. С. 32–39. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-2-32-39>



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

OPTIMIZATION OF A CHEMICAL COMPOSITION OF CORROSION-RESISTANT STEEL 12KH18N9TL FOR PIPELINE VALVE CASTINGS

Ganeev A.A.¹, Ramazanov A.K.²

¹Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia

²JSC Blagoveshchensk Valves Plant, Blagoveshchensk, Russia

Abstract. Problem statement (relevance of the research). When manufacturing castings of pipeline valve body parts from corrosion-resistant steel grade 12Kh18N9TL within the GOST limits, there is instability of its mechanical properties and the lack of homogeneity of the structure (a ferritic phase in the structure amounting to 20%), resulting in a decrease in the intergranular corrosion resistance and performance properties. The research paper analyzes the influence of the chemical composition of steel grade 12Kh18N9TL on the mechanical properties and the content of the ferritic phase using a statistical analysis. It is noted that the mechanical properties and the ferrite content of the steel grade under study significantly vary depending on the chemical composition of steel within the GOST limits. The optimal properties and performance characteristics of the castings made of the steel grade under study are achieved, when the content of the ferritic phase doesn't exceed 5%. Therefore, improving the mechanical properties stability and the structure of critical duty castings made of austenitic steel grade 12Kh18N9TL is the most important issue, and the solution of this problem requires the chemical composition optimization. **Methods applied.** To determine the nature and rate of the influence of the chemical composition on the mechanical properties and the content of the ferritic phase, the correlation and regression analysis was used. The chemical composition of steel grade 12Kh18N9TL was optimized by the steepest ascent method. **Originality.** We designed the mathematical models that predict the mechanical properties and the content of the ferritic phase for the given chemical composition. **Result.** We compared the matching and partial correlation coefficients of the influence of the chemical composition on the mechanical properties and the ferrite content of steel. Graphical diagrams were built to show the influence of the titanium and aluminum ratio on the mechanical properties and the content of the ferritic phase. **Practical relevance.** The chemical composition of corrosion-resistant austenitic steel has been optimized within the GOST limits to provide the required content of the ferritic phase. The results of the research may be valuable for manufacturing castings from corrosion resistant steel 12Kh18N9TL.

Keywords: chemical composition, corrosion-resistant steel, casting, ferritic phase, correlation and regression analysis.

For citation

Ganeev A.A., Ramazanov A.K. Optimization of a Chemical Composition of Corrosion-Resistant Steel 12KH18N9TL for Pipeline Valve Castings. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021, vol. 19, no. 2, pp. 32–39. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-2-32-39>

Введение

Для изготовления отливок корпусных деталей трубопроводной арматуры, работающих в условиях высоких температур и агрессивных сред, широкое применение нашла коррозионно-стойкая сталь аустенитного класса марки 12Х18Н9ТЛ.

Данная сталь обладает относительно высокими эксплуатационными свойствами, высокой пластичностью и ударной вязкостью. Однако недостатками этой стали является низкий предел текучести (порядка 200 МПа), неоднородность структуры, склонность к межкристаллитной коррозии.

Следует отметить, что основной характеристикой качества литьих деталей являются механические свойства, определяемые структурой металла, которая существенно изменяется с содержанием легирующих элементов стали 12Х18Н9ТЛ в пределах ГОСТа [1]. Кроме того,

данная сталь находится вблизи границы аустенитно-ферритной структуры и при изменении химического состава в пределах ГОСТа содержит до 20% α -фазы [2]. Присутствие ферритной фазы в аустенитных сталях отрицательно влияет на служебные свойства отливок, работающих при высоких температурах, так как δ -феррит со временем переходит в хрупкую σ -фазу [3].

Для аустенитных сталей при температуре выше 350°C СФФ должно быть не более 5% [4]. По данным [5] удовлетворительную трещиноустойчивость стали аустенитного класса достигаются при СФФ не более 5%.

В зарубежной практике для производства отливок трубопроводной арматуры применяются заменители стали марки 12Х18Н9ТЛ: CF3, CF8, GX5CrNi19-10 (1.4308) и GX2CrNi19-11 (1.4309) [6], AISI 304, 321 и 347 [7]. По данным [8] свойства и эксплуатационные характеристики отливок нержавеющей стали тесно связаны с ее мик-

роструктурой (количеством δ -феррита), которая в свою очередь зависит от химического состава [9]. Основные недостатки сталей аналогов характерны стали марки 12Х18Н9ТЛ: образование ферритной фазы, отрицательно влияющей на пластичность и ударную вязкость [10, 11], склонность к межкристаллитной коррозии.

Таким образом, повышение стабильности механических свойств и структуры литьих деталей ответственного назначения из аустенитной стали марки 12Х18Н9ТЛ является важнейшей задачей, для решения которой необходима оптимизация ее химического состава. Поэтому целью настоящей работы является исследование и оптимизация химического состава стали 12Х18Н9ТЛ в пределах ГОСТа, обеспечивающие стабильность и высокие показатели механических свойств, в частности предела текучести при минимальном СФФ (не более 5%).

Материал и методика исследования

Исследования проводили на стали 12Х18Н9ТЛ по ГОСТ 977-88 следующего химического состава: $C \leq 0,13\%$; $Si = 0,10\text{--}1,20\%$; $Mn = 0,88\text{--}2,20\%$; $P \leq 0,035\%$; $S \leq 0,030\%$; $Cr = 16,5\text{--}20,5\%$; $Ni = 7,5\text{--}11,5\%$; $Ti = (5*C - 0,03) - 0,75$; $Cu \leq 0,5\%$. Выплавка стали производилась в электродуговой печи емкостью 3 т с основной футеровкой. Образцы для механических испытаний подвергались термической обработке по режиму: закалка при температуре 1050°C, выдержка 2 ч 30 мин (охлаждение в воде). Механические свойства стали 12Х18Н9ТЛ после

Таблица 1. Парные и частные коэффициенты корреляции механических свойств, СФФ и химических элементов стали 12Х18Н9ТЛ

Table 1. Matching and partial correlation coefficients of the mechanical properties, content of the ferritic phase and chemical elements of steel grade 12Kh18N9TL

Показатели механических свойств	Коэффициенты	Химические элементы									
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Ti	Al	Cu
σ_t , кгс/см ²	Парные	0,22	0,36	0,19	-0,09	0,07	0,65	-0,13	0,24	0,26	-0,01
	Частные	0,07	0,15	0,01	-0,03	0,06	0,60	-0,15	0,08	0,21	0,09
σ_b , кгс/см ²	Парные	-0,02	0,17	-0,09	-0,15	-0,04	0,00	-0,50	-0,23	-0,27	-0,01
	Частные	0,02	0,14	-0,08	-0,14	-0,03	-0,04	-0,47	-0,09	-0,14	0,06
δ , %	Парные	-0,14	-0,03	-0,15	-0,04	-0,16	-0,18	-0,04	-0,32	-0,28	-0,04
	Частные	-0,05	0,03	-0,05	0,01	-0,15	-0,18	-0,03	-0,24	-0,09	-0,05
ψ , %	Парные	-0,09	-0,06	-0,10	0,02	-0,08	-0,07	-0,03	-0,28	-0,19	0,05
	Частные	-0,02	-0,04	-0,02	0,02	-0,10	-0,05	-0,03	-0,19	0,04	0,03
KCV_{60} , Дж/см ²	Парные	-0,33	-0,12	-0,20	0,05	-0,14	-0,09	0,15	-0,43	-0,33	-0,04
	Частные	-0,23	-0,05	-0,08	0,21	-0,11	-0,03	0,13	-0,38	-0,02	-0,21
СФФ, %	Парные	-0,09	-0,04	0,04	0,16	0,16	0,30	-0,16	0,03	-0,00	0,42
	Частные	-0,11	-0,11	0,03	-0,07	-0,01	0,36	-0,28	0,09	0,04	0,48

термообработки должны быть следующие: $\sigma_t \geq 196$ МПа, $\sigma_b \geq 441$ МПа, $\delta \geq 25\%$, $\psi \geq 32\%$, $KCV_{60} \geq 24,5$ Дж/см². Металлографическое исследование изучалось на оптическом микроскопе Axio Observer.D1m. Конфигурация брусков для исследования механических свойств соответствовала ГОСТ 977-88.

Для определения взаимосвязи химического состава, механических свойств и СФФ применялся корреляционно-регрессионный анализ, выполняемый на большом массиве производственных плавок (результаты спектрального анализа химического состава и механических свойств более 400 плавок) с использованием программного пакета Microsoft Office Excel и Statistica 6.0.

Оптимизация состава стали марки 12Х18Н9ТЛ проводилась по содержанию в ее структуре ферритной фазы при ограничениях, накладываемых пределом текучести, и элементов химического состава методом крутого восхождения.

Результаты исследования и их обсуждение

При помощи пакета Statistica 6.0 проведен корреляционный анализ [12], по результатам которого получены парные и частные коэффициенты корреляции механических свойств (σ_t , σ_b , δ , ψ , KCV_{60}), СФФ и химических элементов стали 12Х18Н9ТЛ (табл. 1, значимые коэффициенты выделены).

Анализ значимых коэффициентов корреляции (**табл. 2**) показывает, что хром, титан и алюминий оказывают наибольшее положительное влияние на предел текучести. В то же время хром отрицательно влияет на СФФ (увеличивает), а титан и алюминий оказывают отрицательное влияние на пластические характеристики и ударную вязкость. Кроме того, хром, титан и алюминий имеют большую склонность к образованию тугоплавких и плотных окисных плен типа Cr_2O_3 , TiO и Al_2O_3 , ухудшающих литейные свойства [2, 13].

Повышение содержания алюминия может быть причиной повышения склонности стали к образованию σ -фазы и ухудшению жаропрочности [14]. Поэтому содержания в стали Cr, Ti и Al необходимо снизить до минимального уровня. Кремний оказывает положительное влияние на прочностные характеристики и отрицательное на ударную вязкость. Кроме того, кремний улучшает жидкотекучесть стали и повышает ее жаростойкость, поэтому его содержание в пределах 0,6–1,0% полезно, увеличение сверх 1–2% повышает СФФ и ухудшает пластические свойства [15]. Никель оказывает отрицательное влияние на прочностные характеристики и положительное на ударную вязкость и СФФ (снижает). Углерод оказывает положительное влияние на предел текучести и отрицательно на ударную вязкость. Углерод оказывает отрицательное влияние на стойкость к межкристаллитной коррозии, поэтому его содержание необходимо снизить до минимального уровня. Марганец не оказывает заметного влияния на свойства стали. Фосфор, сера и медь отрицательно влияют на свойства стали и СФФ и являются постоянными контролируемыми примесями.

Таблица 2. Химический состав в точках 1–5
Table 2. Chemical composition at points 1–5

Номер спектра	Содержание элементов, масс. %								
	Fe	O	N	Mn	S	Cr	Ni	Ti	Al
1	22,13	-	13,70	-	-	8,09	2,12	53,97	-
2	30,62	-	17,02	0,97	-	10,28	3,57	37,54	-
3	34,98	-	-	-	11,93	14,09	2,64	35,71	0,64
4	28,38	11,54	8,52	0,96	-	8,77	3,26	34,10	4,46
5	35,79	14,77	-	1,16	-	11,44	4,06	14,62	18,17

Корреляционный анализ показывает, что механические свойства связаны с C, Si, Cr, Ni, Ti и Al. Поэтому они были выбраны в качестве независимых переменных при оптимизации химического состава стали.

Необходимо отметить, что из всех элементов химического состава стали 12Х18Н9ТЛ алюминий, единственный элемент, содержание которого не регламентируется ГОСТ. Алюминий применяется для раскисления стали и входит в состав некоторых ферросплавов: в ферротитане марки ФТи35С8 содержится до 14% алюминия, а в ферротитане марки ФТи25 до 25% (ГОСТ 4761-91).

На **рис. 1** приведены графические зависимости влияния соотношения содержания титана к алюминию на показатели механических свойств (σ_t , σ_b , δ , ψ , KCV₆₀) и СФФ серийной стали 12Х18Н9ТЛ при использовании ферротитана марки ФТи35С8, из которого следует, что с уменьшением Ti/Al снижаются все показатели механических свойств за исключением предела текучести. Максимальный уровень механических свойств и минимальное СФФ наблюдается при Ti/Al=8,3 (Ti=0,25% и Al=0,04%). Резкое снижение механических свойств и увеличение СФФ наблюдается при Ti/Al=2,1 (Ti=0,37% и Al=0,18%). Поэтому при концентрации Ti=0,25–0,37% и Al=0,04–0,18%, как это видно из **рис. 1**, можно обеспечить удовлетворительное сочетание механических свойств и СФФ.

Такое влияние обусловлено тем, что алюминий и титан способствуют образованию неметаллических включений типа TiN, AlN, TiS, TiO, Al_2O_3 , располагающихся в виде цепочек по границам зерен. Нитриды алюминия являются регуляторами аустенитного зерна и в определенных условиях приводят к появлению трещин в отливках [16].

На **рис. 2** представлены результаты металлографического исследования образца на растяжение из стали 12Х18Н9ТЛ, полученные при помощи оптического микроскопа Axio Observer.D1m, оснащенного анализатором изображения Thixomet. В **табл. 2** представлен анализ химического состава неметаллических включений в точках 1–5 (**рис. 2, а**), выполненный с использованием растрового электронного микроскопа Ultra 55, оборудованного энергодисперсионным спектрометром INCA Energy 450X-xMAX. Повышенное содержание кислорода, азота, серы, титана и алюминия характерно для образования неметаллических включений типа TiN, AlN, TiS, TiO, Al_2O_3 [1].

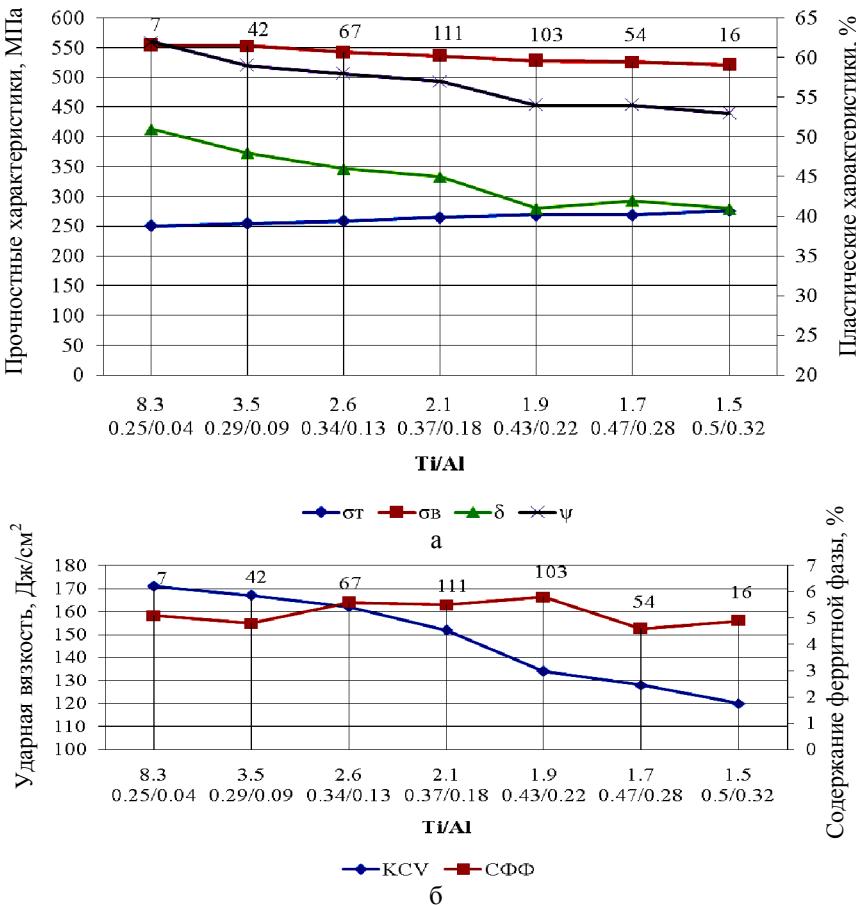


Рис. 1. Влияние соотношения содержания титана к алюминию на механические свойства и СФФ стали 12Х18Н9ТЛ при среднем содержании других элементов в пределах ГОСТ 977-88 (C=0,04–0,06; Si=0,74–0,78; Mn=1,21–1,46; P=0,023–0,028; S=0,007–0,008; Cr=17,86–18,04; Ni=8,32–8,72; Cu=0,12–0,14): (а – ст, σ_B , δ , ψ ; б – KCV-60, СФФ). Температура стали перед заливкой 1590–1601°C. Цифры указывают количество плавок

Fig. 1. Influence of the titanium and aluminum ratio on the mechanical properties and the content of the ferritic phase of steel grade 12Kh18N9TL at an average content of other elements within GOST 977-88 (C=0.04–0.06; Si=0.74–0.78; Mn=1.21–1.46; P=0.023–0.028; S=0.007–0.008; Cr=17.86–18.04; Ni=8.32–8.72; Cu=0.12–0.14): (a is σ_T , σ_B , δ , ψ ; б is KCV-60, content of the ferritic phase). Steel temperature before casting is 1590–1601°C. Figures show the number of heats

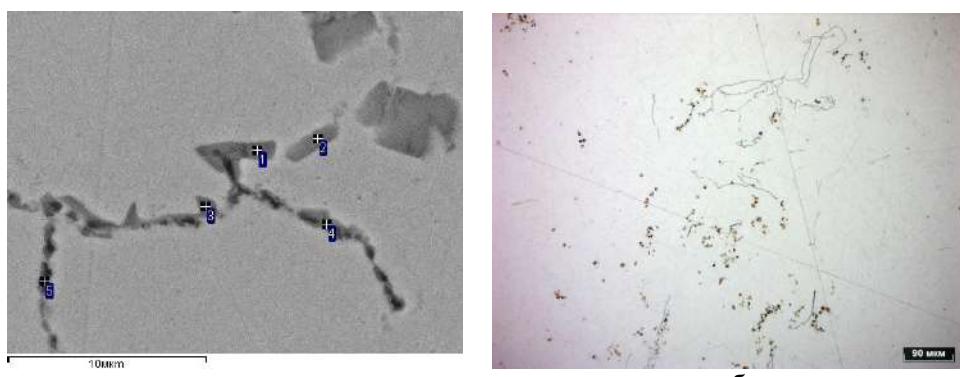


Рис. 2. Микроструктура стали 12Х18Н9ТЛ химического состава: C=0,05%; Si=0,62%; Mn=1,02%; P=0,020%; S=0,006%; Cr=19,1%; Ni=9,16%; Ti=0,50%; Al=0,27%; Cu=0,10%: а – увеличение 10 мкм; б – увеличение 90 мкм

Fig. 2. Microstructure of steel grade 12Kh18N9TL with the following chemical composition: C=0.05%; Si=0.62%; Mn=1.02%; P=0.020%; S=0.006%; Cr=19.1%; Ni=9.16%; Ti=0.50%; Al=0.27%; Cu=0.10%: а is magnified x10 μm ; б is magnified x90 μm

Далее для совокупного влияния химических элементов на изменение показателей механических свойств и СФФ стали 12Х18Н9ТЛ был проведен множественный регрессионный анализ.

Методом множественного регрессионного анализа получены адекватные математические модели зависимости предела текучести, времененного сопротивления, относительного удлинения, относительного сужения, ударной вязкости и СФФ от их химического состава:

$$\begin{aligned}\sigma_t = & -30,421 + 105,693C + 24,522Si + 0,636Mn - \\& - 138,862P + 767,502S + 16,719Cr - \\& - 7,336Ni + 20,136Ti + 69,600Al + 74,650Cu; \\R = & 0,75; R^2 = 0,56;\end{aligned}\quad (1)$$

$$\begin{aligned}\sigma_b = & 915,839 + 50,835C + 34,819Si - 12,844Mn - \\& - 979,869P - 673,667S - 1,894Cr - 36,288Ni - \\& - 38,004Ti - 69,578Al + 72,473Cu; \\R = & 0,59; R^2 = 0,35;\end{aligned}\quad (2)$$

$$\begin{aligned}\delta = & 111,935 - 28,100C + 2,007Si - 2,117Mn + \\& + 9,664P - 835,990S - 2,161Cr - 0,651Ni - \\& - 26,179Ti - 12,142Al - 17,243Cu; \\R = & 0,42; R^2 = 0,17;\end{aligned}\quad (3)$$

$$\begin{aligned}\psi = & 97,284 - 15,021C - 3,174Si - 1,261Mn + \\& + 37,398P - 682,923S - 0,683Cr - 0,857Ni - \\& - 39,543Ti + 6,606Al + 13,862Cu; \\R = & 0,31; R^2 = 0,09;\end{aligned}\quad (4)$$

Таблица 3. Параметры кругого восхождения по поверхности отклика
Table 3. Parameters of steepest ascent on response surface

Наименование	Факторы										Отклик <i>y</i>
	<i>x</i> ₁	<i>x</i> ₂	<i>x</i> ₃	<i>x</i> ₄	<i>x</i> ₅	<i>x</i> ₆	<i>x</i> ₇	<i>x</i> ₈	<i>x</i> ₉	<i>x</i> ₁₀	
Основной уровень	0,065	0,8	1,54	0,0175	0,015	18,5	9,5	0,31	0,11	0,25	
Верхний уровень (+)	0,13	1	2,2	0,035	0,03	20,5	11,5	0,37	0,18	0,5	
Нижний уровень (-)	0	0,6	0,88	0	0	16,5	7,5	0,25	0,04	0	
Коэффициент <i>b</i> _{<i>i</i>}	-33,406	-3,912	0,630	-67,334	-15,999	2,099	-1,918	5,004	2,956	86,835	
Интервал варьирования <i>e</i> _{<i>i</i>}	0,065	0,2	0,66	0,0175	0,015	2	2	0,06	0,07	0,25	
<i>b</i> _{<i>i</i>} · <i>e</i> _{<i>i</i>}	-2,171	-0,782	0,416	-1,178	-0,240	4,199	-3,836	0,300	0,207	21,709	
Шаг <i>D</i> _{<i>i</i>}	0,006	0,002	-0,001	0,003	0,001	-0,011	0,010	-0,001	-0,001	-0,057	
Округленный шаг	0,006	0,002	-0,001	0,003	0,001	-0,011	0,010	-0,001	-0,001	-0,057	
Мыслимый шаг 1	0,07	0,80	1,54	0,0175	0,005	18,49	9,51	0,31	0,11	0,19	9,42
Мыслимый шаг 2	0,08	0,80	1,54	0,0175	0,005	18,48	9,52	0,31	0,11	0,14	4,27
Мыслимый шаг 3	0,08	0,81	1,54	0,0175	0,005	18,47	9,53	0,31	0,11	0,08	-0,88
Реализованный опыт 1	0,05	0,76	1,36	0,017	0,007	17,34	8,22	0,33	0,14	0,09	3
Реализованный опыт 2	0,05	0,69	1,46	0,023	0,005	17,2	8,36	0,33	0,13	0,1	2
Реализованный опыт 3	0,06	0,91	1,35	0,021	0,009	17,16	8,41	0,29	0,11	0,12	2,31
Реализованный опыт 4	0,07	0,89	1,55	0,023	0,006	18,44	9,02	0,32	0,1	0,1	0,7
Реализованный опыт 5	0,05	0,63	1,22	0,021	0,006	16,93	8,86	0,22	0,1	0,11	4,06
Реализованный опыт 6	0,05	0,85	1,24	0,013	0,005	17,79	8,12	0,28	0,11	0,08	1,46
Реализованный опыт 7	0,06	0,66	1,17	0,022	0,007	17,47	7,9	0,27	0,06	0,12	6,1
Реализованный опыт 8	0,04	0,8	1,35	0,015	0,01	17,32	8,6	0,32	0,14	0,13	7

$$\begin{aligned}KCV_{-60} = & 230,55 - 669,20C - 14,34Si - \\& - 14,05Mn + 1860,22P - 2703,12S - 1,63Cr + \\& + 12,61Ni - 193,27Ti - 13,89Al - 347,73Cu; \\R = & 0,57; R^2 = 0,32;\end{aligned}\quad (5)$$

$$\begin{aligned}СФФ = & -24,034 - 33,406C - 3,912Si - 0,630Mn - \\& - 67,334P - 15,999S + 2,099Cr - 1,918Ni + \\& + 5,004Ti + 2,956Al + 86,835Cu; \\R = & 0,59; R^2 = 0,34.\end{aligned}\quad (6)$$

Используя полученную математическую зависимость (6), реализована программа кругого восхождения. В табл. 3 приведены результаты мыслимых и фактически реализованных опытов.

В табл. 4 приведены результаты механических свойств и содержания ферритной фазы реализованных опытов. Лучшие результаты, при которых обеспечиваются стабильное содержание ферритной фазы и высокий уровень механических свойств, в частности предел текучести, получены при 1, 3, 4 и 6 экспериментах. Величина параметра оптимизации нас удовлетворила и работа была закончена.

Осуществление программы кругого восхождения позволило определить интервал варьирования элементов химического состава стали 12Х18Н9ТЛ, отвечающий заданным требованиям (табл. 5).

Таким образом, выполненные исследования позволили установить оптимальные параметры химического состава, механических свойств и СФФ стали 12Х18Н9ТЛ для отливок трубопроводной арматуры.

Таблица 4. Механические свойства и СФФ реализованных опытов

Table 4. Mechanical properties and the content of the ferritic phase of the performed experiments

Номер опыта	σ_t , МПа	σ_b , МПа	δ , %	ψ , %	KCV_{-60} , Дж/см ²	СФФ, %
1	255	520	45	45	117	3
2	235	540	58	62	196	2
3	280	590	44	57	131	2,31
4	260	510	57	57	193	0,7
5	250	540	54	66	202	4,06
6	260	560	45	67	218	1,46
7	250	600	50	62	127	6,1
8	240	560	48	68	139	7

Таблица 5. Оптимизированный химический состав стали

Table 5. Optimized chemical composition of steel

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Ti	Al	Cu
0,05-0,07	0,76-0,91	1,24-1,55	0,013-0,023	0,005-0,009	17,16-18,44	8,12-9,02	0,28-0,33	0,10-0,14	0,08-0,12

Применение оптимизированного химического состава коррозионно-стойкой austenитной стали позволило повысить стабильность и уровень механических и эксплуатационных свойств отливок корпусных деталей трубопроводной арматуры.

Заключение

Проведен корреляционный анализ химического состава стали 12Х18Н9ТЛ. Наибольшее влияние на показатели механических свойств оказывают титан и алюминий.

Методом множественного регрессионного анализа получены уравнения множественной регрессии, позволяющие прогнозировать по заданному содержанию химических элементов уровень механических свойств и СФФ.

Проведенные исследования позволяют рекомендовать следующий химический состав стали с наилучшей комбинацией механических свойств при минимальном СФФ (0,7–3,0%) для отливок корпусных деталей трубопроводной арматуры: C = 0,05 – 0,07%; Si = 0,76 – 0,91%; Mn = 1,24 – 1,55%; P = 0,013 – 0,023%; S = 0,005 – 0,009%; Cr = 17,16 – 18,44%; Ni = 8,12 – 9,02%; Ti = 0,28 – 0,33%; Al = 0,10 – 0,14%; Cu = 0,08 – 0,12%.

Результаты проведенного исследования имеют большое практическое значение и могут быть рекомендованы предприятиям при изготовлении литых деталей из нержавеющей стали 12Х18Н9ТЛ с повышенным пределом текучести и требуемым контролируемым содержанием ферритной фазы.

Список литературы

1. Влияние химического состава на механические свойства легированной стали / Луценко В.А., Голубенко Т.Н., Луценко О.В., Козачек А.С., Глазуно-

- ва Н.А. // Литье и металлургия. 2018. №1. С. 120–123.
2. Рамазанов А.К., Ганеев А.А. Особенности литья корпусных деталей трубопроводной арматуры из коррозионно-стойкой стали марки 12Х18Н9ТЛ // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т.18. №2. С. 22–29.
 3. Нехенди Ю.А. Некоторые вопросы теории легирования специальных литьих высоколегированных сплавов // Литейное производство. №10. 1958. С. 23.
 4. Эксплуатация и ремонт технологических трубопроводов под давлением до 10,0 МПа. РД 38.13.004–86.
 5. Васильевский П.Ф. Технология стального литья. М.: Машиностроение, 1974. 408 с.
 6. СТ ЦКБА 005.3-2009. Арматура трубопроводная. Металлы, применяемые в арматуростроении. Ч. 3. Зарубежные материалы и их отечественные аналоги // ЗАО «НПФ «ЦКБА», 2009. 61с.
 7. Mainak Saha. Study of Austenitic Stainless Steel Castings. Volume 14, Issue 3 Ver. III (May. - June. 2017), pp. 01–06.
 8. Marcelo Aquino Martorano, Caio Fazzioli Tavares and Angelo Fernando Padilha. Predicting Delta Ferrite Content in Stainless Steel Castings. ISIJ International, vol. 52 (2012), no. 6, pp. 1054–1065.
 9. Angelo Fernando Padilha; Caio Fazzioli Tavares; Marcelo Aquino Martorano. Delta Ferrite Formation in Austenitic Stainless Steel Castings. Materials Science Forum. Vol. 730–732 (2013), pp. 733–738.
 10. Parrens C., Dupain J.-L., Malard B., Poquillon D. Aging effect on creep properties of type 310 austenitic stainless steel during isothermal and non-isothermal creep tests at 870°C. Experiments and modeling. Creep and Fracture of Engineering, pp.132–133 // Materials and Structures (Creep2017): Proceedings of the 14th International Conference on Creep and Fracture of Engineering Materials and Structures. June 19–21, 2017. St. Petersburg: Polytechnical Publishing House. 2017. 170 p.
 11. R. Prakash Kolli, Sarah Mburu, Daniel E. Pereira, Jia Liu, Samuel C. Schwarm, Arielle Eaton, Sreeramamurthy

- Ankem. Characterization of Element Partitioning at the Austenite/Ferrite Interface of as Cast CF-3 and CF-8 Duplex Stainless Steels. Microscopy and Microanalysis, vol. 21, Supplement S3: Proceedings of Microscopy & Microanalysis 2015, August 2015, pp. 365–366.
12. Боровиков В. *Statistica. Искусство анализа данных на компьютере*. СПб.: Питер, 2003. 688 с.
13. Оюунцэг Ц., Батмунх Б., Мунхтуяа Ц. Исследование свойств литьевых нержавеющих сталей // Материалы VI Международной конференции «Проблемы механики современных машин» / М-во образования и науки Российской Федерации, Уханьский текстильный ун-т (КНР) [и др.; редкол.: В.С. Балбаров – отв. ред. и др.]. Улан-Удэ: Изд-во ВСГУТУ, 2015, Т. 2. С. 242–248.
14. Химушин Ф.Ф. Нержавеющие стали. М.: Металлургия, 1967. 800 с.
15. Кремер М.А. Фасонное литье из нержавеющей и кислотостойкой стали. М., 1961. 74 с.
16. Регрессионный анализ качества сталей и сплавов / Ефимычев Ю.И., Михайлов С.К., Святкин Б.К., Прокhorov И.И. М.: Металлургия, 1976. 224 с.

References

- Lutsenko V.A., Golubenko T.N., Lutsenko O.V., Kozachek A.S., Glazunova N.A. The impact of chemical composition on mechanical properties of the alloyed steel. *Lityo i Metallurgiya* [Foundry Production and Metallurgy], 2018, no. 1, pp. 120–123. (In Russ.)
- Ramazanov A.K., Ganeev A.A. Features of casting pipeline valve body parts made of corrosion-resistant steel 12Kh18N9TL. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2020, vol. 18, no. 2, pp. 22–29. (In Russ.)
- Nekhendzi Yu. A. Some issues on the theory of alloying of special cast high alloys. *Liteynoe proizvodstvo* [Foundry], 1958, no. 10, p. 23. (In Russ.)
- Guiding document RD 38.13.004-86. Operation and Repair of Process Pipelines Operating Under Pressure up to 10.0 MPa (100 kgf/square centimeter).
- Vasilevsky P.F. *Tekhnologiya stalnogo litya* [Technology of steel castings]. Moscow: Mechanical engineering, 1974, 408 p. (In Russ.)
- ST TsKBA 005.3-2009. Pipeline fittings. Metals used in production of fittings. Part 3. Foreign materials and their domestic equivalents. ZAO NPF TsKBA, 2009, 61 p.
- Mainak Saha. Study of austenitic stainless steel castings.
- Volume 14, Issue 3 Ver. III (May - June 2017), pp. 01–06.
- Marcelo Aquino Martorano, Caio Fazzioli Tavares and Angelo Fernando Padilha. Predicting delta ferrite content in stainless steel castings. *ISIJ International*, vol. 52 (2012), no. 6, pp. 1054–1065.
- Angelo Fernando Padilha; Caio Fazzioli Tavares; Marcelo Aquino Martorano. Delta ferrite formation in austenitic stainless steel castings. *Materials Science Forum*, vols. 730–732 (2013), pp. 733–738.
- Parrens C., Dupain J.-L., Malard B., Poquillon D. Aging effect on creep properties of type 310 austenitic stainless steel during isothermal and non-isothermal creep tests at 870°C. Experiments and modeling. *Creep and Fracture of Engineering*, pp.132–133. *Materials and Structures (Creep2017): Proceedings of the 14th International Conference on Creep and Fracture of Engineering Materials and Structures*. June 19–21, 2017. St. Petersburg: Polytechnical Publishing House, 2017, 170 p.
- R. Prakash Kolli, Sarah Mburu, Daniel E. Perea, Jia Liu, Samuel C. Schwarm, Arielle Eaton, Sreeramamurthy Ankem. Characterization of element partitioning at the austenite/ferrite interface of as cast CF-3 and CF-8 duplex stainless steels. *Microscopy and Microanalysis*, volume 21, supplement S3: Proceedings of Microscopy & Microanalysis 2015, August 2015, pp. 365–366.
- Borovikov V. *Statistica. Iskusstvo analiza dannykh na kompyutere* [Statistica. The art on computer analysis of data]. Saint Petersburg: Piter, 2003, 688 p. (In Russ.)
- Oyuntsetseg C., Batmunkh B., Munkhtuya C. The study of the properties of the casting stainless steels. *Materialy VI Mezhdunarodnoy konferentsii Problemy mekhaniki sovremennykh mashin* [Proceedings of the 6th International Scientific Conference *Issues on Mechanics of Modern Machines*], The Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Wuhan Textile University (PRC). Ulan-Ude: Publishing Department of East Siberia State University of Technology and Management, 2015, vol. 2, pp. 242–248. (In Russ.)
- Khimushin F.F. *Nerzhavayushchie stali* [Stainless steels]. Moscow: Metallurgy, 1967, 800 p. (In Russ.)
- Kremер М.А. *Fasonnoe litie iz nerzhavayushchey i kislotoystoykoy stali* [Shaped castings made of stainless and acid-resistant steel]. Moscow, 1961, 74 p. (In Russ.)
- Efimychev Yu.I., Mikhailov S.K., Svyatkin B.K., Prokhorov I.I. *Regressionny analiz kachestva staley i splavov* [Regression analysis of the quality of steels and alloys]. Moscow: Metallurgy, 1976, 224 p. (In Russ.)

Поступила 30.03.2021; принята к публикации 23.04.2021; опубликована 28.06.2021
Submitted 30/03/2021; revised 23/04/2021; published 28/06/2021

Ганеев Альмир Амирович – доктор технических наук, профессор,
Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия.

Рамазанов Азат Камилович – заместитель начальника сталелитейного цеха,
АО «Благовещенский арматурный завод», Благовещенск, Россия. Email: azat-ramazanov@yandex.ru

Almir A. Ganeev – DrSc (Eng.), professor
Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia.

Azat K. Ramazanov – Deputy Head of the Steel Foundry Shop,
JSC Blagoveshchensk Valves Plant, Blagoveshchensk, Russia. Email: azat-ramazanov@yandex.ru

ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

MATERIAL PROCESS ENGINEERING

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.793
DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-2-40-49



РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЯ МЕДЬ-ВОЛЬФРАМ МЕТОДОМ ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ

Латфулина Ю.С.¹, Дубенская М.², Самодурова М.Н.¹, Трофимов Е.А.¹, Барков Л.А.¹

¹ Южно-Уральский государственный университет (НИУ), Челябинск, Россия

² Национальная инженерная школа Сент-Этьена ENISE, Сент-Этьен, Франция

Аннотация. Работа посвящена изучению микроструктуры и свойствам композитных покрытий системы Cu-W, наносимых методом холодного газодинамического напыления (ХГН). Рассматриваемый процесс позволяет получать высококачественные покрытия из различных видов материалов. ХГН широко используется и исследуется благодаря технологической простоте, широкому спектру напыляемых материалов и рабочим температурам. В данном процессе частица с высокой скоростью ударяется о подложку, чтобы вызвать сильную пластическую деформацию и затем создать покрытие. Благодаря низкой температуре и высокой скорости по сравнению с термическим напылением, процесс холодного напыления все чаще используется в промышленности для нанесения защитных покрытий. Характеристики осаждения частиц, формирование покрытия при холодном напылении отличаются от термического напыления. Многие теоретические исследования процесса холодного напыления способствуют развитию высокоэффективных покрытий, что делает процесс холодного напыления популярной областью исследований. Однако существуют некоторые технологические проблемы, которые возникают при напылении материалов с низкими температурами плавления. Во время размягчения частицы прилипают к стенкам технологической оснастки (насадке) и блокируют распыление. На практике эта проблема решается с помощью добавления керамических частиц и распылительную смесь порошков. В результате сформированное покрытие будет обладать лучшими механическими свойствами, и технологическая задача будет решена. В работе выполнен обобщенный анализ результатов исследований микроструктуры и практических экспериментов, а также выполнено сравнение с другими методами нанесения покрытий. Приведена экспериментальная методика подготовки образцов и используемое оборудование. Показаны микроструктура до и после термообработки напыленных образцов, измерения микротвердости и теплопроводности.

Ключевые слова: холодное газодинамическое напыление, нанесение покрытий, медь, вольфрам, порошок.

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 (202007Г3).

© Латфулина Ю.С., Дубенская М., Самодурова М.Н., Трофимов Е.А., Барков Л.А., 2021

Для цитирования

Реализация процесса нанесения покрытия медь-вольфрам методом холодного газодинамического напыления / Латфулина Ю.С., Дубенская М., Самодурова М.Н., Трофимов Е.А., Барков Л.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №2. С. 40–49. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-2-40-49>



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

IMPLEMENTATION OF A COPPER-TUNGSTEN COATING BY COLD GAS-DYNAMIC SPRAYING

Latfulina Yu.S.¹, Doubenskaia M.², Samodurova M.N.¹, Trofimov E.A.¹, Barkov L.A.¹

¹South Ural State University (NRU), Chelyabinsk, Russia

²National Engineering School of Saint-Etienne ENISE, Saint-Etienne, France

Abstract. This paper is devoted to the study of the microstructure and properties of composite coatings of the Cu-W system applied by cold gas-dynamic spraying (CS). The process under consideration makes it possible to obtain high-quality coatings from different types of materials. CS is widely used and studied due to its technological simplicity, a wide range of sprayed materials and operating temperatures. In this process, a particle hits the substrate at high velocity to produce a strong plastic deformation and then creates a coating. Due to lower temperature and higher velocity than thermal spraying, the cold spray process is increasingly being used in the industry for protective coatings. The characteristics of particle deposition and coating formation in cold spraying are different from thermal spraying. Many theoretical studies of the cold spray process have contributed to the development of high performance coatings, making cold spray a popular research area. However, there are some technological challenges that arise when spraying low melting point materials. During softening, particles stick to the walls of the tooling (nozzle) and block spraying. In practice, this problem is solved by adding ceramic particles and spraying powder mixture. As a result, the formed coating will have better mechanical properties, and the technological problem will be solved. The paper summarizes the results of microstructure studies and practical experiments and compares them with other methods of coating deposition. The experimental method of sample preparation and the equipment used are given. The paper shows the microstructure before and after thermal treatment of sprayed samples, and measurements of microhardness and thermal conductivity.

Keywords: cold gas-dynamic spraying, coating, copper, tungsten, powder.

The research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as part of the grant for performance of a state assignment (basic research), contract No. FENU-2020-0020 (2020071GZ).

For citation

Latfulina Yu.S., Doubenskaia M., Samodurova M.N., Trofimov E.A., Barkov L.A. Implementation of a Copper-Tungsten Coating by Cold Gas-Dynamic Spraying. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021, vol. 19, no. 2, pp. 40–49. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-2-40-49>

Введение

Вольфрамово-медные (W-Cu) композиты являются широко распространенными жаропрочными соединениями [1–4]. Они являются перспективными материалами для таких областей производства, как электроды дуговой плавки, сверхпрочные электронные контакты, электрические контакты, теплоотводы, тепловые устройства и т.п., благодаря своим уникальным свойствам [7].

Для использования в этих областях производства материалы должны обладать высокой теплопроводностью и низким коэффициентом теплового расширения (КТР) с возможностью его регулирования, например, как для используемого в этой области арсенида галлия ($K\Theta = 5,8 \cdot 10^{-6}$ 1/K) [4]. Вольфрамово-медные композиты имеют приоритет перед другими материалами, они имеют высокую теплопроводность (~200 Вт/м·К) и низкий коэффициент теплового расширения (КТР) (~ $6,5 \cdot 10^{-6}$ 1/K).

Производство покрытий из вольфрамово-медных композитов путем инфильтрации явля-

ется очень дорогим в связи с необходимостью использования высоких температур для пропитки медью, вольфрамом [5].

Процесс холодного напыления является более технологичным из-за отсутствия высоких температур, который при этом не изменяет свойства напыленной поверхности. Поэтому Н.-К. Канг и С.Б. Канг [5, 6] изучили процесс холодного напыления состава вольфрам-медь и сравнили его с методом плазменного напыления. В результате в процессе плазменного напыления медь окислялась и ухудшала свойства покрытия, а после холодного напыления процесс окисления меди отсутствует.

Микроструктурный анализ показал зависимость количества пор от содержания вольфрама в составе. Чем больше вольфрама находится в определенной области покрытия, тем больше количество и размер пор. Например, содержание вольфрама в покрытии толщиной около 100–200 мкм было максимальным, затем проявилось его снижение после увеличения толщины покрытия, что показало неэффективность нанесения покрытий толщиной более 200 мкм. В работе от-

мечено, что технология холодного напыления перспективна для производства покрытий для различных материалов. В отличие от других методов аддитивного производства, технология холодного напыления не использует высоких температур и плавления металла, как, например, при селективном лазерном плавлении. Это означает, что металлы не подвержены термическим деформациям, а для изготовления деталей не требуется применение защитной среды инертного газа или вакуума, что позволяет создавать гораздо более крупные структуры [8–11]. При создании многофункциональных покрытий по технологии холодного напыления проявляются такие преимущества, как возможность использования разнородных металлов для создания гибридных металлических деталей: титановые сплавы, медь, цинк, нержавеющая сталь, алюминий, никель, даже хастеллой и инконель могут распыляться вместе.

Материалы и методы

Для экспериментальных исследований возможности напыления покрытий было взято 5 смесей различного состава. Составы смесей представлены в **табл. 1**.

Таблица 1. Составы композиций для исследования
Table 1. Compositions for the study

Медь, масс.%	Вольфрам, масс.%
95	5
75	25
50	50
25	75
10	90

Для нанесения покрытия было использовано промышленное оборудование холодного распыления CGT KINETIKS 4000 с распылительной насадкой типа 40. Напыление производилось на алюминиевые пластины по параметрам, указанным в **табл. 2**.

Таблица 2. Технологические параметры напыления
Table 2. Technological parameters of spraying

Газ	Давление газа, бар	Температура газа, °C	Скорость подачи порошка, мм/с	Скорость манипулятора, мм/с	Наложение трехков, мм	Количество слоев	Расстояние напыления, мм
Азот	30	400	8	20	3	2-10	30

Толстые покрытия (более 1 мм) наносились с целью минимизации влияния подложки на кинетику формирования покрытия. Состав покрытия определяли с помощью анализа изображений. Анализ изображения проводился с использованием изображений, полученных с помощью сканирующей электронной микроскопии.

Полученные образцы были подготовлены для дальнейших металлографических исследований с использованием специализированного исследовательского оборудования BRILLANT 230 и Buehler SimpliMet 1000. Для пробоподготовки была использована система Buehler Phoenix 4000 для шлифовки и полировки поверхности в качестве стандартной процедуры.

Образцы были протравлены с целью наблюдения микроструктуры композитных покрытий. Изучение полученных образцов велось на микроскопе Zeiss AxioCam ICc 3. Для более детальных исследований использовался сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) Tescan. СЭМ-анализ проводился с использованием напряжения пучка 15 кВ. Образцы анализировали под увеличением в диапазоне от $\times 50$ до $\times 2000$ в двух режимах: изображение в отраженных электронах (BSE) для наблюдения фазового контраста и во вторичных электронах (SE) для получения изображений поверхности образца с высоким разрешением, выявляя элементы покрытия размером менее 1 нм [12].

Результаты и обсуждение

Эффективность напыления. Изображения полученных сечений представлены на **рис. 1**. Твердые частицы (светлые) вольфрама распределяются в мягкой матрице меди. В ходе химического анализа было определено процентное содержание вольфрама в покрытии (**табл. 3**).

Таблица 3. Количество вольфрама в покрытии до и после процесса ХГН
Table 3. Amount of tungsten in the coating before and after the CS process

Композиция	Количество вольфрама, масс.%
Cu + 5% W	5
Cu + 25% W	9
Cu + 50% W	15
Cu + 75% W	30
Cu + 90% W	49

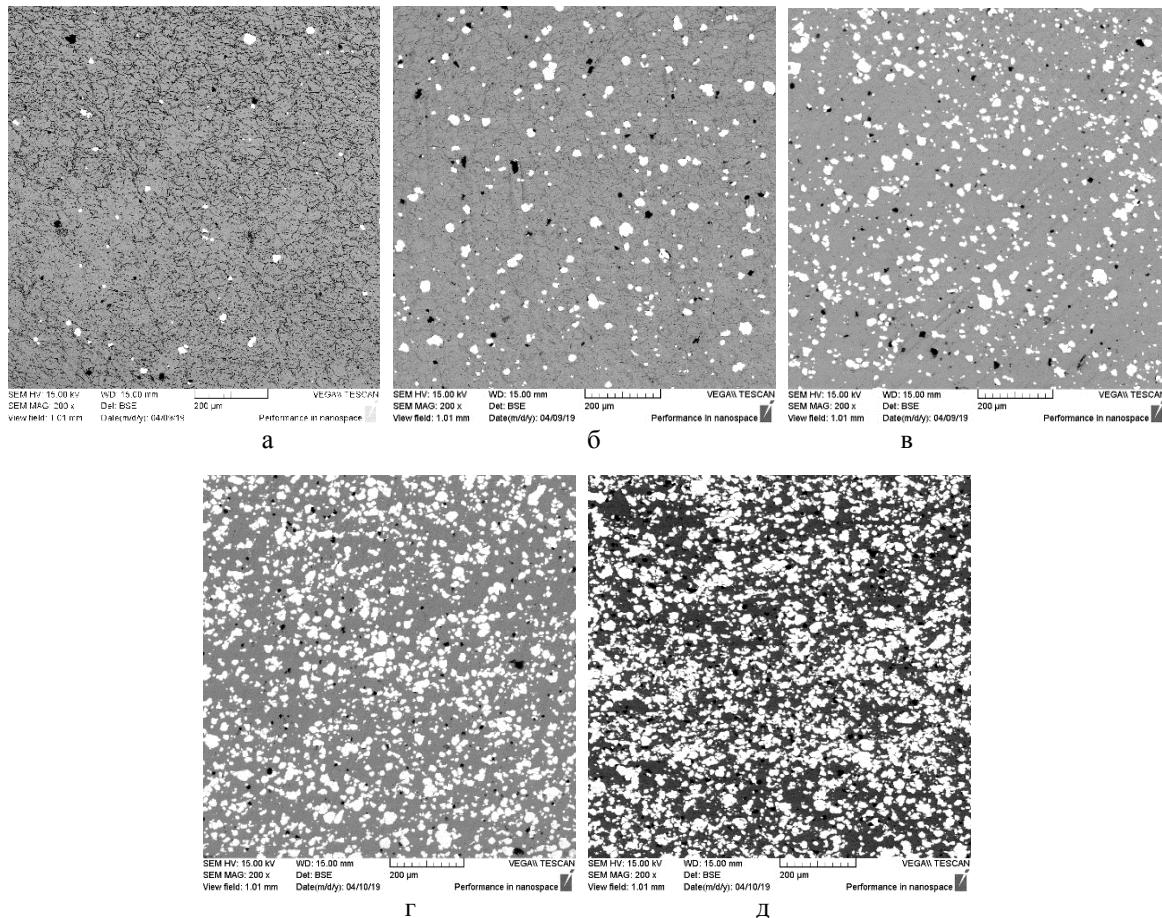


Рис. 1. SEM-изображения поперечного сечения покрытия из разных композиций: а – Cu + 5% W; б – Cu + 25% W; в – Cu + 50% W; г – Cu + 75% W; д – Cu + 90% W

Fig. 1. SEM images of the cross section of the coating from different compositions: a is Cu + 5% W, б is Cu + 25% W, в is Cu + 50% W, г is Cu + 75% W, д is Cu + 90% W

Из экспериментальных данных получено, что максимальная концентрация вольфрама не превышает 48–50%. После химического анализа становится очевидным, что максимальное содержание вольфрама в смеси не превышает 50%. Резкое снижение эффективности напыления покрытия заметно после увеличения содержания вольфрама более чем на 10–15% от общей массы состава. Это явление связано с высокой твердостью частиц вольфрама. Если твердая частица встречается с поверхностью, покрытой ранее прикрепленной твердой частицей, энергия удара недостаточно высока для отскока твердой частицы.

Результаты исследования микротвердости.

Испытание на твердость по Виккерсу [13] проводилось на хорошо отполированных сечениях образцов. Для получения среднего уровня твердости измерения проводились в пяти равных линиях, состоящих из 50 вдавливаний с расстоянием 350 мкм между ними в направлении от верхней части

композитного покрытия к стальной поверхности. Уровень микротвердости двух образцов был исследован на оборудовании Buehler MicroMet 5100. Нагрузка составила 25 г. Индентор представляет собой алмаз в виде пирамиды квадратной формы.

Измерение микротвердости проводилось для образцов до и после термообработки. В табл. 4 представлены результаты измерения. Указано среднее значение микротвердости.

Из полученных результатов видно, что микротвердость уменьшается во время термической обработки. Чем выше температура термообработки, тем сильнее снижаются значения микротвердости. Относительная погрешность эксперимента по микротвердости составляет 15%.

Исходя из результатов исследований, можно сделать предположение, что содержание водорода в исходном медном порошке, являющееся причиной увеличения пористости после термообработки образцов, снижает микротвердость с увеличением температуры термообработки.

Таблица 4. Среднее значение микротвердости
Table 4. Average microhardness

Композиция	Термообработка	Микротвердость, HV
Cu + 5%W	-	109
Cu + 25%W		100,75
Cu + 50%W		126,95
Cu + 5%W	400°C, 2 ч	85,7
Cu + 25%W		83,45
Cu + 50%W		93
Cu + 5%W	600°C, 2 ч	63,8
Cu + 25%W		58,75
Cu + 50%W		74,9

С увеличением толщины покрытия пористость уменьшается за счет перекрытия пор последующими слоями металла, поэтому толщина покрытия должна быть такой, чтобы оно было непористым или с минимальным количеством пор. Покрытие должно иметь высокую адгезию к основному металлу и не отслаиваться при механическом воздействии. Поэтому в зависимости от требований к покрытию необходимо выбрать наиболее оптимальную толщину покрытия. Однако снижение микротвердости при необходимости может пригодиться при дальнейшей механической обработке поверхности.

Микроструктура после термообработки.

Целью термической обработки в данном случае является улучшение механических свойств материала покрытия и устранение границ между зернами меди для получения однородной структуры и химического состава.

При термической обработке медь и ее сплавы могут взаимодействовать с кислородом, водородом,

водяным паром и другими соединениями (CH_4 и др.). При нагреве слитков и полуфабрикатов в восстановительной среде H_2 , H_2O , CH_4 и других соединений, содержащих водород, они диссоциируются, образовавшийся атомный водород быстро диффундирует в металл, так как коэффициент диффузии водорода в меди достаточно велик. Водород взаимодействует с окисью меди по реакции $\text{CuO} + \text{H}_2 = 2\text{Cu} + 2\text{H}_2\text{O}$. Водяной пар и другие выделяющиеся газы нерастворимы в меди и создают высокое давление, что приводит к образованию разрывов по границам зерен и пустот в зерновом теле. Разрывы затем развиваются в трещины, что особенно ярко проявляется при обработке горячим прессованием [15].

В образовавшийся газ могут входить пар и диоксид серы, а также водород. Состав и количество образовавшегося газа определяется в основном следующими факторами:

- состав сплава по отношению к компонентам, образующим очень стабильные оксиды, что снижает активность растворенного кислорода;
- возможностью поглощения водорода из окружающей среды;
- расплывается ли металл в условиях окисления или восстановления;
- практика раскисления и дегазации;
- степень загрязнения серы, если таковая существует [16].

Медь и сплавы на ее основе активно взаимодействуют с кислородом и водяными парами при повышенных температурах. В связи с этим при термической обработке изделий из меди и ее сплавов часто используются защитные атмосферы.

На рис. 2–4 видно три состава без термообработки и с термообработкой при 400 и 600°C.

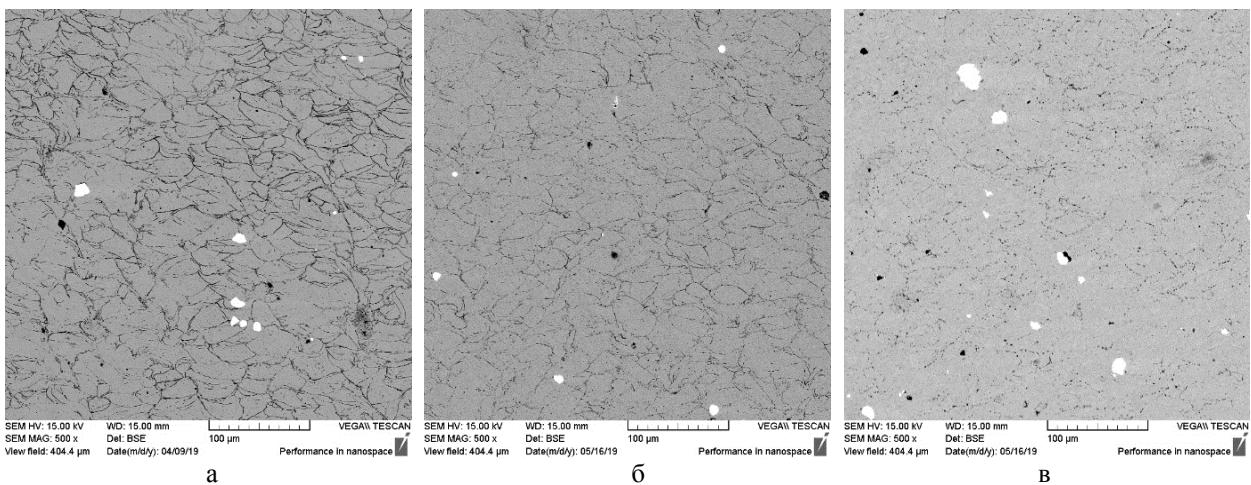


Рис. 2. Композиция Cu + 5%W: а – без термообработки; б – после термообработки при 400°C; в – после термообработки при 600°C

Fig. 2. Composition of Cu + 5%W: а is without heat treatment; б is after heat treatment at 400°C; в is after heat treatment at 600°C

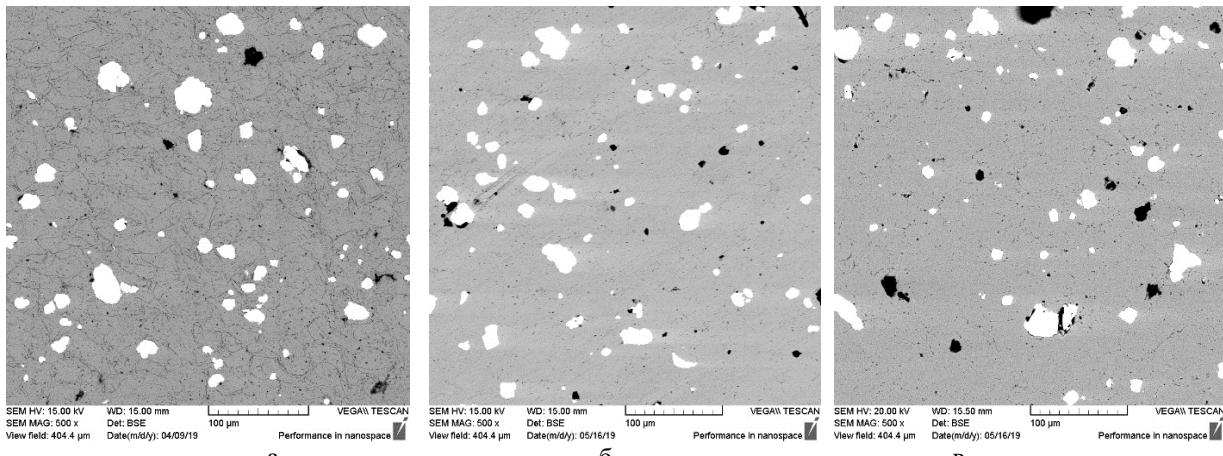


Рис. 3. Композиция Cu + 25%W: а – без термообработки; б – после термообработки при 400°C;

в – после термообработки при 600°C

Fig. 3. Composition of Cu + 25%W: a is without heat treatment; b is after heat treatment at 400°C; c is after heat treatment at 600°C

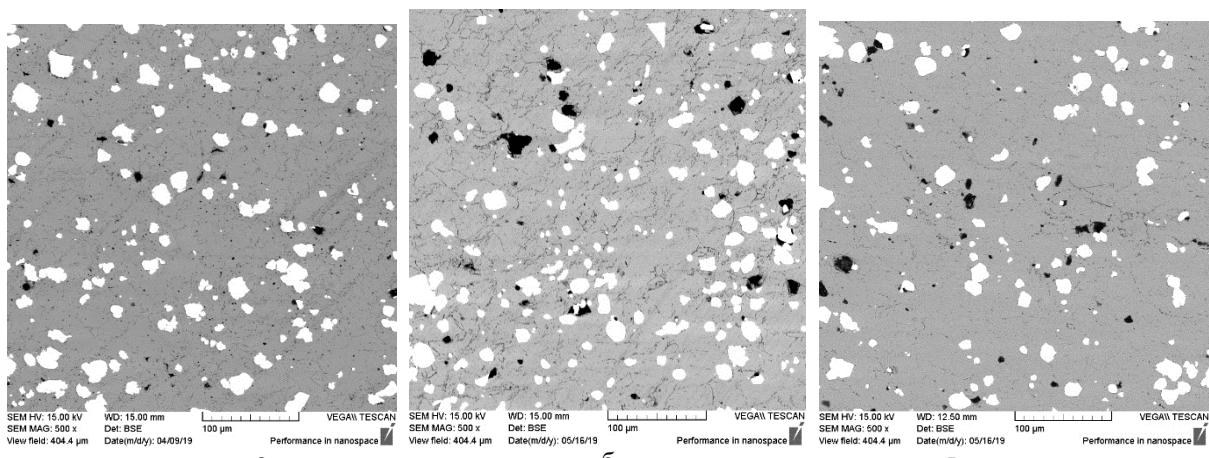


Рис. 4. Композиция Cu + 50%W: а – без термообработки; б – после термообработки при 400°C; в – после термообработки при 600°C

Fig. 4. Composition of Cu + 50%W: a is without heat treatment; b is after heat treatment at 400°C; c is after heat treatment at 600°C

Во всех трех составах после термообработки границы зерен стали менее заметны и на них появилась пористость. Воздух между медными частицами при воздействии высоких температур оказывается в межзеренном пространстве под высоким давлением, что приводит к образованию пор. Появление этого явления в долгосрочной перспективе может привести к охрупчиванию покрытия и образованию в нем дефектов, приводящих к разрушению материала. Чтобы избежать такого дефекта в особо ответственных изделиях, необходимо контролировать содержание кислорода и других газов в исходном составе.

Измерения теплопроводности. Эффективность использования материалов, применяемых для изготовления покрытий в различных областях, во многом определяется точностью информа-

ции об их теплофизических свойствах и, в частности, о теплопроводности в широком диапазоне концентраций и температур.

Изучение физико-химических свойств этих материалов в широком диапазоне изменения температуры и концентрации необходимо для более глубокого понимания изменений температурно-концентрационных характеристик их структуры при решении технологических задач.

Измерения проводились косвенным методом. Он включает в себя измерение проводимости путем измерения удельной теплоемкости, температуропроводности и плотности.

Массовую теплоемкость измерял калориметр C80 Setaram [14]. Калориметр C80 является одним из самых универсальных калориметров в мире. Он использует принцип Кальве, который

позволяет работать в сканирующем и изотермическом температурном режиме в широком диапазоне температур, от комнатной до 300°C, и способен обнаруживать низкоэнергетические тепловые явления. Предназначен, в частности, для измерения теплоотдачи реакций и смесей.

Для сравнения теоретически и экспериментально полученных значений теплопроводности объектов исследования использована числовая модель.

Теплопроводность измерялась для двух образцов: Cu + 25%W и Cu + 50%W.

Первый этап измерений – измерение температуропроводности. В **табл. 5** представлены результаты измерений для двух образцов при комнатной температуре и температуре 150°C.

Таблица 5. Измерение температуропроводности
Table 5. Measurement of thermal conductivity

Композиция	Температура эксперимента, °C	Температуропроводность, $10^{-6}\text{м}^2/\text{с}$	Невязка, $10^{-6}\text{м}^2/\text{с}$
Cu+25%W	24	89,5	6,3
	150	85,3	6,0
Cu+50%W	24	85,1	6,0
	150	81,2	5,7

Явная температуропроводность чистой меди составляет $117 \cdot 10^{-6}\text{ м}^2/\text{с}$ [18].

Следующим этапом является измерение массовой теплоемкости образцов. В **табл. 6** представлены результаты измерений.

Таблица 6. Измерение массовой теплоемкости
Table 6. Mass thermal capacity measurement

Композиция	Максимальная температура энталпийного пика, °C	Массовая теплоемкость, Дж/кг·К	Невязка, Дж/кг·К
Cu+25%W	28,3	357	18
	149	375	19
Cu+50%W	28,3	325	16
	149	344	17

Явная массовая теплоемкость чистой меди составляет 385 Дж/кг·К при комнатной температуре [18].

С помощью значений плотности из **табл. 7** можно рассчитать теплопроводность образцов (**табл. 8**).

Таблица 7. Измерение плотности
Table 7. Density measurement

Композиция	Условия измерения		Объемная масса, кг/м ³
	T, °C	Относительная влажность, %	

Cu+25%W	21,4	38,5	9245
Cu+50%W	21,4	38,5	9956

Таблица 8. Теплопроводность
Table 8. Thermal conductivity

Композиция	T, °C	Средняя теплопроводность, Вт/м·К
Cu+25%W	26	295,2
	150	296,2
Cu+50%W	26	275,1
	150	278,4

По-видимому, объемная масса чистой меди составляет 8933 кг/м³ при комнатной температуре [18].

Тепловая проводимость чистой меди:

- $\lambda(300\text{ K}) = 401 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$;
- $\lambda(400\text{ K}) = 393 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$;
- $\lambda(600\text{ K}) = 379 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ [18].

Тепловая проводимость может быть рассчитана различными способами. Для этого было создано несколько математических моделей. Хасельман и Джонсон представили самую последнюю из них модель. [17]. Эта модель показывает, что ТП композита с непрерывной матрицей и добавлением объемных долей сферического армирующего материала выражается в виде

$$K_c = \frac{K_m [2 \left(\frac{K_p}{K_m} - \frac{K_p}{ah_c} - 1 \right) V_p + \frac{K_p}{K_m} + 2 \frac{K_p}{ah_c} + 2]}{\left(1 - \frac{K_p}{K_m} + \frac{K_p}{ah_c} \right) V_p + \frac{K_p}{K_m} + 2 \frac{K_p}{ah_c} + 2},$$

где K – теплопроводность, Вт/м·К; V – объемная доля армирующих частиц; коэффициенты c , m и p – композит, матрица и армирующий материал соответственно; a – радиус сферических армирующих частиц; h_c – термическая граничная проводимость.

При отсутствии межфазного термического сопротивления, т. е. когда $h_c = \infty$, идеальную теплопроводность можно получить по уравнению, и тогда это уравнение согласуется с выражением Maxwella [18]. В данной работе теплопроводность двух композитов, напыленных из порошков Cu + 25%W и Cu + 50%W с размером частиц вольфрама 12 мкм, оценивалась по уравнению при условии $h_c = \infty$. Концентрация вольфрама, принятая для расчета, составила 9 и 15% соответственно (концентрация вольфрама после процесса холодного напыления). При комнатной температуре теплопроводность вольфрама была выбрана равной 162,8 Вт/м·К. Медь рассматривается как матрица композитного напыления, а

его теплопроводность составляет 401 Вт/м·К (равна теплопроводности чистой меди). При 150°C медь также рассматривается как матричный материал в композитном напыленном с Cu + 50%W порошке, и имеет 393 Вт/м·К теплопроводности, а для вольфрама это 155,9 Вт/м·К теплопроводности. Замена этих данных в уравнении дает 375,55 и 368,06 Вт/м·К для композитов из порошка Cu + 25%W при комнатной температуре и при 150°C соответственно и для порошка Cu + 50%W теплопроводности 356,08 и 348,98 Вт/м·К при комнатной температуре и при 150°C соответственно.

Сравнение расчетных и экспериментально измеренных данных представлено в табл. 9.

Таблица 9. Сравнение между экспериментальными

данными и данными математической модели

Table 9. Comparison between experimental data

and mathematical model data

Композиция	Температура, °C	Экспериментальные данные, Вт/м·К	Данные математической модели, Вт/м·К
Cu + 25%W	Комнатная температура	295,2	375,55
	150	296,2	368,06
Cu + 50%W	Комнатная температура	275,1	356,08
	150	278,4	348,98

Эти значения выше, чем измеренные значения. Таким образом, влияние интенсивной пористости и окисления на границах зерен на теплопроводность композитов весьма очевидно.

Выводы

Из экспериментальных результатов видно, что максимальная концентрация вольфрама не превышает 48–50%.

Резкое снижение эффективности осаждения покрытия заметно после увеличения содержания вольфрама более чем на 10–15% от общего веса композиции. Это явление связано с высокой твердостью частиц вольфрама. Если твердая частица встречается с поверхностью, покрытой ранее прикрепленной твердой частицей, энергия удара недостаточно высока для скрепления и происходит отскок твердой частицы.

Содержание водорода в исходном медном порошке, являющееся причиной увеличения пористости после термической обработки образцов, уменьшает микротвердость с увеличением

температуры термической обработки.

С увеличением толщины покрытия пористость уменьшается за счет перекрытия пор последующими слоями металла, поэтому толщина покрытия должна быть такой, чтобы оно, как правило, было непористым или с минимальным количеством пор. Покрытие должно иметь сильную адгезию к основному металлу и не отслаиваться при механическом воздействии. Поэтому в зависимости от требований к покрытию необходимо выбрать наиболее оптимальную толщину покрытия.

Медь и сплавы на ее основе активно взаимодействуют с кислородом и водяными парами при повышенных температурах. В связи с этим при термической обработке изделий из меди и ее сплавов часто используются защитные атмосферы.

Во всех композициях после термообработки границы зерен становятся менее заметными, а на границах зерен появляется пористость. Воздух между медными частицами при высоких температурах оказывается под высоким давлением в межзеренном пространстве, что приводит к образованию пор. Появление этого явления в долгосрочной перспективе может привести к охрупчиванию покрытия и образованию в нем дефектов, приводящих к разрушению материала. Во избежание такого дефекта в особо ответственных изделиях необходимо контролировать содержание кислорода и других газов в исходном составе.

Значения, полученные с помощью числовой модели для расчета теплопроводности, превышают измеренные значения. Поэтому влияние интенсивной пористости и окисления на границах зерен на теплопроводность для композитов весьма очевидно.

Список литературы

- Холодное газодинамическое напыление. Теория и практика: монография / А.П. Алхимов, С.В. Клинков, В.Ф. Косарев, В.М. Фомин. Москва: Физматлит, 2009. 533 с.
- Robitaille F, Yandouzi M, Hind S, Jodoin B. Metallic coating of aerospace carbon/epoxy composites by the pulsed gas dynamic spraying process // Surf. Coat. Technol. 2009. № 203. С. 2954–2960.
- Lupo R, O'Neill W. Deposition of metallic coatings on polymer surfaces using cold spray // Surf. Coat. Technol. 2010. № 205. С. 2167–2173.
- Zweben C. Metal-matrix composites for electronic packaging // The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society. 1992. № 44–7. С. 15–23.
- Kang H-K, Kang S B Tungsten/copper composite deposits produced by a cold spray // Scripta Materialia 2003. № 49. С. 1169–1174.
- Kang S.B., Kang H.-K., Euh K. Processing and Micro-

- structures of Tungsten/Copper Composites Produced by Plasma Spray and Cold Spray // Materials Science Forum. 2005. №475–479. C. 945–948.
7. Dong L.L., Ahangarkani M., Chen W.G., Zhang Y.S. Recent progress in development of tungsten-copper composites: Fabrication, modification and applications // Int. J. of Refractory Metals and Hard Materials. 2018. №75. C. 30–42.
 8. 2012 Cold spray. A guide to best practice. Arbegast Materials Processing and Joining Lab: South Dakota School of Mines and Technology, United States.
 9. Hussain T., McCartney D.G., Shipway P.H., Zhang D. Bonding Mechanisms in Cold Spraying: The Contributions of Metallurgical and Mechanical Components // J. Therm. Spray Technol. 2009. №18 (3). C. 364–379.
 10. Huang R., Ma W., Fukanuma H. Development of ultra-strong adhesive strength coatings using cold spray // Surface and Coatings Technology. 2014. №258. C. 832–841.
 11. Sova A., Maestracci R., Jeandin M., Bertrand Ph., Smurov I. Kinetics of composite coating formation process in cold spray: Modelling and experimental validation // Surface and Coatings Technology. 2016.
 12. Goldstein J., Newbury D. Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis. Kluwer. 2003. 689 c.
 13. ISO 6507-1:2005. Металлические материалы. Измерение твердости по Виккерсу. Ч. 1. Метод измерения.
 14. Calvet Calorimeter C80. From ambient to 300°C by Setaram 2019 (SETARAM Instrumentation: www.setaram.com).
 15. Технология и оборудование сварки плавлением и термической резки / А.И. Акулов, В.П. Алексин, С.И. Ермаков и др. М.: Машиностроение, 2003. 560 с.
 16. Talbot D E J. Effects of Hydrogen in Aluminium, Magnesium, Copper, and Their Alloys // International Metallurgical Reviews. 1975. №20(1). C. 166–184.
 17. Manchang G., Suk B.K., Kwangjun E. Thermal conductivity of Al–SiCp composites by plasma spraying // Scripta Materialia. 2004. №52. C. 51–56.
 18. Incropera F.P., DeWitt D.P., Bergman T.L., Lavine A.S. 2011 Fundamentals of Heat and Mass Transfer. John Wiley & Sons. 1024 c.
 3. Lupoi R., O'Neill W. Deposition of metallic coatings on polymer surfaces using cold spray. Surf. Coat. Technol. 205, 2167–2173 (2010).
 4. Zweben C. Metal-matrix composites for electronic packaging. The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society, 44–7, 15–23 (1992).
 5. Kang H.-K., Kang S.B. Tungsten/copper composite deposits produced by a cold spray. Scripta Materialia, 49, 1169–1174 (2003).
 6. Kang S.B., Kang H.-K., Euh K. Processing and microstructures of tungsten/copper composites produced by plasma spray and cold spray. Materials Science Forum, 475–479, 945–948 (2005).
 7. Dong L.L., Ahangarkani M., Chen W.G., Zhang Y.S. Recent progress in development of tungsten-copper composites: Fabrication, modification and applications. Int. J. of Refractory Metals and Hard Materials, 75, 30–42 (2018).
 8. Cold spray. A guide to best practice. 2012, Arbegast Materials Processing and Joining Lab: South Dakota School of Mines and Technology, United States.
 9. Hussain T., McCartney D.G., Shipway P.H., Zhang D. Bonding mechanisms in cold spraying: the contributions of metallurgical and mechanical components. J. Therm. Spray Technol. 18 (3), 364–379 (2009).
 10. Huang R., Ma W., Fukanuma H. Development of ultra-strong adhesive strength coatings using cold spray. Surface and Coatings Technology, 258, 832–841 (2014).
 11. Sova A., Maestracci R., Jeandin M., Bertrand Ph., Smurov I. Kinetics of composite coating formation process in cold spray: Modelling and experimental validation. Surface and Coatings Technology (2016).
 12. Goldstein J., Newbury D. Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis. Kluwer, 2003, 689 p.
 13. ISO 6507-1:2005 Metallic materials. Vickers hardness test. Part 1: Test method.
 14. Calvet Calorimeter C80. From ambient to 300°C by Setaram 2019 (SETARAM Instrumentation, available at: www.setaram.com).
 15. Akulov A.I., Alekhin V.P., Ermakov S.I. et al. *Tekhnologiya i oborudovanie svarki plavleniem i termicheskoy rezki* [Technology and equipment for fusion welding and thermal cutting]. Moscow: Mashinostroenie, 2003, 560 p. (In Russ.)
 16. Talbot D.E.J. Effects of hydrogen in aluminium, magnesium, copper, and their alloys. International Metallurgical Reviews, 1975, no. 20(1), pp. 166–184.
 17. Manchang G., Suk B.K., Kwangjun E. Thermal conductivity of Al–SiCp composites by plasma spraying. Scripta Materialia, 52, 51–56 (2004).
 18. Incropera F.P., DeWitt D.P., Bergman T.L., Lavine A.S. Fundamentals of heat and mass transfer. John Wiley & Sons, 2011, 1024 p.

References

1. Alkhimov A.P., Klinkov S.V., Kosarev V.F., Fomin V.M. *Kholodnoe gazodinamicheskoe napylenie. Teoriya i praktika: Monografiya* [Cold gas-dynamic spraying. Theory and practice: monograph]. Moscow: Fizmatlit, 2009, 535 p. (In Russ.)
2. Robitaille F., Yandouzi M., Hind S., Jodoin B. Metallic coating of aerospace carbon/epoxy composites by the pulsed gas dynamic spraying process. Surf. Coat. Technol. 203, 2954–2960 (2009).

Поступила 18.05.2021; принята к публикации 02.06.2021; опубликована 28.06.2021
Submitted 18/05/2021; revised 02/06/2021; published 28/06/2021

Латфулина Юлия Сергеевна – научный сотрудник,
Южно-Уральский государственный университет (НИУ), Челябинск, Россия.
Email: latfulina174@gmail.com. ORCID 0000-0002-2128-3965

Дубенская Мария – доктор, профессор,
Национальная инженерная школа Сент-Этьена ENISE, Сент-Этьен, Франция.
Email: maria.doubenskaia@enise.fr

Самодурова Марина Николаевна – доктор технических наук, профессор,
Южно-Уральский государственный университет (НИУ), Челябинск, Россия.
Email: samodurovamn@susu.ru. ORCID 0000-0002-1505-1068

Трофимов Евгений Алексеевич – доктор технических наук, профессор,
Южно-Уральский государственный университет (НИУ), Челябинск, Россия.
Email: trofimovea@susu.ru. ORCID 0000-0001-8073-3244

Барков Леонид Андреевич – доктор технических наук, профессор,
Южно-Уральский государственный университет (НИУ), Челябинск, Россия.
Email: barkovla@susu.ru. ORCID 0000-0002-3384-5881

Yuliya S. Latfulina – Researcher,
South Ural State University (NRU), Chelyabinsk, Russia.
Email: latfulina174@gmail.com. ORCID 0000-0002-2128-3965

Maria Doubenskaia – Doctor, Professor,
National Engineering School of Saint-Etienne ENISE, Saint-Etienne, France.
Email: maria.doubenskaia@enise.fr.

Marina N. Samodurova – DrSc (Eng.), Professor,
South Ural State University (NRU), Chelyabinsk, Russia.
Email: samodurovamn@susu.ru. ORCID 0000-0002-1505-1068

Evgennii A. Trofimov – DrSc (Eng.), Professor,
South Ural State University (NRU), Chelyabinsk, Russia.
Email: trofimovea@susu.ru. ORCID 0000-0001-8073-3244

Leonid A. Barkov – DrSc (Eng.), Professor,
South Ural State University (NRU), Chelyabinsk, Russia.
Email: barkovla@susu.ru. ORCID 0000-0002-3384-5881

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

MATERIALS SCIENCE AND HEAT TREATMENT OF METALS

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

УДК 621.762

DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-2-50-57



ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ЖАРОСТОЙКОСТИ ОТ КОНЦЕНТРАЦИИ СТЕКЛЯННОГО НАПОЛНИТЕЛЯ В МЕТАЛЛОСТЕКЛЯННЫХ КОМПОЗИТАХ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ

Хлыбов А.А., Мальцев И.М., Беляев Е.С., Гетмановский Ю.А., Беляева С.С.

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

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Статья представляет собой исследовательскую экспериментальную работу, проведенную с целью получения композиционного антифрикционного материала, обладающего повышенной жаростойкостью. С этой целью был получен композиционный металлостеклянный материал на основе никеля. Как известно, при разработке порошковых композиционных антифрикционных материалов особое внимание уделяется повышению износостойкости. Однако множество узлов трения эксплуатируются при повышенной температуре на протяжении длительного периода времени. При разработке материала, работающего в подобных условиях, помимо износостойкости, необходимо учитывать длительное сопротивление повышенной температуре. **Используемые методы.** В ходе выполнения исследования, были использованы методы порошковой металлургии, включающие в себя: получение порошка боя тарного стекла (БТ-1); смешивание двухкомпонентной шихты, состоящей из порошка стекла и восстановленного порошка никеля (ПНК-УТ3); формование при помощи гидравлического пресса и последующее спекание в защитной восстановливающей атмосфере водорода. Для определения жаростойкости применялся весовой метод исследования при помощи аналитических весов. Для получения цифровых моделей зависимости жаростойкости от состава композиционного материала применялся комплекс математического анализа STATISTIKA 10. **Новизна.** Получение композиционного материала с повышенной жаростойкостью, в качестве матрицы которого использовался порошок никеля, а армирующим элементом выступал порошок боя тарного стекла. **Результат.** Была исследована и получена зависимость жаростойкости от химического состава композиционного материала и метода его изготовления. **Практическая значимость.** Заключается в разработке нового материала, обладающего повышенными эксплуатационными характеристиками, с возможностью последующего внедрения на производстве в качестве материала для изготовления подшипников скольжения.

Ключевые слова: жаростойкость, металлостеклянные материалы, антифрикционные материалы, износостойкость, порошковая металлургия, математический анализ.

© Хлыбов А.А., Мальцев И.М., Беляев Е.С., Гетмановский Ю.А., Беляева С.С., 2021

Для цитирования

Исследование зависимости жаростойкости от концентрации стеклянного наполнителя в металлостеклянных композитах на основе никеля / Хлыбов А.А., Мальцев И.М., Беляев Е.С., Гетмановский Ю.А., Беляева С.С. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №2. С. 50–57. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-2-50-57>



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

RESEARCH ON THE DEPENDENCE OF HEAT RESISTANCE ON THE CONCENTRATION OF A GLASS FILLER IN METAL-GLASS COMPOSITES BASED ON NICKEL

Khlybov A.A., Maltsev I.M., Belyaev E.S., Getmanovsky Yu.A., Belyaeva S.S.

Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. Statement of the problem (relevance of the research). This paper is experimental research carried out in order to produce a composite antifriction material with increased heat resistance. For this purpose, a composite nickel-based, metal-glass material was produced. As you know, when developing powder composite antifriction materials, a special attention is paid to increasing wear resistance. However, many friction units are operated at elevated temperatures for a long period of time. When developing a material that works in such conditions, in addition to wear resistance, it is necessary to take into account the long-term resistance to elevated temperature. **Methods applied.** In the course of the study, we used the methods of powder metallurgy, including production of powder of broken container glass (BT-1), a two-component mixture consisting of glass powder and reduced nickel powder (PNK-UT3), molding by means of a hydraulic press and subsequent sintering in a protective reducing atmosphere of hydrogen. To determine the heat resistance, we used a gravimetric research method, involving an analytical balance. To get digital models of the dependence of heat resistance on the composition of the composite material, we applied STATISTICA 10, a mathematical analysis package. **Novelty.** Producing a composite material with increased heat resistance, where nickel powder was used as a matrix and container glass powder was used as a reinforcing element. **Result.** We studied and determined the dependence of heat resistance on the chemical composition of the composite material and the method of production. **Practical significance.** Development of a new material with improved performance characteristics and a potential subsequent implementation in production as a material for manufacturing plain bearings.

Keywords: heat resistance, metal-glass materials, antifriction materials, wear resistance, powder metallurgy, mathematical analysis.

For citation

Khlybov A.A., Maltsev I.M., Belyaev E.S., Getmanovsky Yu.A., Belyaeva S.S. Research on the Dependence of Heat Resistance on the Concentration of a Glass Filler in Metal-Glass Composites Based on Nickel. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021, vol. 19, no. 2, pp. 50–57. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-2-50-57>

Введение

Одной из основных задач материаловедения на данный момент является повышение эксплуатационных характеристик деталей и узлов механизмов [1]. Это обусловлено повышением ресурсомкости и, следовательно, снижением стоимости обслуживания [2]. Но, к сожалению, при разработке материалов с повышением качества одного из параметров материала прочие параметры снижаются [3]. Решить такую проблему позволяет применение методов порошковой металлургии. С помощью этих методов можно получать строго гетерогенные материалы, способные объединить в одной композиции химические элементы с абсолютно разными свойствами (температура плавления, плотность) [4]. Одним из их представителей являются антифрикционные материалы, а именно металлостеклянные [5]. Имея высокую износостойкость, они могут обладать высокими значениями твердости [6].

Для получения материалов с заданными эксплуатационными свойствами наиболее широко

применяются методы порошковой металлургии (ПМ). ПМ позволяет создавать материалы, обладающие такими противоречивыми свойствами, как высокая твердость и пластичность [7]. ПМ вносит большой вклад в создание новых материалов, обладающих повышенными эксплуатационными свойствами. Повысить комплекс свойств порошковых материалов можно путем легирования неметаллическими включениями. Одним из таких включений является порошок стекла, введение которого позволяет добиться повышения износостойкости и твердости за счет возникновения новой фазы – фаялита (MeSiO_4) [8].

В настоящее время существует множество узлов трения, в которых применяются антифрикционные материалы – цилиндрические и шариковые подшипники, подпятники, вкладыши, направляющие, скользящие токосъемники, торцевые и боковые уплотнения, шарнирные устройства, поршневые кольца и др. Не менее разнообразны и условия их работы – со смазкой, при пограничном трении, трении без смазки, в вакууме, при повышенных температурах, высо-

ких скоростях, больших нагрузках, в воде и агрессивных средах, углекислом газе, инертных газах и др. Эти условия работы усложняются тем, что узлы трения могут работать как при одностороннем, так и при возвратно-поступательном движении. В частности, как известно, подшипники скольжения могут использоваться в узлах, подверженных воздействию высоких температур. На основании этого возникает вопрос, будут ли обладать металлокерамические материалы возможностью эксплуатации в таких условиях. Одним из критериев работы подшипников скольжения при повышенной температуре, как одним из представителей антифрикционных узлов, является жаростойкость. Это параметр, отвечающий за сопротивление материала окислению при длительных воздействиях температуры [9].

В первый период появления спеченные антифрикционные материалы рассматривались только в качестве заменителей таких традиционных материалов, как баббиты и бронзы. Решалась задача замены в массовом производстве подшипников из цветных дефицитных металлов менее дефицитными. Однако быстрое развитие машиностроения выдвинуло задачу создания новых антифрикционных материалов, обладающих повышенной износостойкостью, низким коэффициентом трения, способностью работать при высоких скоростях и больших нагрузках, а также в различных активных средах.

При разработке металлокерамических материалов особое внимание уделяется их износостойкости. В ряде работ [10–12] были проведены исследования коррозионной стойкости и ударной вязкости. К сожалению, проводимые исследования не затрагивали вопросы эксплуатации таких материалов при высоких температурах. Исследование жаростойкости проводилось в работе [13], где в роли матрицы композиционного материала выступала марганцевая сталь, а в качестве армирующего компонента – порошок боя тарного стекла.

Цель проводимого исследования заключается в определении жаростойкости антифрикционного металлокерамического материала на основе никеля.

Теория, материалы и методы исследования, технические и технологические разработки

Основными задачами в ходе эксперимента были:

1. Создание композиционного материала на основе никеля.

2. Проведение испытания на жаростойкость.
3. Анализ полученных данных.

В качестве матрицы композиционного материала выступал восстановленный порошок никеля ПНК-УТЗ, фракция которого составляет 20 мкм, этот порошок широко используется при изготовлении конструкционных материалов. В качестве армирующего элемента был использован порошок боя тарного стекла БТ-1 с фракцией 50 мкм, его состав приведен в табл. 1. Микроструктура порошка никеля и стекла представлена на рис. 1.

Таблица 1. Химический состав тарного стекла БТ-1
Table 1. Chemical composition of container glass BT-1

Группа стекла	Марка стекла	Содержание оксидов, % по массе				
		SiO ₂	Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	CaO+MgO	Na ₂ O	Sp ₃
Бесцветное	БТ-1	72	2,5	11	14	0,5

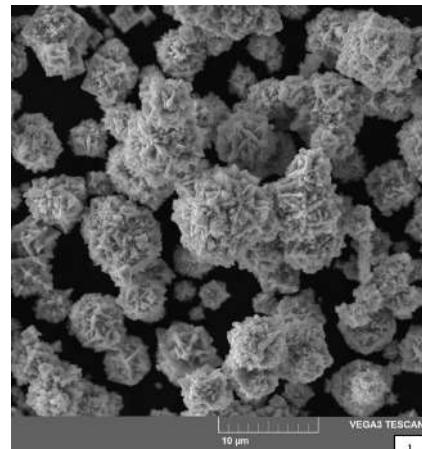


Рис. 1. Микроструктура порошков (РЭМ VEGA3 TESCAN): 1 – порошок ПНК-УТЗ;

2 – порошок боя тарного стекла БТ-1

Fig. 1. Microstructure of powders (SEM using TESCAN VEGA 3): 1 is powder PNK-UTZ; 2 is powder of broken container glass BT-1

Порошок боя тарного стекла был получен при помощи размоля стекла в планетарной мельнице и дальнейшего его разделения на фракции при помощи сит. Порошок фракции 50 мкм был выбран в качестве матрицы композиционного материала по причине того, что в его составе отсутствуют примеси иных фракций.

Методика изготовления композиционного материала включала в себя следующие этапы:

1. Холодное прессование при помощи гидравлического пресса, усилие холодного прессования составляло 281,5 МПа.

2. Спекание в защитной восстановительной атмосфере водорода при температуре 1000°C в течение 60 мин.

3. Холодная пластическая деформация на гидравлическом прессе с целью получения беспористого материала (пористость не более 4%).

В ходе эксперимента варьировалось содержание стеклянного наполнителя в композиционном материале. Содержание стекла составляло 15, 20, 25% от объема шихты. Эталонный образец представлен прессовкой из порошка ПНК-УТЗ без содержания стеклянного наполнителя.

Жаростойкость определялась весовым методом, скорость окисления определялась по привесу образца к единице площади, эксперименты

проводились в течение 8 ч, в интервале температур 900–1200°C. Для исключения грубых ошибок в эксперименте на каждом этапе испытания использовалось 5 образцов для получения одной экспериментальной точки. Все полученные результаты были подвергнуты статистической обработке при помощи программного пакета STATISTIKA 10. Полученные после обработки результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2. Масса привеса экспериментальных образцов после проведения испытания
Table 2. Weight gain of experimental samples after testing

Содержание стекла, % от объема шихты	Температура испытания, °C			
	900	1000	1100	1200
0 (эталон)	0,008	0,011	0,015	0,020
15	0,005	0,005	0,013	0,018
20	0,002	0,004	0,007	0,011
25	0,005	0,007	0,011	0,013

После проведения испытания были построены экспериментальные графики, представленные на рис. 2–5.

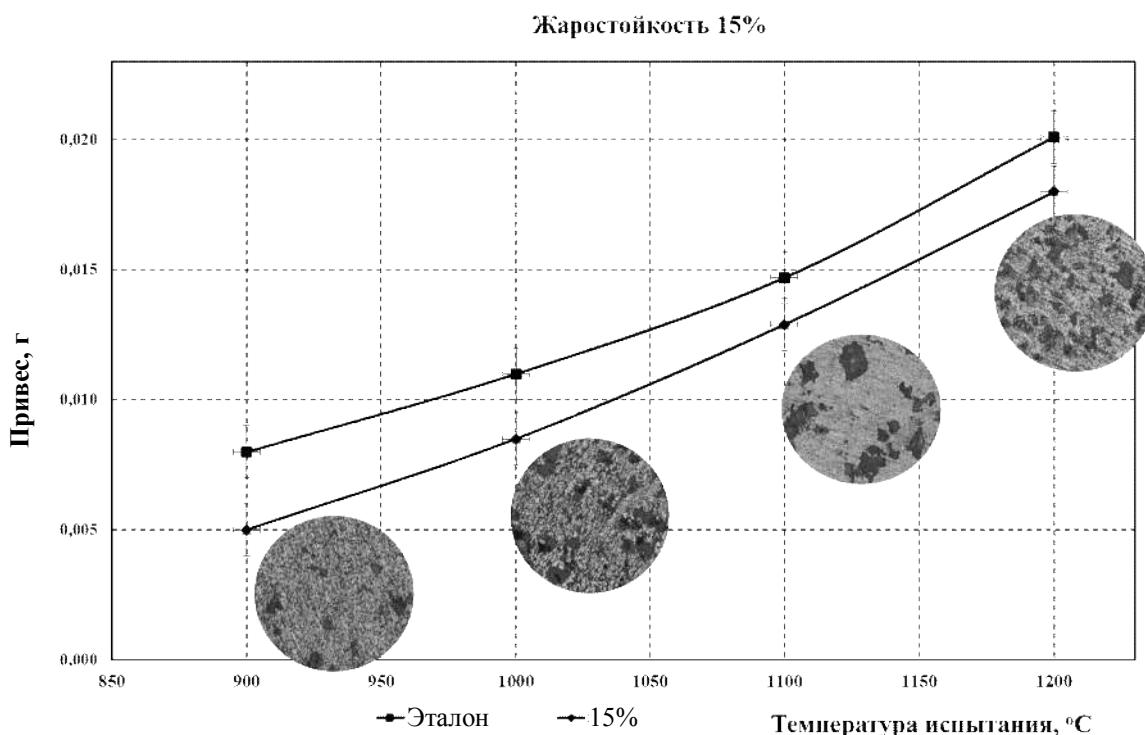


Рис. 2. График зависимости жаростойкости от температуры испытания для образца 15% и эталонного образца
Fig. 2. Heat resistance-test temperature dependence diagram for a sample of 15% and a reference sample

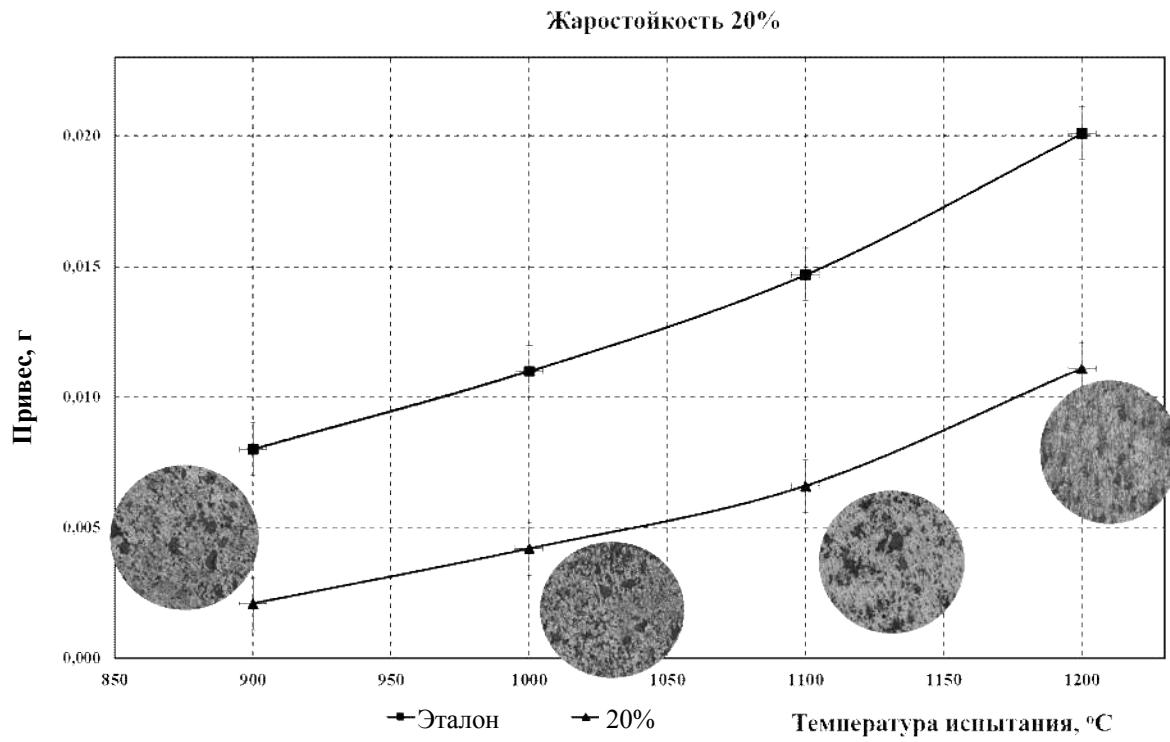


Рис. 3. График зависимости жаростойкости от температуры испытания для образца 20% и эталонного образца
Fig. 3. Heat resistance-test temperature dependence diagram for a sample of 20% and a reference sample

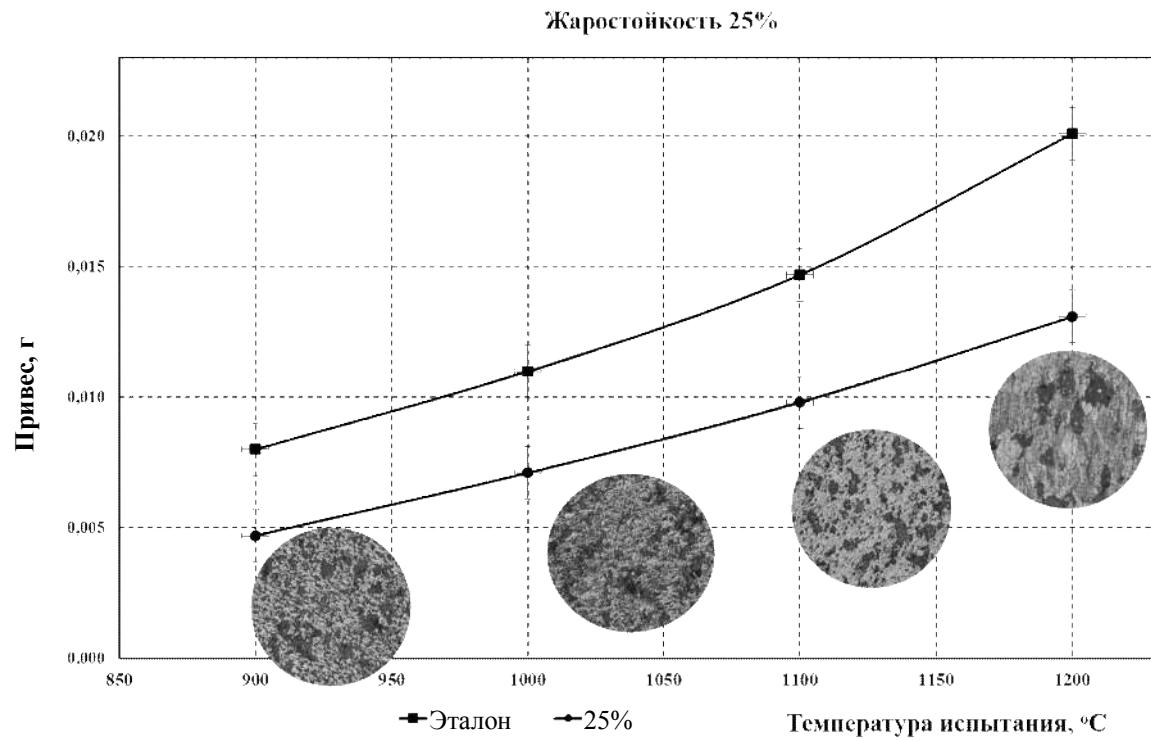


Рис. 4. График зависимости жаростойкости от температуры испытания для образца 25% и эталонного образца
Fig. 4. Heat resistance-test temperature dependence diagram for a sample of 25 % and a reference sample

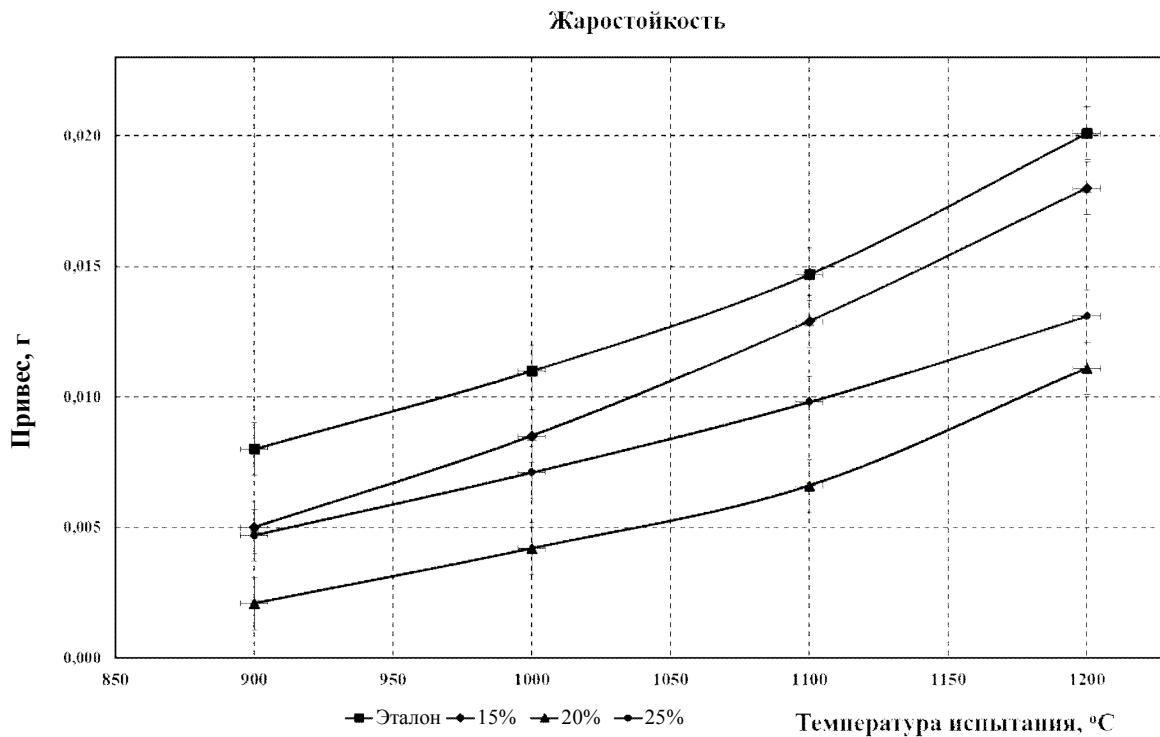


Рис. 5. График зависимости жаростойкости от температуры испытания для образцов с различным содержанием стекла

Fig. 5. Heat resistance-test temperature dependence diagram for samples with different glass content

Полученные результаты и их обсуждение

На основании полученных графиков были определены их математические функции [14]:

– для эталонного образца

$$f(x) = -937087 \cdot x^2 + 51124 \cdot x + 550,99;$$

– для образца с содержанием стекла 15%

$$f(x) = -487900 \cdot x^2 + 34179 \cdot x + 772,88;$$

– для образца с содержанием стекла 20%

$$f(x) = -574623 \cdot x^2 + 64854 \cdot x + 742,29;$$

– для образца с содержанием стекла 25%

$$f(x) = -383251 \cdot x^2 + 54176 \cdot x + 668,04,$$

где $f(x)$ – функция зависимости образовавшихся окислов; x – температура испытания.

На приведенных графиках видно, что до температуры 1000°C материал практически не окисляется. Это объясняется образованием на поверхности и в устье пор тонкой защитной окисной пленки из окислов никеля, железа и кремния. Окисление основы композита способствует образованию окисной пленки состава NiO. Следовательно, до 1000°C материал обладает длительной жаростойкостью.

Дальнейшее увеличение температуры приводит к интенсификации процессов окисления, особенно по границам спеченных металлических частиц, причем процесс окисления не затухает во времени. Образующиеся по границам частиц окислы вызывают разупрочнение на межфазных границах. На этом основании можно сделать вывод, что материал обладает недостаточной жаростойкостью в интервале температур 1100–1200°C.

Изменение механизма окисления объясняется наличием точек экстремума, определяемых из полученных уравнений.

Заключение

Таким образом, было выявлено, что жаростойкость изменяется в зависимости от концентрации стеклянного наполнителя. Жаростойкость возрастает с увеличением стеклянной фазы до 20%. При дальнейшем увеличении происходит снижение жаростойкости.

Список литературы

- Современные методы и технологии создания и обработка материалов: сб. науч. тр. В 3-х кн. Кн. 1. Материаловедение / гл. ред. А.В. Белый. Минск, 2018. 295 с.

2. Рудской А.И., Баурова Н.И. Технологическая наследственность при производстве и эксплуатации конструкционных материалов // Технология металлов. 2019. № 2. С. 2–10.
3. Мантуров Д.С. Методы повышения износостойкости металлополимерных и металлических трибосистем // Вестник РГУПС. 2020. № 2. С. 15–24.
4. Порошковая металлургия. Материалы, технология, свойства, области применения: справочник / Федорченко И.М., Францевич И.Н., Радомысельский И.Д. и др. Киев: Наук. думка, 1985. 624 с.
5. Власюк Р.З., Луговецкая Е.С., Радомысельский И.Д. Металлостеклянный материал // Порошковая металлургия. 1971. № 5. С. 657–660.
6. Беляев Е.С., Макаров Н.В., Гетмановский Ю.А. Влияние содержания углерода и стекла на твердость металлостеклянных материалов // Theoretical & Applied Science. 2017. № 01 (45). С. 160–166.
7. Бойцова В.В., Колобов М.Ю., Максимов А.С. Технология изготовления порошковых металлостеклянных железографитовых материалов // Надежность и долговечность машин и механизмов. 2018. С. 284–287.
8. Витязь П.А., Ильющенко А.Ф., Савич В.В. Порошковая металлургия и metallurgical additive technologies. Based on the proceedings of the European Congress of Powder Metallurgy Euro PM2017. Poroshkovaya metallurgiya: resp. mezhved. sb. nauch. tr. / red. kol.: Ильющенко А.Ф. [и др.]. Минск: Беларусская наука, 2017. Вып. 40. С. 5–14.
9. Гнедаш Е.Е., Акчурин Т.К., Стефаненко И.В. Состояние и перспективы развития технологий жаростойких композиционных материалов // Известия ВолгГТУ. 2018. №9 (219). С. 56–61.
10. Shinozaki A., Hirai H., Kagi H. et al. Reaction of forsterite with hydrogen molecules at high pressure and temperature. Phys Chem Minerals, 2012, 39, 123–129.
11. Liu X.F., Chen Y., Jiang M.Q., et al. Tuning plasticity of in-situ dendrite metallic glass composites via the dendrite-volume-fraction-dependent shear banding. Mater Sci Eng-A, 2017, 680, 121–1291.
12. Pang S.J., Zhang T., Asami K., Inoue A. Synthesis of Fe-Cr-Mo-C-B-P bulk metallic glasses with high corrosion resistance. Acta Mater. 2002, 50, 489–497.
13. Yan G., Yu W., Shengping S. Oxidation Protection of Enamel Coated Ni Based Superalloys: Microstructure and Interfacial Reaction. Corros. Sci., 2020, 173, 108760.
14. Блантер М.Е. Методика исследования металлов и обработки опытных данных. М.: Металлургиздат, 1952. 444 с.
2. Rudskoy A.I., Baurova N.I. Technological heredity in the production and operation of structural materials. *Tekhnologiya metallov* [Technology of metals], 2019, no. 2, pp. 2–10. (In Russ.)
3. Manturov D.S. Methods for increasing wear resistance of metal-polymer and metal tribosystems. *Vestnik RGUPS* [Vestnik of Rostov State Transport University], 2020, no. 2, pp. 15–24. (In Russ.)
4. Fedorchenko I.M., Frantsevich I.N., Radomyselsky I.D. et al. *Poroshkovaya metallurgiya. Materialy, tekhnologiya, svoystva, oblasti primeneniya: spravochnik* [Powder metallurgy. Materials, technology, properties and areas of application: Handbook]. Kiev: Nauk. Dumka, 1985, 624 p. (In Russ.)
5. Vlasyuk R.Z., Lugovetskaya E.S., Radomyselsky I.D. Metal-glass material. *Poroshkovaya metallurgiya* [Powder Metallurgy], 1971, no. 5, pp. 657–660. (In Russ.)
6. Belyaev E.S., Makarov N.V., Getmanovskiy Yu.A. Influence of carbon and glass content on the hardness of metal-glass materials. Theoretical & Applied Science, 2017, no. 01 (45), pp. 160–166. (In Russ.)
7. Boytsova V.V., Kolobov M.Yu., Maksimov A.S. Manufacturing technology of powder metal-glass iron-graphite materials. *Nadezhnost i dolgovechnost mashin i mehanizmov* [Reliability and Durability of Machines and Mechanisms], 2018, pp. 284–287. (In Russ.)
8. Vityaz P.A., Ilyushchenko A.F., Savich V.V. Powder metallurgy and metallurgical additive technologies. Based on the proceedings of the European Congress of Powder Metallurgy Euro PM2017. *Poroshkovaya metallurgiya: resp. mezhved. sb. nauch. tr.* [Powder metallurgy: the national collection of research papers. Edited by Ilyushchenko A.F. et al.]. Minsk: Belaruskaya Navuka, 2017, no. 40, pp. 5–14. (In Russ.)
9. Gneda E.E., Akchurin T.K., Stefanenko I.V. State and prospects of the development of technologies of heat-resistant composite materials. *Izvestiya VolgGTU* [Journal of Volgograd State Technical University], 2018, no. 9 (219), pp. 56–61. (In Russ.)
10. Shinozaki, A., Hirai, H., Kagi, H. et al. Reaction of forsterite with hydrogen molecules at high pressure and temperature. *Phys Chem Minerals*, 2012, 39, 123–129.
11. Liu X.F., Chen Y., Jiang M.Q., et al. Tuning plasticity of in-situ dendrite metallic glass composites via the dendrite-volume-fraction-dependent shear banding. *Mater Sci Eng-A*, 2017, 680, 121–1291.
12. Pang S.J., Zhang T., Asami K., Inoue A. Synthesis of Fe-Cr-Mo-C-B-P bulk metallic glasses with high corrosion resistance. *Acta Mater.* 2002, 50, 489–497.
13. Yan G., Yu W., Shengping S. Oxidation protection of enamel coated Ni based superalloys: Microstructure and interfacial reaction. *Corros. Sci.*, 2020, 173, 108760.
14. Blanter M.E. *Metodika issledovaniya metallov i obrabotki opytnykh dannykh* [Methods of research on metals and processing of experimental data]. Moscow: Metallurgizdat, 1952, 444 p. (In Russ.)

References

1. Bely A.V. Sovremennye metody i tekhnologii sozdaniya i obrabotki materialov: sb. nauch. tr. [Modern methods and technologies for producing and processing materials: collection of scientific papers]. Book 1, Materials Science. Minsk, 2018, 295 p. (In Russ.)

Поступила 25.03.2020; принята к публикации 28.04.2021; опубликована 28.06.2021
Submitted 25/03/2020; revised 28/04/2021; published 28/06/2021

Хлыбов Александр Анатольевич – доктор технических наук, профессор,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия
Email: hlybov_52@mail.ru. ORCID 0000-0002-6559-7819

Мальцев Илья Михайлович – кандидат технических наук, доцент,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.
Email: maltcev@nntu.ru. ORCID 0000-0002-3464-9372

Беляев Евгений Сергеевич – кандидат технических наук, доцент,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.
Email: yaneck@bk.ru. ORCID 0000-0001-6870-5558

Гетмановский Юрий Андреевич – аспирант, ассистент,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.
Email: getmanovskij@yandex.ru. ORCID 0000-0002-4338-3414

Беляева Сульгун Сбурновна – аспирант, ассистент,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.
Email: sulgun888@mail.ru. ORCID 0000-0001-9042-1404

Alexander A. Khlybov – DrSc (Eng.), Professor,
Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia
Email: hlybov_52@mail.ru. ORCID 0000-0002-6559-7819

Ilya M. Maltsev – PhD (Eng.), Associate Professor,
Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia
Email: maltcev@nntu.ru. ORCID 0000-0002-3464-9372

Evgeniy S. Belyaev – PhD (Eng.), Associate Professor,
Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia
Email: yaneck@bk.ru. ORCID 0000-0001-6870-5558

Yuri A. Getmanovskiy – postgraduate student, teaching assistant,
Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia
Email: getmanovskij@yandex.ru. ORCID 0000-0002-4338-3414

Sulgun S. Belyaeva – postgraduate student, teaching assistant,
Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia
Email: sulgun888@mail.ru. ORCID 0000-0001-9042-1404

НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

NANOMATERIALS AND NANOTECHNOLOGIES

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

УДК 620.3

DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-2-58-67



МНОГОСТУПЕНЧАТАЯ МЕХАНОАКТИВАЦИЯ МУНТ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ПЕРКОЛЯЦИОННЫХ ПЕРЕХОДОВ В СИСТЕМЕ ЭЛАСТОМЕР/МУНТ: ПОДХОДЫ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ И ПРАКТИКА МОДИФИКАЦИИ ЭЛАСТОМЕРОВ

Щегольков А.В.

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия

Аннотация. В настоящей работе установлено влияние многоступенчатой механоактивации многослойных углеродных нанотрубок (МУНТ) на равномерность распределения температурного поля на поверхности наномодифицированного кремнийорганического эластомера. Описана методика предварительной обработки МУНТ перед механоактивацией с целью получения однородного дисперсного состава в результате удаления примесных электропроводящих частиц и уменьшения примесной проводимости. Выявлено влияние каждой из стадий механоактивации на параметры МУНТ. При этом на первой стадии механоактивации МУНТ распределяется в объеме, образуется однородная дисперсная система, что оказывает влияние на эффективность второй основной стадии, вследствие того, что эта стадия влияет на активность МУНТ при взаимодействии с матрицей эластомера, в частности на межфазный контакт между МУНТ и полимерной матрицей. Вторая стадия обеспечивает уменьшение спутанности МУНТ, образованных в отдельные пучки, и повышает эффективность тепловыделений, делая его однородным и равномерным с максимальной температурой, в пике которой достигает 57,1°C. Исследовано распределение температурного поля в центробежном лопастном смесителе «WF-20B» для перемешивания МУНТ с графитом, которое показывает, что кроме механического действия на МУНТ имеется и тепловое воздействие, связанное с переходом механической энергии трения бинарной смеси МУНТ/графит о лопасть и стенки емкости, при этом температура может достигать значения 104,6°C. Исследованы прочностные характеристики наномодифицированных клеевых композитов на основе полиуретанового эластомера, в результате было выявлено, что механоактивация приводит к улучшению прочности до значения 2,75±5% МПа. Определена наилучшая концентрация бинарной смеси МУНТ/графит в матрице эластомера, равная 3%.

Ключевые слова: перколяция, многослойные углеродные нанотрубки, механоактивация, тепловыделения, модификация, эластомеры.

© Щегольков А.В., 2021

Для цитирования

Щегольков А.В. Многоступенчатая механоактивация МУНТ для улучшения перколяционных переходов в системе эластомер/МУНТ: подходы для реализации и практика модификации эластомеров // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №2. С. 58–67. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-2-58-67>



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

MULTISTAGE MECHANICAL ACTIVATION OF MWCNTS TO IMPROVE PERCOLATION TRANSITIONS IN THE ELASTOMER / MWCNTS SYSTEM: APPROACHES TO THE IMPLEMENTATION AND PRACTICE OF MODIFYING ELASTOMERS

Shchegolkov A.V.

Tambov State Technical University, Tambov, Russia

Abstract. This paper identifies the effect of multistage mechanical activation of multi-wall carbon nanotubes (MWCNTs) on the uniformity of the temperature field distribution on the surface of a nanomodified organosilicon elastomer. It describes an MWCNT preliminary treatment procedure before mechanical activation in order to create a homogeneous dispersed composition by removing impurity electrically conductive particles and decreasing impurity conductivity. The author found out the influence of each of the mechanical activation stages on the parameters of MWCNTs. At the first stage of mechanical activation, MWCNTs are distributed in the volume, and a homogeneous dispersed system is formed, influencing efficiency of the second main stage due to the fact that this stage has an effect on the activity of MWCNTs, when interacting with the elastomer matrix, in particular on an interfacial contact between MWCNTs and the polymer matrix. The second stage decreases in the entanglement of MWCNTs formed into separate beams and increases the efficiency of heat release, making it homogeneous and uniform with a maximum temperature, reaching a peak value of 57.1°C. The paper contains studies on a distribution of the temperature field in WF-20B, a centrifugal paddle mixer for mixing MWCNT with graphite, showing that in addition to the mechanical action on MWCNTs, there is also a thermal effect associated with the transition of mechanical friction energy of the binary mixture MWCNTs/graphite on the paddle and walls of the container, while the temperature can reach 104.6°C. The paper also includes studies on the strength characteristics of nanomodified adhesive composites based on polyurethane elastomer; as a result, it was identified that mechanical activation leads to an improvement in strength up to a value of $2.75 \pm 5\%$ MPa. The best concentration of the binary mixture MWCNTs/graphite in the elastomer matrix is 3%.

Keywords: percolation, multi-wall carbon nanotubes, mechanical activation, heat release, modification, elastomers.

For citation

Shchegolkov A.V. Multistage Mechanical Activation of MWCNTS to Improve Percolation Transitions in the Elastomer / MWCNTS System: Approaches to the Implementation and Practice of Modifying Elastomers. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021, vol. 19, no. 2, pp. 58–67. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-2-58-67>

Введение

В современном материаловедении важную роль играют наноматериалы, которые используют при создании композитов в качестве электронагревательных элементов для различных систем электронагрева [1], обладающие свойствами саморегулирования температуры, при этом они могут использоваться без дополнительных систем терморегулирования [2–4]. Практическую значимость нагреватели с эффектом саморегулирования находят при создании антиобледенительных систем [5]. Значительной проблемой получения нанокомпозитов является равномерное распределение наноматериала в полимерной матрице МУНТ, которые могут аггрегироваться из-за сильного взаимодействия между отдельными нанотрубками (взаимодействие Ван-дер-Ваальса) [6]. Решение задач, связанных с аггрегацией МУНТ, основано на способах и технологических подходах как предварительной обработки МУНТ перед внесением в полимер-

ную матрицу, так и в специальных режимах распределения в полимерной матрице [7, 8]. Значение переколяционного порога и максимальной удельной проводимости сильно коррелируется с условиями получения композита, а также методами обработки, а именно модификацией, функционализацией и механоактивацией МУНТ. Целевое назначение процесса многоступенчатой механоактивации МУНТ направлено на разбиение агломератов, т.е. уменьшение спутанности МУНТ, которая образуется между отдельными углеродными нанотрубками, и повышение химической активности поверхности, а также перемешивание с различными дисперсными материалами.

Для распределения МУНТ в полимерной матрице в большинстве случаев используется механическое перемешивание [9]. Изменение порогов переколяции (протекания) нанокомпозитов в диапазоне 0,1 до 1,0 мас.% зависит от аспектного соотношения сторон МУНТ, а также степени дефектности МУНТ [10]. Функционали-

зация повышает активность МУНТ и улучшает адгезионные свойства нанокомпозитов, в частности электропроводящих эластомеров или клеевых составов на их основе. Широкое распространение получила экзоэдимальная функционализация, связанная с образованием ковалентных и нековалентных химических связей на поверхностном графеновом слое МУНТ [11]. В работе [11] предложен метод функционализации МУНТ с помощью обработки ультразвуком и окислением с тремя окислителями: концентрированной серной кислотой, перманганатом калия и перекисью водорода.

В случае механоактивации могут изменяться морфологические характеристики МУНТ, происходит изменение насыпной плотности порошка МУНТ, изменяется значение удельной поверхности и аспектное отношение МУНТ. Морфология углеродныхnanoструктур кроме того факта, что оказывает влияние на порог переколяции электропроводности, т.е. формирование электропроводящих сетей, существенно влияет на тепловыделения при протекании электрического тока через наномодифицированный эластомер [12]. При разработке электропроводящих нанокомпозитов необходимо учитывать все факторы, которые могут повлиять на формирование электропроводящих сетей, так как проводимость связана, как минимум, с тремя механизмами: туннелированием, прыжковой проводимостью и механизмом активированных диэлектрических потерь [13].

Стоит учитывать особенность МУНТ, синтезированных методом CVD, – это широкая вариабельность порошка МУНТ по физико-механическим характеристикам при сохранении идентичности морфологических свойств отдельных МУНТ. Этот фактор может оказаться влияние на свойства механоактивированных МУНТ. В процессе синтеза МУНТ даже на одном и том же катализаторе могут получаться различные по характеристикам углеродные нанотрубки [14], что связано с формированием системы агломератов с разными размерами и механизмами связи между отдельными МУНТ в рамках агломерата.

На практике при создании электропроводящих композитов важное значение уделяется способу обработки электропроводящих дисперсных материалов, что связано с необходимостью уменьшения порога переколяции φ_c и повышения значения максимальной электропроводности σ_{max} [15–18]. Одним из подходов, который может оказаться влияние на порог переколяции, может быть механоактивация дисперсного наполнителя [17, 18]. Однако влияние на переколяцию поли-

меров механоактивации изучено в меньшей степени, в особенности это касается МУНТ.

Механоактивация может привести к изменению аспектного отношения, степени дефектности и разбиения или выравнивания агломератов в МУНТ [17]. При этом механоактивация позволяет создать некомпенсированные химические связи или свободные радикалы с запасом «избыточной» энергии [15].

Основная цель работы связана с установлением влияния многоступенчатой механоактивации на порог переколяции электропроводящего композита МУНТ/эластомер на основе кремнийорганических и полиуретановых эластомеров, а также исследования тепловыделений в наномодифицированных эластомерах при протекании электрического тока.

Для реализации поставленной цели решались следующие задачи:

- разработка методики получения электропроводящих композитов на основе кремнийорганических и полиуретановых эластомеров, модифицированных механоактивированными МУНТ;

- установление влияния многоступенчатой механоактивации на однородность распределения МУНТ в полимерной матрице;

- исследование распределения температурного поля в емкостном аппарате с высокоскоростной ротационно-лопастной мешалкой для перемешивания МУНТ с графитом;

- исследование температурных полей на поверхности электропроводящего полимера/МУНТ после механоактивации и сравнение с исходными образцами.

Методы и материалы

В качестве материалов был использован МУНТ Таунит-М (г. Тамбов, ООО НаноТех-Центр), графит и кремнийорганический компаунд «Силагерм 8030» (ООО «Элемент 14», Москва, Россия).

Методика измерения удельного объемного сопротивления. Удельное объемное сопротивление измеряли по двухпроводной схеме на постоянном токе с помощью тераомметра «Е6-13А» по ГОСТ Р 50499-93. Лабораторный автотрансформатор «Ресанта ЛАТР TDGC2-1» (Москва, Россия) был использован в качестве регулируемого источника питания, на выходе которого был установлен диодный мост КВРС 5010 (Китай), параллельно подключен конденсатор СД60 (Sai-Fu, Китай) для выпрямления полуволны электрического напряжения.

Сравнительный анализ результатов измерения удельной объемной электропроводности можно провести на основании уравнения переколяции электропроводности, или протекания, предложенного в работе [19]:

$$\sigma = \sigma_c + (\sigma_m - \sigma_c) \left(\frac{\phi - \phi_c}{F - \phi_c} \right)^t, \quad (1)$$

где σ – удельная объемная электропроводность наномодифицированного эластомера, См/см; σ_m – удельная объемная электропроводность эластомера при максимальном массовом содержании МУНТ, См/см; σ_c – удельная объемная электропроводность композита на пороге переколяции, См/см; ϕ – объемная доля МУНТ; ϕ_c – объемная доля МУНТ на пороге переколяции; F – коэффициент упаковки МУНТ; t – критический показатель степени.

Коэффициент упаковки МУНТ:

$$F = \frac{m}{V \cdot \rho}, \quad (2)$$

где m – масса МУНТ, кг; V – объем МУНТ, м³; ρ – плотность МУНТ, кг/м³.

Методика исследований параметров МУНТ и тепловыделений эластомеров. Исследование распределения температурных полей проводили с использованием тепловизоров «Fluk Ti9» (США) и «Testo-875-1» (Германия). Удельную поверхность МУНТ определяли методом БЭТ по адсорбции азота на анализаторе QuantachromeNova 1200e.

Геометрические параметры и особенности структуры МУНТ определяли на основе СЭМ-изображений, полученных на двухлучевом сканирующем электронном комплексе MIRAZ TESCAM (Чехия).

Методика подготовки МУНТ перед меха-ноактивацией. Перед меха-ноактивацией навеску МУНТ добавляли в 4 М H₂SO₄ (рис. 1) с целью уменьшения влияния примесной электропроводности.

После удаления примесей, которые были образованы после синтеза МУНТ (остатки катализатора), полученный наноматериал тщательно промывали в дистиллированной воде в течение трёх повторений для удаления продуктов реакции. Затем МУНТ сушили в вакуумном термошкафу при температуре 100°C для удаления влаги.

В процессе высушивания масса МУНТ снижается в среднем на 5%.

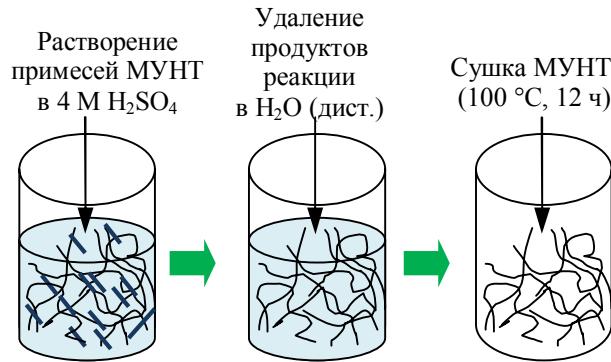


Рис. 1. Стадии очистки МУНТ от электропроводящих примесей

Fig. 1. Stages of removing electrically conductive impurities from MWCNT

Методика меха-ноактивации МУНТ. Для реализации первой подготовительной стадии, в которой происходило перемешивание МУНТ с дисперсным наполнителем – графитом, предложено использовать центробежный лопастной смеситель с быстро вращающимся рабочим органом, переворачивающим сыпучий материал в псевдоожиженное состояние «WF-20B» (YUEYUEHONG, Чжэцзян, Китай), как представлено на рис. 2. Электрический привод прямого типа, установленный на лопастной смеситель, обеспечивает частоту вращения лопастей на уровне 25000 об/мин.



Рис. 2. Центробежный лопастной смеситель «WF-20B»

Fig. 2. Centrifugal paddle mixer WF-20B

С учетом того, что частота вращения не регулируется, выбран режим перемешивания циклического типа (ступенчатый), при котором имеется время обработки и паузы. Общее время обработки может быть от нескольких секунд до 1 часа (с учетом пауз, связанных с остывлением установки). Время пауз между обработкой связано с необходимостью остыивания элементов лопастной мешалки, так как теплота от нагретых

лопастей и емкости передается элементам привода и непосредственно электрическому двигателю, который может перегреться и выйти из строя. Таким образом, выбран режим: 10 мин с 5-минутными перерывами после каждого 20–30 с вращения лопастей.

На первой стадии механоактивации можно перераспределить МУНТ в объеме и гомогенизировать многокомпонентную дисперсную систему, что оказывает влияние на эффективность второй – основной стадии (**рис. 3**), так как именно эта стадия влияет на активность МУНТ при взаимодействии с матрицей эластомера, в частности на межфазный контакт между МУНТ и полимерной матрицей.

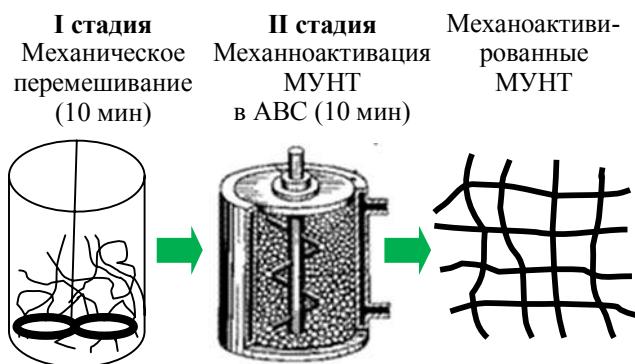


Рис. 3. Двухстадийная механоактивация МУНТ
Fig. 3. Two-stage mechanical activation of MWCNT

Вторая стадия обеспечивает уменьшение размеров МУНТ и повышает эффективность тепловыделений, делая тепловыделения равномерными с более высокой температурой.

Первая стадия не позволяет в полной мере реализовать все возможности механоактивации, в то же время в рамках этой стадии возможно перемешивание разнородных сыпучих компонентов.

На второй стадии механоактивации МУНТ использован аппарат АВС (**рис. 4**), механическое воздействие которого осуществляется благодаря перемещению тел помола (цилиндрической формы) в переменном электромагнитном поле частотой до 1 Тл. Время механоактивации второй стадии 10 с. Электрический нагреватель изготавливается в соответствии с концепцией, изложенной в работе [16].

Смесь МУНТ с графитом вводится с помощью механического перемешивания и добавления 1% ПАВ (ОП-7) по массе модифицируемых эластомеров.



Рис. 4. Установка для механоактивации МУНТ:
1 – рабочий орган; 2 – блок управления

Fig. 4. The machine for mechanical activation of MWCNT: 1 is a working body; 2 is a control unit

Методика приготовления наномодифицированного силиконового компаунда. Механоактивированные МУНТ вносили в кремнийорганический компаунд («Силагерм 8030»). После добавления полученный состав перемешивали в механической мешалке в течение 5 мин. В емкость объемом 100 мл заливали силиконовый компаунд (**рис. 5**), сначала компонент А, затем постепенно перемешивая, засыпали МУНТ. Далее проводили смешивание на механическом смесителе «WiseStir HT 120DX» и перемешивали при 500–1000 об/мин в течение 5 мин. В полученную смесь добавляли 10 г отвердителя – компонент Б и перемешивали, используя тот же алгоритм смешивания, как и в первом случае [21].

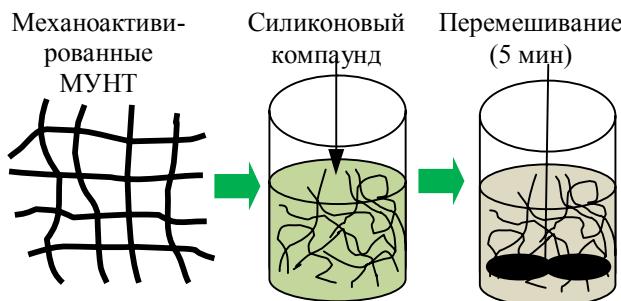


Рис. 5. Стадии подготовки МУНТ перед модификацией полимера

Fig. 5. Stages of MWCNT preparation before polymer modification

Результаты исследования и обсуждение

Исследование температурного режима лопастной мешалки (**рис. 6**) показывает, что в ней происходит разогрев как самой лопасти до 104,6°C, так и внутренних стенок емкости до 100°C (**рис. 6, а и б**) за счет трения МУНТ о внутренние элементы емкости при высокоскоростном перемешивании. МУНТ с графитом также нагреваются до 103,9°C.

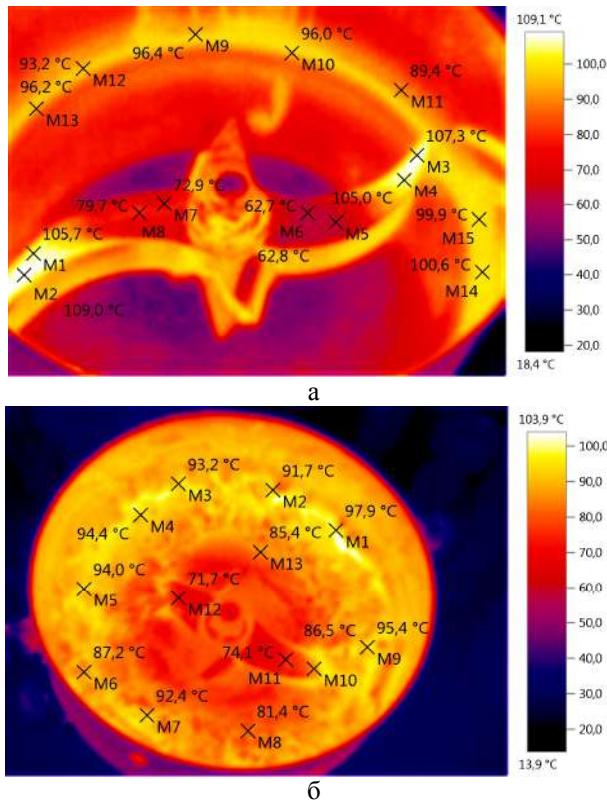


Рис. 6. Термовое поле: а – без материала; б – с материалом

Fig. 6. A thermal field a is without a material; b is with a material

В рамках первой стадии имеются отдельные подстадии, которые связаны с необходимостью остыивания высокоскоростной ротационной лопастной мешалки. В табл. 1 представлены характеристики и удельной поверхности, и насыпной плотности.

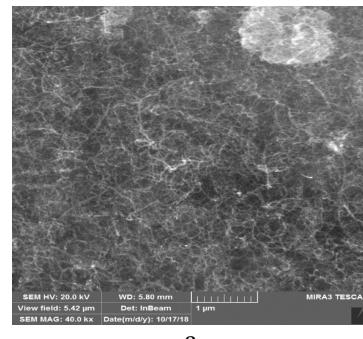
Таблица 1. Удельная поверхность и насыпная плотность МУНТ

Table 1. Specific surface area and bulk density of MWCNT

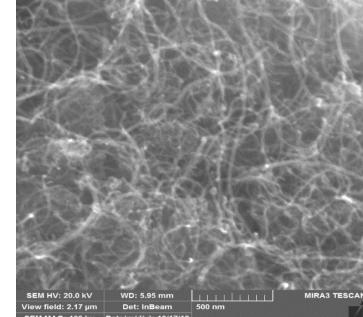
№ п/п	МУНТ – Таунит М	Удельная поверхность, м ² /г	Насыпная плотность, кг/м ³
1	МУНТ-1	328,1	46,1
2	МУНТ-2 (1-я стадия)	334	40
3	МУНТ-3 (2-я стадия)	215,5	370,4

Исходя из данных табл. 1, результаты замеров удельной поверхности и насыпной плотности МУНТ для исходных МУНТ и механоактивированных на первой стадии отличаются в рамках статической погрешности измерения. При этом вторая стадия в АВС обеспечивает увеличение насыпной плотности с 46,1 до 370,4 кг/м³,

что связано с высокоэнергетическим механическим воздействием и интенсивным механическим перемалыванием МУНТ. Снижение удельной поверхности также связано с эффектом перемалывания. На рис. 7 представлен СЭМ МУНТ после двухстадийной обработки при разрешении 1 мкм и 500 нм.



а



б

Рис. 7. СЭМ-изображения МУНТ: а – 1 мкм; б – 500 нм

Fig. 7. SEM images of MWCNTs: a is 1 μm; b is 500 nm

Перемешивание МУНТ с графитом происходит на первой стадии механоактивации.

При анализе структурных особенностей распределения МУНТ/графит в эластомере может использоваться теория перколяции [19, 21]. В табл. 2 приведены параметры уравнения перколяции (1).

Таблица 2. Параметры уравнения перколяции наномодифицированных эластомеров

Table 2. Parameters of the percolation equation for nanomodified elastomers

Композит	σ_c	σ_m	φ_c	F	t
Э-1 (МУНТ-1)	$0,5 \cdot 10^{-3}$	4,2	0,5	0,3	2,1
Э-2 (МУНТ-2)	$0,7 \cdot 10^{-3}$	5,1	0,52	0,4	2
Э-3 (МУНТ-3)	$3,5 \cdot 10^{-2}$	7,2	0,5	0,7	2,8

Анализ данных (см. табл. 2) показывает, что эластомеры Э-1 и Э-2 обладают схожими значе-

ниями удельного объемного сопротивления в рамках погрешности измерения, при этом для Э-3 наблюдается снижение удельного объемного сопротивления на один порядок. Это связано с тем, что электрическое сопротивление R_{tot} переколяционной сети, образуемой нанотрубками, полностью определяется сопротивлением нанотрубок R_t , сопротивлением контактов R_c и числом контактов n_c [20]:

$$R_{tot} = R_t + n_c R_c. \quad (3)$$

В случае Э-3 наблюдается снижение контактного сопротивления за счет рассредоточения МУНТ с образованием уменьшенного сопротив-

ления, что может быть результатом улучшения смачиваемости и снижения доли микролокаций, заполненных воздухом, а также снижения эффекта «блуждающих токов», которые могут закольцовываться в агломератах МУНТ ввиду протекания по элементам с меньшим электрическим сопротивлением.

По данным, представленным на рис. 8, а, следует, что для образца, в который вводится МУНТ с графитом, полученным ручным перемешиванием, характерно неравномерное распределение температурного поля с локациями, которые нагреваются до 32,6°C, и локациями, которые не нагреваются, имея температуру от 23 до 25°C.

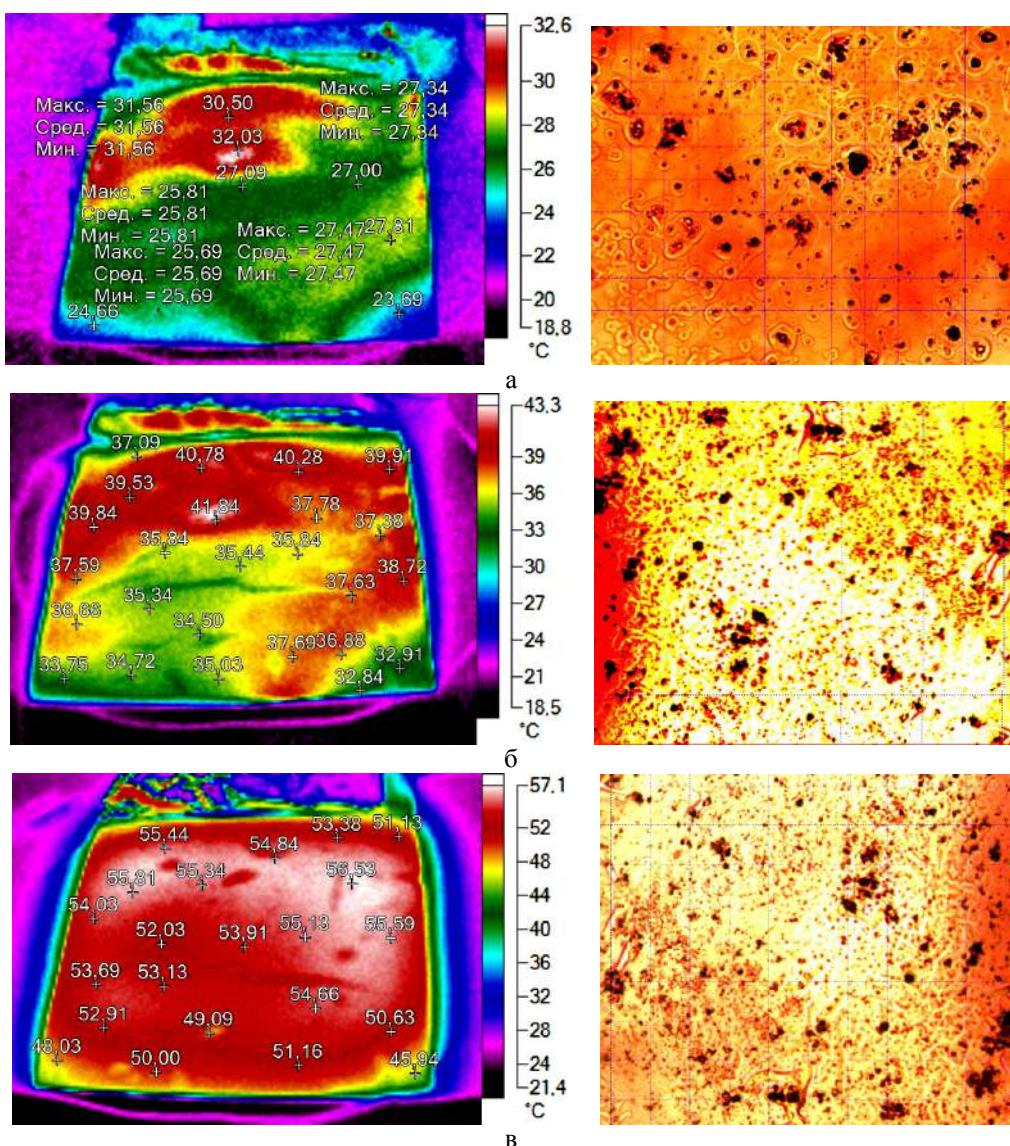


Рис. 8. Термовизионный снимок: а – эластомер с МУНТ и графитом; б – эластомер с МУНТ и графитом, 1-я стадия механоактивации; в – эластомер с МУНТ и графитом, 2-я стадия механоактивации

Fig. 8. Thermal image: a is the elastomer with MCNT and graphite; b is the elastomer with MCNT and graphite at the 1st stage of mechanical activation; в is the elastomer with MWNT and graphite at the 2nd stage of mechanical activation

После первой ступени механоактивации (высокоскоростное перемешивание), как показано на рис. 8, б, для которой характерно в основном смешение МУНТ с графитом, происходит перераспределение как разнородных агломератов, так и отдельных МУНТ и лучшее перемешивание с графитом по сравнению с ручным способом. Пиковая температура 43,6°C. Неравномерность температурного поля сохраняется.

На рис. 8, в показано распределение температурного поля после второй – основной стадии механоактивации при напряжении питания 100 В. Для этой стадии характерно более равномерное распределение температурного поля и повышение температурного режима в пике до 57,1°C. В этой стадии механоактивации происходят структурные изменения в МУНТ и практически полностью разбиваются крупные агломераты.

В табл. 3 представлено исследование прочности клеевого соединения с МУНТ.

Таблица 3. Прочность клеевого соединения
Table 3. Adhesive bond strength

Концентрация МУНТ (масс.%)	Прочность клеевого соединения, МПа		
	Механоактивированный, 2-я стадия МУНТ/графит	Механоактивированный, 1-я стадия МУНТ/графит	Ручное перемешивание МУНТ Таунит-М/графит
0	$0,85 \pm 5\%$		
1	$1,2 \pm 5\%$	$0,85 \pm 5\%$	$0,85 \pm 5\%$
3	$2,75 \pm 5\%$	$1,15 \pm 5\%$	$1,1 \pm 5\%$
6	$1,9 \pm 5\%$	$0,7 \pm 5\%$	$0,5 \pm 5\%$

Двухступенчатая механоактивация улучшает параметры клеевого соединения за счет уменьшения размеров агломератов и более равномерного распределения МУНТ в матрице полимерного клеевого композита, а также за счет повышения смачиваемости МУНТ в матрице эластомера.

Проведенные исследования позволили уточнить вопросы, связанные с влиянием многоступенчатой механоактивации на свойства эластомеров, модифицированных бинарной смесью МУНТ/графит. Полученные результаты позволяют расширить понимание влияния принципов механоактивации на МУНТ, заложенных в работах [17, 18], с учетом такого компонента, как графит, и применения высокоскоростного перемешивания. При этом одним из дополнительных факторов улучшения свойств МУНТ при механоактивации может являться следствие гомогенного смешения МУНТ с такими материалами, как графит, что позволяет увеличить их электри-

ческую проводимость и приведет к росту удельной объемной и поверхностной электропроводимости эластомера.

Необходимо учесть возможность объединения процесса механоактивации и последующей функционализации ПАВ, что позволит предотвратить агломерирование в полимерной матрице.

Заключение

Разработана методика получения электропроводящих композитов на основе кремнийорганических эластомеров, модифицированных механоактивированными МУНТ с добавлением графита на первой стадии механоактивации, обоснована многостадийная механоактивация с двумя основными стадиями – высокоскоростным перемешиванием (25000 об/мин) и механоактивированием в аппарате вихревого слоя, а также вспомогательными стадиями, связанными с необходимостью остыния емкостного роторного смесителя. Как первая, так и вторая стадия механоактивации сопровождаются тепловым воздействием на МУНТ. Нагрев лопастей и емкости, в которой располагается МУНТ, при высокоскоростном перемешивании носит неравномерный характер и может вызвать перегрев отдельных элементов установки механоактивации.

Установлено влияние многоступенчатой механоактивации МУНТ на равномерность распределения температурного поля на поверхности наномодифицированного кремнийорганического эластомера, выявлено влияние каждой из стадий на параметры МУНТ. Для второй стадии механоактивации характерно более равномерное распределение температурного поля и повышение температурного режима в пике до 57,1°C при питающем напряжении 100 В.

Исследовано распределение температурного поля в центробежном лопастном смесителе «WF-20B» для перемешивания МУНТ с графитом, которое показывает, что кроме механического действия на МУНТ имеется и тепловое воздействие, связанное с переходом механической энергии трения бинарной смеси МУНТ/графит о лопасть и стенки емкости, при этом температура может достигать значения 104,6°C.

Исследованы прочностные характеристики наномодифицированных клеевых композитов на основе полиуретанового эластомера, механоактивирование приводит к улучшению прочности до значения $2,75 \pm 5\%$ МПа. Установлена наилучшая концентрация бинарной смеси МУНТ/графит в матрице эластомера – 3%.

Список литературы

1. Zhan Y., Li Y., Meng Y., Xie Q., Lavorgna M. Electric heating behavior of reduced oxide graphene/carbon nano-tube/natural rubber composites with macro-porous structure and segregated filler network. *Polymers*, 2020, vol. 12, no. 10, 2411, pp. 1–14.
2. Bao S.P., Liang G.D., Tjong S.C. Positive temperature coefficient effect of polypropylene/carbon nano-tube/montmorillonite hybrid nanocomposites. *IEEE Trans Nanotechnol*, 2009, vol. 8, no. 6, pp. 729–736.
3. Jang S.H., Park Y.L. Carbon nanotube-reinforced smart composites for sensing of the freezing temperature and deicing by self-heating. *Nanomaterials and Nanotechnology*, 2018, vol. 8, no. 7, pp. 1–8.
4. Jia S.-L., Geng H.-Z., Wang L., Tian Y., Xu C.-X., Shi P.-P., Gu Z.-Z., Yuan X.-S., Jing L.-Ch., Guo Z.-Y., Kong J. Carbon nanotube-based flexible electrothermal film heaters with a high heating rate. *Royal Society Open Science*, 2018, vol. 5, no. 6, pp. 172072.
5. Yao X., Hawkins S.C., Falzon B.G. An advanced antiicing/deicing system utilizing highly aligned carbon nanotube webs. *Carbon*, 2018, vol. 136, pp. 130–138.
6. Guangming C., Mengyun Y., Junjie P., Deshan C., Zhigang X., Xin W., Bin T. Large-Scale Production of Highly Stretchable CNT/Cotton/Spandex Composite Yarn for Wearable Applications. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2018, vol. 10, no. 38, pp. 32726–32735.
7. Cai G., Yang M., Pan J., Cheng D., Xia Z., Wang X., Tang B. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2018, vol. 10, no. 38, 32726.
8. Kugler S., Kowalczyk K., Spychar T. Transparent epoxy coatings with improved electrical, barrier and thermal features made of mechanically dispersed carbon nanotubes. *Progress in Organic Coatings*, 2017, vol., no. 111, pp. 196–201.
9. Li J., Ma P.-C., Chow W.S., To C.K., Tang B.Z., Kim J.-K. Correlations between percolation threshold, dispersion state, and aspect ratio of carbon nanotubes. *Adv. Funct. Mater.*, 2007, vol. 17, no. 16, pp. 3207–3215.
10. Hu X., Zou C., Huang H. Preparation and characterization of self-supported conductive nanocables based on polyaniline and linear carboxymethyl β -cyclodextrin polymer functionalized carbon nanotubes. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2021, vol. 608, 125573.
11. Shaolei L., Guangfen L., Run T. Multi-walled carbon nanotubes functionalized with an ultrahigh fraction of carboxyl and hydroxyl groups by ultrasound-assisted oxidation. *J. Mater. Sci.*, 2016, vol. 51, pp. 3513–3524.
12. Shchegolkov A.V., Yagubov V.S., Khan Y.A., Komarov F.F. Effect of addition of carbon nanotubes on electrical conductance and heat dissipation of elastomers at flow of direct current. *Inorg. Mater. Appl. Res.*, 2020, vol. 11, pp. 1191–1198.
13. Влияние методов формирования полимерных композитных материалов с углеродными нанотрубками на механизмы электропроводности / Ф.Ф. Комаров, А.Г. Ткачев, А.В. Щегольков и др. // Журнал технической физики. 2021. Вып. 3. С. 475–483.
14. Eom J.Y., Kim D.Y., Kwon H.S. Effects of ball-milling on lithium insertion into multi-walled carbon nanotubes synthesized by thermal chemical vapour deposition. *Journal of Power Sources*, 2006, vol. 157, pp. 507–514.
15. Аввакумов Е.Г. Механические методы активации химических процессов. 2-е изд., перераб. и доп. Новосибирск: Наука, 1986. 306 с.
16. Пат. 2466333 Российская Федерация, МПК F24H 7/00 B82B 1/00. Электротеплоаккумулирующий нагреватель / В.Ф. Калинин, А.В. Щегольков; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет». № 2011118301/06; заявл. 05.05.2011, опубл. 10.11.2012.
17. Щегольков А.В. Применение наномодифицированных полиуретановых композитов для систем защиты от электромагнитных излучений // Технологии и материалы для экстремальных условий (прогнозные исследования и инновационные разработки: материалы Всероссийской научной конференции; под общ. ред. Б.Ф. Мясоедова. Тамбов, 2018. С. 236–241.
18. Щегольков А.В. Применение механоактивации углеродных нанотрубок при наномодифицировании эластомеров // Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент: материалы X Международной научно-инновационной молодёжной конференции. Тамбов, 2018. С. 272–274.
19. Mamunya Y.P., Davydenko V.V., Pissis P., Lebedev E.V. Electrical and thermal conductivity of polymers filled with metal powders // European Polymer Journal. 2002. Вып. 38(9). С. 1887–1897.
20. Электрические характеристики полимерных композитов, содержащих углеродные нанотрубки / А.В. Елецкий, А.А. Книжник, Б.В. Потапкин, Х.М. Кенни // УФН. 2015. Т. 185. Вып. 3. С. 225–270.
21. Щегольков А.В., Щегольков А.В. Электронагреватели на основе полимеров, модифицированных углероднымиnanoструктурами с эффектом саморегулирования: электро- и теплофизические свойства: монография. М.: РУСАЙНС, 2021. 144 с.

References

1. Zhan Y., Li Y., Meng Y., Xie Q., Lavorgna M. Electric heating behavior of reduced oxide graphene/carbon nano-tube/natural rubber composites with macro-porous structure and segregated filler network. *Polymers*, 2020, vol. 12, no. 10, 2411, pp. 1–14.
2. Bao S.P., Liang G.D., Tjong S.C. Positive temperature coefficient effect of polypropylene/carbon nano-tube/montmorillonite hybrid nanocomposites. *IEEE Trans Nanotechnol*, 2009, vol. 8, no. 6, pp. 729–736.
3. Jang S.H., Park Y.L. Carbon nanotube-reinforced smart composites for sensing of the freezing temperature and deicing by self-heating. *Nanomaterials and Nanotechnology*, 2018, vol. 8, no. 7, pp. 1–8.
4. Jia S.-L., Geng H.-Z., Wang L., Tian Y., Xu C.-X., Shi P.-P., Gu Z.-Z., Yuan X.-S., Jing L.-Ch., Guo Z.-Y., Kong J. Carbon nanotube-based flexible electrothermal film heaters with a high heating rate. *Royal Society Open Science*, 2018, vol. 5, no. 6, pp. 172072.

- Open Science, 2018, vol. 5, no. 6, pp. 172072.
5. Yao X., Hawkins S.C., Falzon B.G. An advanced antiicing/de-icing system utilizing highly aligned carbon nanotube webs. *Carbon*, 2018, vol. 136, pp. 130–138.
 6. Guangming C., Mengyun Y., Junjie P., Deshan C., Zhi-gang X., Xin W., Bin T. Large-scale production of highly stretchable CNT/cotton/spandex composite yarn for wearable applications. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2018, vol. 10, no. 38, pp. 32726–32735.
 7. Cai G., Yang M., Pan J., Cheng D., Xia Z., Wang X., Tang B. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2018, vol. 10, no. 38, 32726.
 8. Kugler S., Kowalczyk K., Spychar T. Transparent epoxy coatings with improved electrical, barrier and thermal features made of mechanically dispersed carbon nanotubes. *Progress in Organic Coatings*, 2017, vol., no. 111, pp. 196–201.
 9. Li J., Ma P.-C., Chow W.S., To C.K., Tang B.Z., Kim J.-K. Correlations between percolation threshold, dispersion state, and aspect ratio of carbon nanotubes. *Adv. Funct. Mater.*, 2007, vol. 17, no. 16, pp. 3207–3215.
 10. Hu X., Zou C., Huang H. Preparation and characterization of self-supported conductive nanocables based on polyaniline and linear carboxymethyl β -cyclodextrin polymer functionalized carbon nanotubes. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2021, vol. 608, 125573.
 11. Shaolei L., Guangfen L., Run T. Multi-walled carbon nanotubes functionalized with an ultrahigh fraction of carboxyl and hydroxyl groups by ultrasound-assisted oxidation. *J. Mater. Sci.*, 2016, vol. 51, pp. 3513–3524.
 12. Shchegolkov A.V., Yagubov V.S., Khan Y.A., Komarov F.F. Effect of addition of carbon nanotubes on electrical conductance and heat dissipation of elastomers at flow of direct current. *Inorg. Mater. Appl. Res.*, 2020, vol. 11, pp. 1191–1198.
 13. Komarov F.F., Tkachev A.G., Shchegolkov A.V. et al. Influence of methods of forming polymer composite materials with carbon nanotubes on the mechanisms of electrical conductivity. *Zhurnal tehnicheskoy fiziki* [Journal of Technical Physics], 2021, no. 3, pp. 475–483. (In Russ.)
 14. Eom J.Y., Kim D.Y., Kwon H.S. Effects of ball-milling on lithium insertion into multi-walled carbon nanotubes synthesized by thermal chemical vapour deposition. *Journal of Power Sources*, 2006, vol. 157, pp. 507–514.
 15. Avvakumov E.G. *Mekhanicheskie metody aktivatsii khimicheskikh protsessov* [Mechanical methods of activation of chemical processes]. 2nd ed., rev. and updated. Novosibirsk: Science, 1986, 306 p. (In Russ.)
 16. Kalinin V.F., Shchegolkov A.V. *Elektroteplokumuliruyushchiy nagrevatel* [Electric heat storage heater]. Patent RF, no. 2466333, 2012.
 17. Shchegolkov A.V. Application of nanomodified polyurethane composites for electromagnetic radiation protection systems. *Tekhnologii i materialy dlya ekstremalnykh usloviy (prognoznye issledovaniya i innovatsionnye razrabotki: materialy Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii)* [Technologies and materials for extreme conditions (predictive research and innovative development). Proceedings of the All-Russian Scientific Conference]. Ed. by Myasoedov B.F. Tambov, 2018, pp. 236–241. (In Russ.)
 18. Shchegolkov A.V. Application of mechanical activation of carbon nanotubes in nanomodification of elastomers. *Sovremennye tverdofaznye tekhnologii: teoriya, praktika i innovatsionnyi menedzhment: materialy X Mezhdunarodnoy nauchno-innovatsionnoy molodezhnoy konferentsii* [Modern solid phase technologies: theory, practice and innovation management. Proceedings of the 10th International Scientific and Innovative Youth Conference]. Tambov, 2018, pp. 272–274. (In Russ.)
 19. Mamunya Y.P., Davydenko V.V., Pissis P., Lebedev E.V. Electrical and thermal conductivity of polymers filled with metal powders. *European Polymer Journal*, 2002, no. 38(9), pp. 1887–1897.
 20. Eletskiy A.V., Knizhnik A.A., Potapkin B.V., Kenny J.M. Electrical characteristics of carbon nanotube doped composites. *UFN [Advances in Physical Sciences]*, 2015, volume 185, no. 3, pp. 225–270. (In Russ.)
 21. Shchegolkov A.V., Shchegolkov A.V. *Elektronagrevateli na osnove polimerov, modifitsirovannykh ugлеродными nanostrukturami s effektom samoregulirovaniya: elektro- i teplofizicheskie svoistva: monografiya* [Electric heaters based on polymers modified with carbon nanostructures with the self-regulation effect: electrical and thermophysical properties: monograph]. Moscow: RUSCIENCE, 2021, 144 p. (In Russ.)

Поступила 09.03.2021; принята к публикации 29.03.2021; опубликована 28.06.2021
Submitted 09/03/2021; revised 29/03/2021; published 28/06/2021

Щегольков Александр Викторович – кандидат технических наук, доцент,
Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия.
Email: Energynano@yandex.ru. ORCID 0000-0002-4317-0689

Alexander V. Shchegolkov – PhD (Eng.), Associate Professor,
Tambov State Technical University, Tambov, Russia.
Email: Energynano@yandex.ru. ORCID 0000-0002-4317-0689

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

УДК 621.793

DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-2-68-78



ФОРМИРОВАНИЕ НАНОСТРУКТУРНЫХ ТОПОКОМПОЗИТОВ С КЛАСТЕРНО-ГРАДИЕНТНОЙ АРХИТЕКТУРОЙ КОМБИНИРОВАННОЙ ИОННО-ВАКУУМНОЙ ОБРАБОТКОЙ

Полещенко К.Н.¹, Коротаев Д.Н.², Ерёмин Е.Н.³, Несов С.Н.³, Тарасов Е.Е.⁴, Теплоухов А.А.^{3,5}, Семенюк Н.А.³, Иванова Е.В.², Ласица А.М.³, Иванов А.Л.¹

¹Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, Омск, Россия

²Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе, Москва, Россия

³Омский государственный технический университет, Омск, Россия

⁴Федеральный научно-производственный центр «Прогресс», Омск, Россия

⁵ООО «Омсктехуглерод», Омск, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Многообразие различных видов поверхностной повреждаемости материалов в условиях эксплуатации машин и механизмов актуализируют фундаментальные и прикладные исследования по созданию новых износостойких материалов. Совершенствованиеnanoструктурных топокомпозитов за счёт создания дополнительных локально-диссипативных структурных элементов является наиболее перспективным направлением создания нового типа nanoструктурных топокомпозитов с кластерно-градиентной архитектурой. **Используемые методы.** Использовалась усовершенствованная установка, позволяющая осуществлять ионно-плазменную и ионно-лучевую обработку в условиях дискретного и изменяющегося фронта наращивания. **Новизна.** Проведены исследования эволюции строения покрытий в зависимости от условий ионно-вакуумной обработки. Установлены эффекты «расслоения» кластерной фазы и текстурирования конденсированной фазы при ионно-плазменном напылении. Проведена апробация технологических решений, сочетающих селективную ионную обработку, ионное ассистирование и напыление покрытия для формирования требуемого строения поверхности топокомпозитов. Исследовано изменение фазового состава покрытия по глубине. **Результат.** Установлено, что при комбинированной ионно-вакуумной обработке происходит образование в области границы раздела «покрытие-основа» оксинитридов титана. Приведены результаты исследований формирования nanoструктурных топокомпозитов с кластерно-градиентной архитектурой. **Практическая значимость.** Показано, что наличие данных фаз, наряду с кластерной морфологией топокомпозитов, является положительным фактором, способствующим повышению износостойкости в жестких условиях температурно-скоростного нагружения при резании труднообрабатываемого никелевого сплава.

Ключевые слова: ионно-плазменная обработка, ионно-лучевая обработка, nanoструктурные топокомпозиты с кластерно-градиентной архитектурой, кластерная фаза, нанокластерная морфология.

© Полещенко К.Н., Коротаев Д.Н., Ерёмин Е.Н., Несов С.Н., Тарасов Е.Е., Теплоухов А.А., Семенюк Н.А., Иванова Е.В., Ласица А.М., Иванов А.Л., 2021

Для цитирования

Формирование nanoструктурных топокомпозитов с кластерно-градиентной архитектурой комбинированной ионно-вакуумной обработкой / Полещенко К.Н., Коротаев Д.Н., Ерёмин Е.Н., Несов С.Н., Тарасов Е.Е., Теплоухов А.А., Семенюк Н.А., Иванова Е.В., Ласица А.М., Иванов А.Л. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №2. С. 68–78. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-2-68-78>



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

FORMATION OF NANOSTRUCTURED TOPOCOMPOSITES WITH CLUSTER-GRADIENT ARCHITECTURE BY COMBINED ION-VACUUM PROCESSING

Poleshchenko K.N.¹, Korotaev D.N.², Eremin E.N.³, Nesov S.N.³, Tarasov E.E.⁴, Teploukhov A.A.^{3,5}, Semenyuk N.A.³, Ivanova E.V.², Lasitsa A.M.³, Ivanov A.L.¹

¹ Siberian State Automobile and Highway University, Omsk, Russia

² Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia

³ Omsk State Technical University, Omsk, Russia

⁴ Federal Research and Production Center Progress, Omsk, Russia

⁵ LLC Omsk Carbon Group, Omsk, Russia

Abstract. Problem Statement (relevance of the research). The variety of different types of surface damage to materials in the operation of vehicles and mechanisms contributes to current relevance of basic and applied research on the creation of new wear-resistant materials. Improving the nanostructured topocomposites by creating additional, locally dissipative structural elements is the most promising direction for creating a new type of nanostructured topocomposites with cluster-gradient architecture. **Methods Applied.** An improved unit was used to carry out ion-plasma and ion-beam processing under conditions of a discrete and varying front. **Novelty.** Studies of the evolution of the coating structure were carried out depending on the conditions of ion-vacuum processing. The authors established the effects of "stratification" of the cluster phase and texturing of the condensed phase during ion-plasma sputtering. They tested the technological solutions combining selective ion processing, ion assistance and coating deposition to form the required topocomposite surface structure. The change in the coating phase composition along depth was studied. **Result.** It was found that during combined ion-vacuum processing, titanium oxynitrides are formed in the "coating-base" interface. This paper presents results of the formation of nanostructured topocomposites with cluster-gradient architecture. **Practical significance.** It is shown that these phases along with the cluster morphology of topocomposites are positive factors contributing to an increase in wear resistance under severe conditions of temperature-dynamic loading, when cutting a difficult-to-machine nickel alloy.

Keywords: ion-plasma processing, ion-beam processing, nanostructured topocomposites with cluster-gradient architecture, cluster phase, nanocluster morphology.

For citation

Poleshchenko K.N., Korotaev D.N., Eremin E.N., Nesov S.N., Tarasov E.E., Teploukhov A.A., Semenyuk N.A., Ivanova E.V., Lasitsa A.M., Ivanov A.L. Formation of Nanostructured Topocomposites with Cluster-Gradient Architecture by Combined Ion-Vacuum Processing. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021, vol. 19, no. 2, pp. 68–78. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-2-68-78>

Введение

Повышение поверхностной прочности материалов продолжает оставаться одной из главных проблем физического материаловедения, трибологии и трибофизики. Многообразие различных видов поверхностной повреждаемости материалов вследствие пластической деформации, адгезионно-усталостных процессов, абразивного изнашивания, микрорезания, фреттинг-разрушения, их взаимовлияние в условиях эксплуатации машин и механизмов актуализируют фундаментальные и прикладные исследования по созданию новых износостойких материалов. К числу отечественных трендов в этой области относятся направления, связанные с разработкой различных типов архитектуры одно-, многослойных и мультислойных наноразмерных покрытий [1–6], а также сверхтвёрдых и ультра-

твёрдых покрытий с нанокомпозитной архитектурой [7].

Для данных условий успешно проведена апробация изделий на основеnanoструктурных топокомпозитных покрытий или nanoструктурных топокомпозитов (НСТК) [8–13]. Вместе с тем проведённые исследования позволили определить возможные пути совершенствования технологии их получения, основанной, в частности, на использовании каскадного перекрёстного эффекта [14], а также расширить технологические возможности получения данных материалов с регулируемой морфологией. Несмотря на достигнутые успехи в создании указанных покрытий, задачи обеспечения надёжности и долговечности конструкционных и инструментальных материалов для таких условий, как фреттинг-разрушение и окислительный износ при резании особо прочных сплавов, остаются нерешёнными.

Это связано в первую очередь с недостаточной циклической прочностью и стойкостью к окислительным процессам существующих защитных покрытий [15, 16].

Перспективы применения НСТК обусловлены их способностью эффективно диссилировать энергию трибовзаимодействия за счёт специфики структурно-морфологического строения поверхности и приповерхностных слоёв с изменяющейся (градиентной) структурой по глубине. Структурные элементы, эффективно диссилирующие энергию трибоконтакта, – это в первую очередь нанокластеры. За счёт проявления механизмов нанопластичности при их сдвиге и повороте, а также наличия переходных мезослоёв между покрытием и основой удаётся значительно минимизировать развитие трещин в поверхностных слоях в начальный период трения [13]. Таким образом, совершенствование НСТК за счёт создания дополнительных локально-диссипативных структурных элементов является наиболее перспективным направлением создания нового типа НСТК, а именно –nanoструктурных топокомпозитов с кластерно-градиентной архитектурой (КГА).

Помимо указанных структурных элементов наибольший интерес для решения задач диссилиации энергии в условиях трибонагружения вызывает формирование интерфейса «поверхностный слой – подложка», обеспечивающего протекание процессов релаксационной деформации без разрушения, возникающих в зонах концентраторов напряжений (ЗКН) [14, 17, 18]. Это показывает целесообразность формирования подобных структурных состояний в области межфазной границы между покрытием и основой, что позволит снизить уровень внутренних напряжений в области ЗКН за счёт создания субструктурных состояний как в материале основы, так и в покрытии. Теоретически задача сводится к снижению масштаба ЗКН на границе раздела «упрочнённый слой – покрытие». Технологически это можно обеспечить путём предварительного nanoструктурирования верхних слоёв материала основы, а также созданием условий для формирования развитой удельной поверхности и контролируемого образования и роста на ней наноразмерных зародышей покрытия.

Вместе с тем в области интерфейса целесообразно сформировать энергоемкие фазы по типу оксикарбидов и оксинитридов, обладающих высокой пассивирующей способностью. Наличие указанных фаз в условиях последующей трибоактивации может способствовать образованию вторичных кислородосодержащих износостойких

структур в результате эффекта структурно-энергетической приспособляемости [19–22].

Дополнительное влияние на структурную (структурно-энергетическую) приспособляемость НСТК может оказывать и проявление установленного ранее эффекта дальнодействия [23] в результате трансформации их приповерхностных слоёв с образованием дислокационных фрагментов, слоистых или периодических структур.

Следовательно, задача получения НСТК с кластерно-градиентной архитектурой сводится в первую очередь к управлению процессами формирования требуемой нанокластерной морфологии при модифицирующем воздействии, направленном на формирование локально-неравновесных (метастабильных) поверхностных структур, подобных по своему строению вторичным структурам и быстро адаптируемых к последующему трибомеханическому воздействию. Целью настоящей работы является исследование процессов формирования nanoструктурных топокомпозитов с кластерно-градиентной архитектурой при комбинированной ионно-вакуумной обработке в условиях дискретного и изменяющегося фронта наращивания покрытий.

Методы и материалы

В основу технологии получения nanoструктурных топокомпозитов с кластерно-градиентной архитектурой положена идея управления процессами направленной кристаллизации конденсированной и кластерной фаз за счёт меняющегося и дискретного фронта наращивания покрытия. Для реализации этой идеи была проведена модернизация установки ННВ путём совершенствования источника газоразрядной плазмы на основе дугового разряда, позволяющего генерировать плазму при рабочих давлениях порядка $P = 10^{-2} \div 10^{-1}$ Па, а также дополнительного использования импульсного имплантера. Это позволило обеспечить вариативность режимов ионно-плазменных процессов, а также в зависимости от решаемых задач осуществлять этапы активации и пассивации при соответственно обработке поверхности материала основы и формировании покрытий в одном вакуумном цикле.

Схема, используемая в эксперименте, приведена на **рис. 1**. Данная схема позволяет осуществлять многооперационную обработку ионно-плазменными потоками в стационарном и импульсном режимах, а также управлять процессами формирования нанокластерной морфологии за счёт меняющегося и дискретного фрон-

та наращивания. Это достигается путём изменения угла наклона ионно-плазменного потока относительно поверхности образца, а также селективной обработки материала основы с использованием специального приспособления, которое содержит поворотный стол для изменения положения образца относительно направления потоков ионов в пределах угла $\alpha=0\div70^\circ$, отражатель специальной конструкции и шаблон.

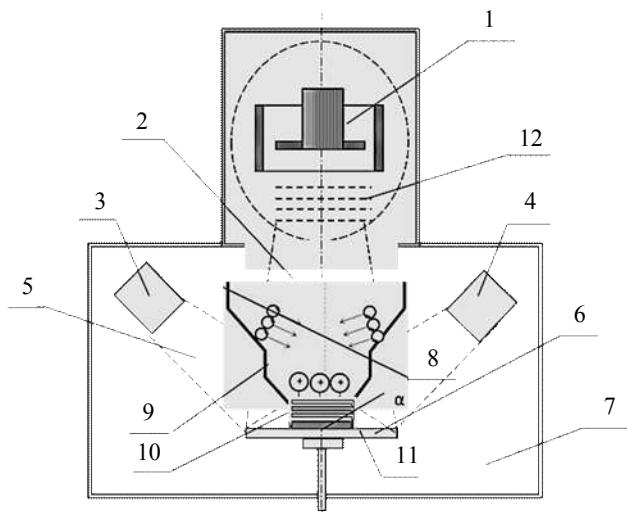


Рис. 1. Схема получения НСТК с КГА: 1 – имплантер; 2 – пучок ионов; 3 – испаритель 1-й; 4 – испаритель 2-й; 5 – поток ионов; 6 – поворотный стол (держатель образцов); 7 – вакуумная камера; 8 – поток ионов; 9 – отражатель ионов; 10 – шаблон; 11 – образец; 12 – сетка; α – угол наклона поворотного стола (держателя образцов)

Fig. 1. Flow chart of nanostructured topocomposites with cluster-gradient architecture: 1 is an implanter; 2 is an ion beam; 3 is an evaporation tank 1; 4 is an evaporation tank 2; 5 is an ion flow; 6 is a rotary table (sample holder); 7 is a vacuum chamber; 8 is an ion flow; 9 is an ion reflector; 10 is a template; 11 is a sample; 12 is a grid; α is a tilt angle of the rotary table (sample holder)

Апробация технологии получения НСТК проводилась на образцах различных марок сталей и сплавов. В данной работе приведены результаты для получения НСТК с кластерно-градиентной архитектурой на основе металлокерамического твердого сплава ВК-8, полученного методом порошковой металлургии. Основные исследования были проведены с использованием катодов, позволяющих получать покрытия из газоразрядной нитридотитановой плазмы. В качестве рабочего вещества использовался азот. Материал катода – ВТ5. В зависимости от задач,

решаемых в процессе вакуумного цикла, назначались соответствующие режимы обработки, которые варьировались в следующих диапазонах. Ускоряющее напряжение в условиях ионного ассистирования изменялось в пределах $U_V = 1 \div 40$ кВ. Сила тока ионного пучка: $I = 10 \div 30$ мА. Длительность импульса ионного пучка: $T_i = 100 \div 150$ мкс. Частота импульсов менялась в пределах $N = 1 \div 100$ Гц. В режиме ионно-плазменного нанесения покрытий напряжение на подложке изменялось в пределах $U_p = 80 \div 120$ В.

Для исследования процессов эволюции строения морфологии и структуры покрытий использована комбинация методов электронной и зондовой микроскопии на электронном микроскопе JEOL JCM-5700 с рентгеновским энергодисперсионным спектрометром JED-2300 и атомно-силовом микроскопе NTEGRA Prima (NT-MDT). Исследование элементного состава покрытий проводилось методом рентгенофотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) на аналитическом комплексе Surface Science Center (Riber). Оценка износостойкости НСТК с кластерно-градиентной архитектурой проводилась в условиях резания.

Результаты и обсуждение

Анализ процессов формирования НСТК с кластерно-градиентной архитектурой при ионно-плазменном воздействии проводился с учётом специфики конструктивных особенностей катодной системы установки. С использованием данной конструкции были реализованы два основных варианта обработки. Первый вариант использовался для операций напыления с использованием испарителей и источника постоянного напряжения. Второй вариант применялся для селективного распыления, ионного ассистирования, а также реализации каскадно-перекрёстного эффекта. Во втором варианте напыления был задействован испаритель и имплантер, а также источники постоянного, ускоряющего напряжения и источник с потенциалом смешения напряжения. В зависимости от варианта и режимов ионно-плазменной обработки осуществлялось формирование требуемой нанокластерной морфологии в условиях меняющегося и дискретного фронта наращивания покрытия.

На рис. 2 приведены профили поверхности после предварительного наноструктурирования в режиме ионного ассистирования без селективной обработки (рис. 2, а) и с использованием селективной обработки (рис. 2, б).

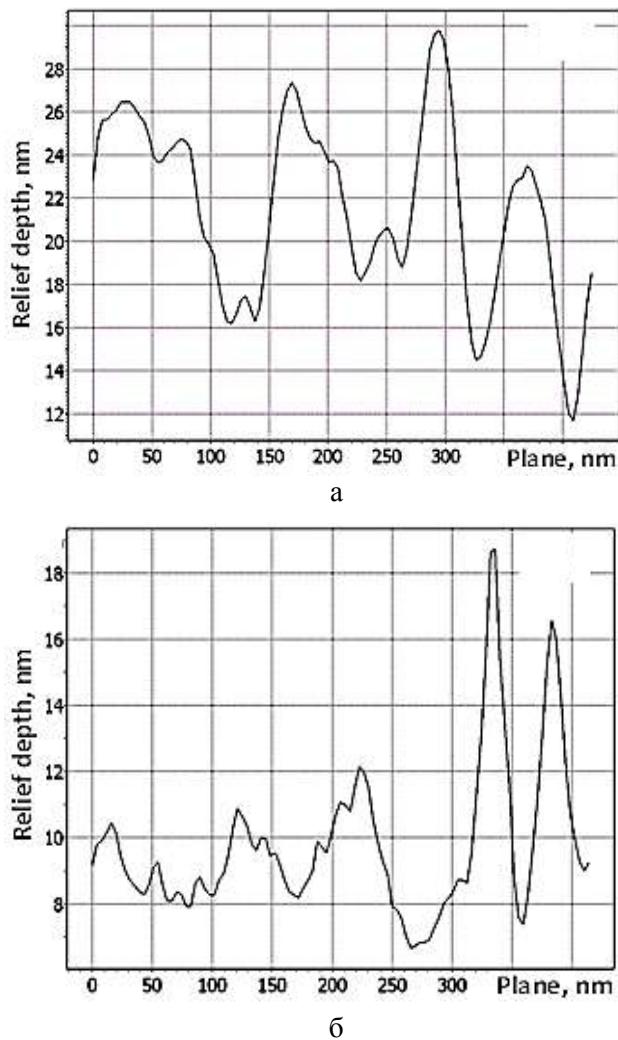


Рис. 2. Вид поверхности материала основы – сплава ВК-8 после наноструктурирования в режиме ионного ассистирования: а – без селективной обработки; б – с использованием селективной обработки

Fig. 2. Surface of the base material – BK-8 alloy after nanostructuring by ion-beam-assisted deposition: а is without selective treatment; б is with selective treatment

Из представленных зависимостей видно, что селективная обработка позволяет получить более развитую удельную поверхность, о чём свидетельствует появление «бокового рельефа» в виде маленьких пиков – высот нанонеровностей (см. рис. 2, б).

После предварительного наноструктурирования были проведены исследования начальных стадий образования покрытий в течение 3, 6, 9 мин. Было установлено, что при использовании предварительного наноструктурирования

развитие структуры покрытия может происходить по двум механизмам: островковому и смешанному. При островковом механизме роста покрытия происходит образование преимущественно конденсированной фазы, при смешанном механизме наряду с ростом конденсированной фазы, обеспечивающей равномерное развитие покрытия, наблюдается преимущественно вертикальный рост кластерных агломератов (кластерной фазы). Такой тип строения покрытия происходит в тех случаях, когда предварительное наноструктурирование осуществляется за счет одновременной селективной ионно-плазменной и ионно-лучевой обработки с использованием шаблонов. Тем самым создаются условия для активации локальных участков поверхности, служащих в дальнейшем центрами зарождения кластерной фазы.

На рис. 3 показано типичное изображение начальной стадии формирования нанокластерного покрытия с конденсированной фазой (рис. 3, а) и кластерной фазой (рис. 3, б).

Изучение кинетики и особенностей морфологии топокомпозитов в зависимости от режимов и условий их формирования показали, что при снижении значений угла наклона ионного потока относительно поверхности образца $\alpha \leq 20\text{--}30^\circ$ механизм образования как кластерной (рис. 4, а), так и конденсированной фаз (рис. 4, б) меняется: строение поверхности приобретает волнобразный вид (рис. 4, а).

Происходящее «расслоение» нанокластерных агломератов оказывает влияние и на трансформацию строения конденсированной фазы покрытия, приводя к заметному текстурированию поверхностного слоя в направлении ионно-плазменного воздействия (см. рис. 4, б).

Сохранить строение и устойчивый рост кластерной фазы в присутствии текстурирования конденсированной фазы удается за счёт ионной имплантации на начальном этапе образования зародышей кластерных агломератов с использованием шаблона (рис. 5) и последующим увеличением угла фронта наращивания покрытия до значений $\alpha \geq (40\text{--}45^\circ)$.

В этом случае достигается получение требуемого строения поверхности топокомпозита с присутствием как кластерной в виде «выступа» (рис. 5, а), так и конденсированной фаз в виде «впадины» (рис. 5, б).

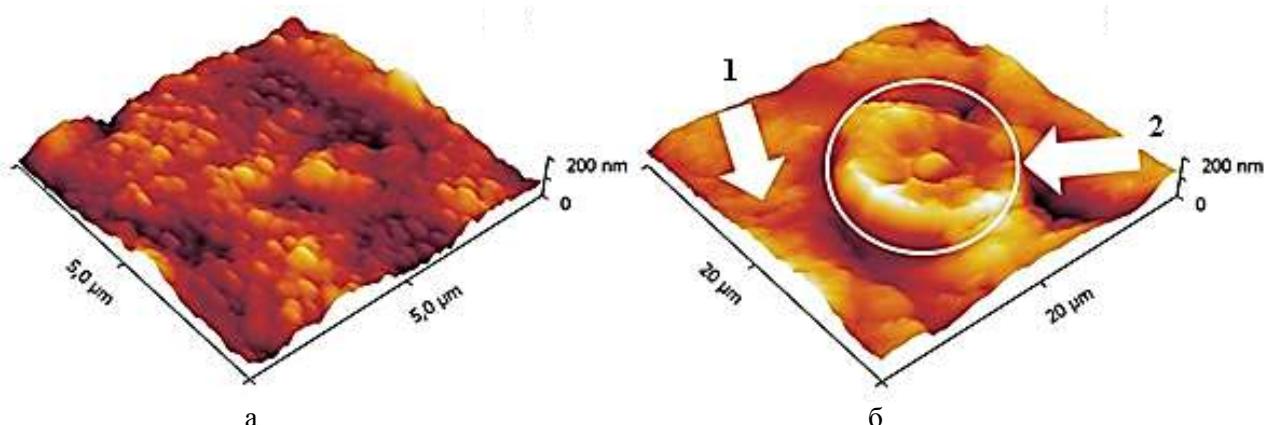


Рис. 3. Вид поверхности покрытия: а – с выраженной конденсированной фазой; б – с выраженной кластерной фазой; стрелками показаны: 1 – конденсированная фаза; 2 – кластерная фаза

Fig. 3. Type of the coating surface: a is with an apparent condensed phase; b is with an apparent cluster phase; arrowed lines show 1 is a condensed phase; 2 is a cluster phase

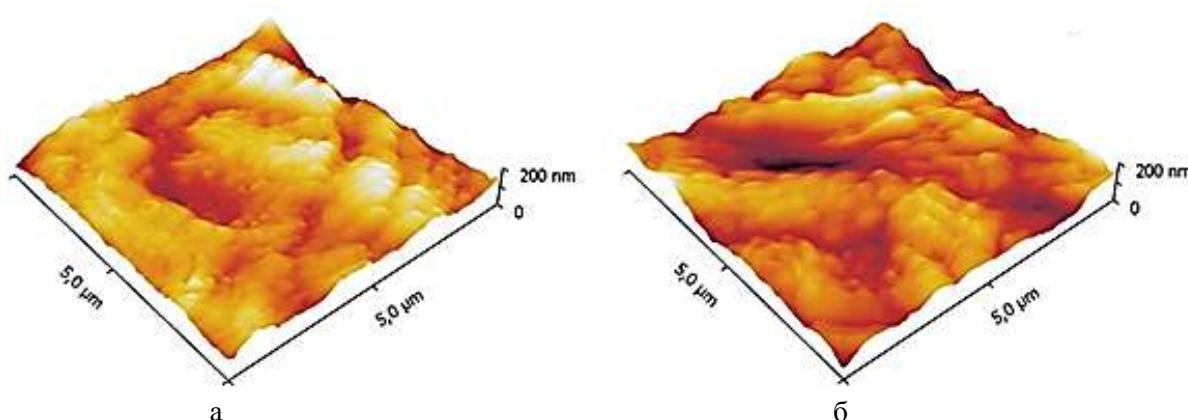


Рис. 4. Изображение трансформации морфологии поверхности топокомпозита в зависимости от изменения угла фронта наращивания покрытия: а – кластерная фаза; б – конденсированная фаза

Fig. 4. Changes in the morphology of the topocomposite surface depending on changes in the angle of the coating buildup: a is a cluster phase; b is a condensed phase

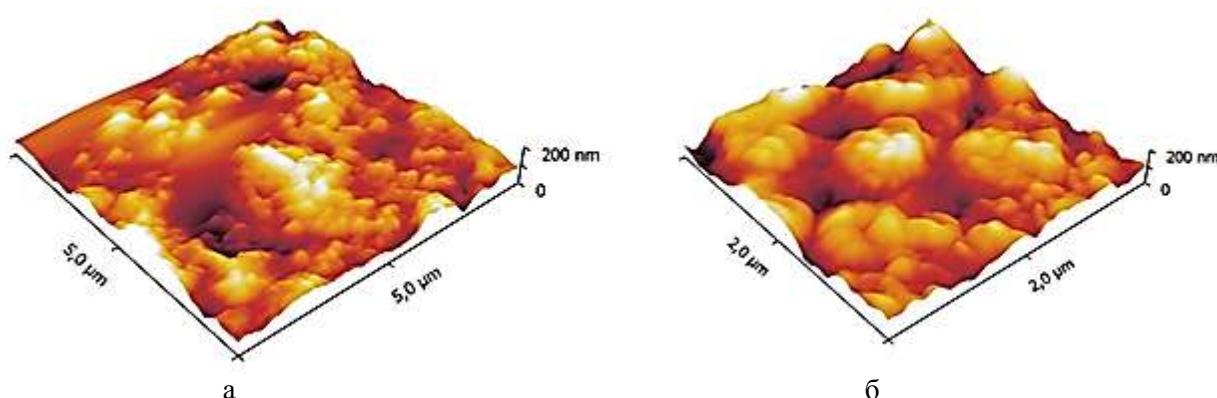


Рис. 5. Изображение эволюции строения поверхностиnanoструктурного топокомпозита, сформированного комбинированным ионно-плазменным и ионно-лучевым воздействием с использованием меняющегося и дискретного фронта наращивания покрытия: а – начальная стадия формирования кластерной фазы; б – сформированная нанокластерная морфология поверхности

Fig. 5. Evolution of the surface of the nanostructured topocomposite formed by combined ion-plasma and ion-beam treatment, using a discrete and varying front: a is an initial stage of forming the cluster phase; b is formed nanoclustered morphology of the surface

На рис. 6 приведены РФЭС-спектры азота для покрытий на BK-8 с различным временем формирования.

На рис. 6, а видно, что положение основного максимума N 1s линии для всех вариантов покрытий совпадает и составляет ~396 эВ. Это соответствует азоту, химически связанному с титаном (TiN). Высокоэнергетический максимум спектра N 1s на энергии связи ~397,8 эВ (рис. 6, б) соответствует азоту в составе оксинитридов титана (TiN_xO_{1-x}). Соотношение интегральных площадей компонентов, соответствующих азоту в составе TiN и TiN_xO_{1-x} , присутствующих в покрытии, имеют близкие значения. Доля азота в TiN составляет ~80%, доля азота TiN_xO_{1-x} ~20% (см. рис. 6, б).

Детальный анализ линии O 1s кислорода с разложением на компоненты (рис. 7) подтверждает присутствие оксинитридов титана (TiN_xO_{1-x}) в покрытиях. Кроме того, кислород в покрытиях присутствует в трех различных химических состояниях. Компонент спектра с максимумом на энергии связи ~530 эВ отвечает кислороду, входящему в состав оксида титана (TiO_2). Компонент с максимумом на энергиях связи ~531,6 эВ соответствует кислороду в составе оксинитридов титана (TiN_xO_{1-x}). Высокоэнергетический компонент спектра (энергия связи ~533 эВ) отвечает кислороду, химически связанному с углеродом в составе C-O и C=O. Наличие углерод-кислородных химических связей может быть обусловлено частичным окислением углерода.

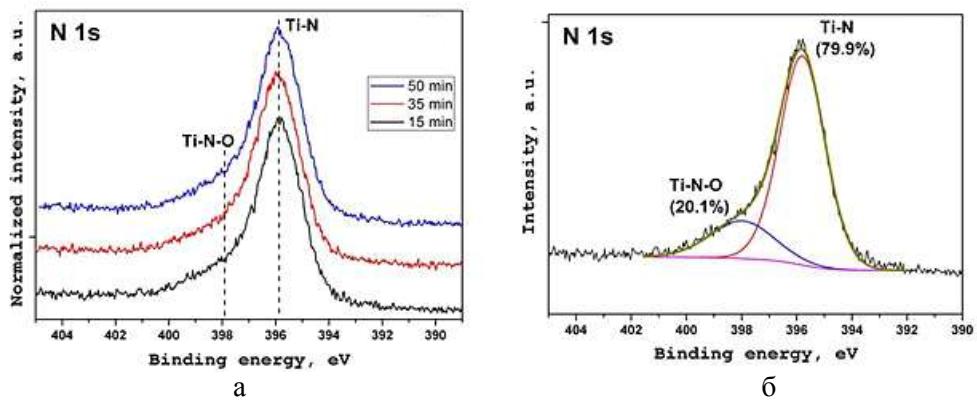


Рис. 6. РФЭС-спектры азота N 1s: а – для покрытий на BK-8, сформированных при различном времени получения; б – спектр азота с разложением на компоненты для покрытия при времени формирования $t=35$ мин

Fig. 6. XPS spectra of N 1s: a is for coatings on BK-8 formed in various periods of production; б is spectrum of nitrogen broken down in the components for coating at forming time $t=35$ min

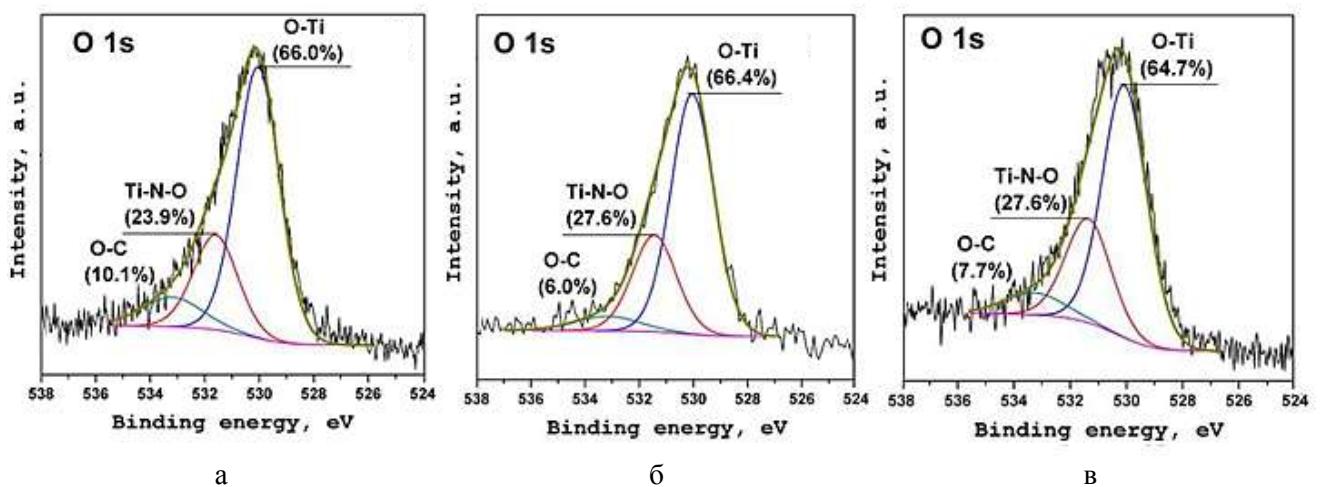


Рис. 7. РФЭС-спектры кислорода O 1s для покрытий, полученных при различном времени формирования: а – 15 мин; б – 35 мин; в – 50 мин

Fig. 7. XPS spectra of oxygen O 1s for coatings formed in various periods of production: a is 15 min; б is 35 min; в is 50 min

Как следует из результатов, приведённых на рис. 7, компоненты спектров кислорода для всех вариантов покрытий имеют близкое значение относительной подынтегральной площади. Наибольшее количество кислорода в составе оксида титана наблюдается для покрытия, сформированного при 15 минутах. Следовательно, на начальных стадиях формирования покрытий, т.е. в области границы покрытие – основа, при исследуемых условиях получения наноструктурного топокомпозита происходит образование энергоёмких оксинитридных фаз.

На рис. 8 приведены типичные кинетические зависимости изнашивания НСТК на основе ВК-8 в условиях резания труднообрабатываемых титановых и хромоникелевых сплавов.

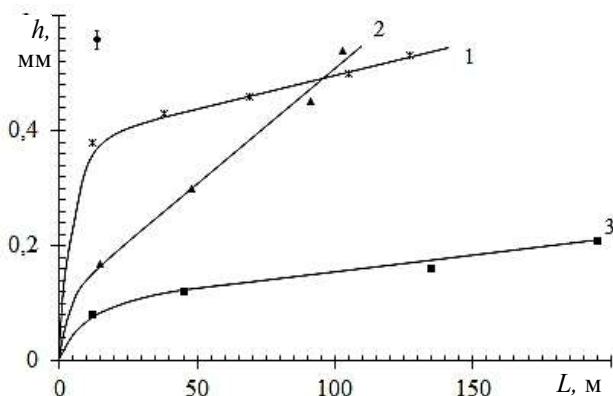


Рис. 8. Кинетические зависимости изнашивания:
1 – твёрдый сплав ВК 8; 2 – наноструктурный топокомпозит на металлокерамической основе (ВК-8); 3 – наноструктурный топокомпозит на металлокерамической основе (ВК-8) с кластерно-градиентной архитектурой;
 L – путь резания; h – фаска износа по задней поверхности резца (условия эксперимента: скорость резания $V=30$ м/мин; подача $S=0,15$ мм/об; глубина резания $t=1,5$ мм)

Fig. 8. Kinetic curves of wear: 1 is tough alloy BK 8; 2 is a nanostructured ceramic-metal-based topocomposite (BK-8); 3 is a nanostructured ceramic-metal-based topocomposite (BK-8) with cluster-gradient architecture; L is cutting length; h is a flank wear land along the flank surface (experimental conditions: cutting speed $V=30$ m/min; feed $S=0.15$ mm/rev.; cutting depth $t=1.5$ mm)

Согласно представленным результатам при резании никелевого сплава ХН62БКТЮ наблюдается снижение интенсивности процессов изнашивания наноструктурного топокомпозита как на начальном этапе, так и на стадии нормального износа. Можно утверждать, что повышение износостойкости материала достигается главным образом за счёт адаптивных явлений структурной приспособ-

ливаемости (формирования вторичных структур) в его приповерхностных слоях, развивающихся на этапе приработки, способствующих высокой со- противляемости циклическим нагрузкам и интенсивным окислительным процессам, характерным для данных условий резания.

Заключение

Полученные результаты показывают, что разработка наноструктурных топокомпозитов с кластерно-градиентной архитектурой требует установления взаимосвязи между физическими процессами при формировании их поверхностных структур и технологическими режимами ионно-плазменного и ионно-лучевого модифицирования. Для получения данного типа наноструктурных топокомпозитов была проведена модернизация ионно-плазменной установки, что значительно расширило технологические возможности их получения с использованием дискретного и изменяющегося фронта наращивания покрытия.

Исследования процессов формирования кластерной и конденсированной фаз позволили изучить особенности их совместной эволюции, проявляющейся в виде «расслоения» кластерной фазы и текстурирования конденсированной фазы покрытия вследствие интенсификации массопереноса вдоль поверхности формируемого покрытия под действием ионно-плазменных потоков.

Установлено, что управление процессами формирования требуемой морфологии как кластерной, так и конденсированной фаз возможно при определённом сочетании и определённой последовательности технологических операций активации, ионного ассистирования и напыления покрытия. В частности, для обеспечения стабильного роста кластерной фазы необходимо осуществить предварительную активацию поверхности путём селективной ионной обработки для получения развитой удельной поверхности (нанорельефа) с одновременной обработкой импульсным ионным пучком с целью обеспечения высокой адгезии покрытия с основой. Кроме того, наличие оксинитридов титана (TiN_xO_{1-x}) в области интерфейса позволяет предположить, что они являются центрами кристаллизации и устойчивого роста кластерной фазы. Присутствие оксинитридов вносит свой вклад в процессы структурной приспособляемости наноструктурных топокомпозитов в условиях резания труднообрабатываемых никелевых сплавов, что подтверждается проведёнными экспериментами. Вместе с тем на процессы диссипации энергии при трибовзаимодействии оказывает своё влияние и нанокластерная морфология поверхности топокомпозитов [15], что подтверждает акту-

альность дальнейших исследований в области совершенствования данного типа материалов.

Список литературы

1. Grigoriev S.N., Vereschaka A.A., Vereschaka, A.S., Kutin A.A. Cutting tools made of layered composite ceramics with nano-scale multilayered coatings. Procedia CIRP. 2012. Vol. 1. P. 318–323.
2. Vereshchaka A.S., Karpuschewski B., Dubner L. Development of the method of obtaining nanostructured functional coatings. Proceedings of the Intern. Scient. Conf. "Production. Technology". 2008. Vol.1. P. 62.
3. Smith I.J., Muenz W.D., Donohue L.A., Petrov I., Greene J.E. Improved Ti_{1-x}Al_xN PVD coatings for dry high speed cutting operations. Surf Eng. 1998. Vol. 14 (1). P. 37–41.
4. Blinkov I.V., Volkhonskii A.O., Anikin V.N., Petzhik M.I., Derevtsova D.E. Phase Composition and Properties of Wear Resistant Ti–Al–Cr–Zr–Nb–N Coatings Manufactured by the Arc Physical Deposition Method // Inorganic Materials: Applied Research. 2011. Vol. 2. №. 3. P. 285–291.
5. Volkhonskii A.O., Blinkov I.V., Elyutin A.V., Podstyazhonok O.B. High-performance wear-resistant ion-plasma coatings based on five-component nitrides for a hard-alloy cutting tool operating under constant loads // Metallurgist. 2010. Vol. 54. P. 374–377.
6. Blinkov I.V., Volkhonsky A.O., Podstyazhonok O.B. Structure and properties of multilayer coatings deposited with PVD-arc technology // Surface engineering. 2011. No 2. P. 57–63.
7. Upadhyay R., Brossard N., Chen C.H. Mechanisms underlying astringency: introduction to an oral tribology approach // J. Phys. D: Appl. Phys. 2016. Vol. 49. P. 104003.
8. Разработка и получениеnanoструктурных топокомпозитов / Гринберг П.Б., Коротаев Д.Н., Полещенко К.Н., Суриков В.И. // Вестник СибАДИ. 2015. № 3(43). С.39–45.
9. Метод получения nanoструктурированных топокомпозитов для повышения несущей способности конструктивных элементов энергооборудования / Гринберг П.Б., Полещенко К.Н., Горюнов В.Н., Тарасов Е.Е. // Вестник Омского университета. 2012. № 2. С. 253–258.
10. Полещенко К.Н., Коротаев Д.Н., Тарасов Е.Е. Структурно-морфологические особенности nanoструктурных топокомпозитных покрытий триботехнического назначения // Вестник СибАДИ. 2016. №. 4(50). С.126–132.
11. Korotaev D.N., Tarasov E.E., Poleschenko K.N., Eremin E.N., Ivanova E.V. Formation of wear resistant nanostructural topocomposite coatings on metal materials by ionic-plasma processing // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1050(1). P. 012037.
12. Grinberg P.B., Poleschenko K.N., Korotaev D.N., Orlov P.V., Vershinin G.A., Tarasov E.E., Ivanova E.V. Receiving nanostructural topocomposite coatings in terms of the cascade cross effect // Journal of Physics: Conf. Series. 2019. Vol. 1210. P. 012054.
13. Влияние кластерно-градиентной архитектуры nanoструктурных топокомпозитов на особенности трибовзаимодействия с гетерофазным материалом / Коротаев Д.Н., Полещенко К.Н., Еремин Е.Н., Тарасов Е.Е. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2020. Т. 16, № 3 (183). С. 130–135.
14. Моисеенко Д.Д., Максимов П.О. Эффект «шахматной доски» и формирование спиральных мезоструктур на интерфейсе «поверхностный слой – подложка»: моделирование на основе стохастического подхода // Физическая мезомеханика. 2005. Т.8, № 6. С.89–96.
15. Vereschaka A.S., Vereschaka A.A., Kirillov A.K. Ecologically friendly dry machining by cutting tool from layered composition ceramic with nano-scale multi-layered coatings. Key Eng. Materials. 2012. Vol. 496. P. 67–76.
16. Veprek S., Argon A.S. Mechanical properties of super hard nanocomposites. Surf. Coat. Technol. 2001. P. 175–182.
17. Панин В.Е., Панин А.В. Эффект поверхностного слоя в деформируемом твёрдом теле // Физическая мезомеханика. 2005. Т.8, № 5. С. 7–15.
18. Эффект «шахматной доски» в распределении напряжений и деформаций на интерфейсах в нагруженном теле: экспериментальная верификация и механизмы мезоскопического канализирования / Панин В.Е., Панин А.В., Елсукова Т.Ф., Кузина О.В. // Физическая мезомеханика. 2005 Т.8, № 6. С.97–105.
19. Иванова В.С., Буше Н.А., Гершман И.С. Структурная приспособляемость при трении как процесс самоорганизации // Трение и износ. 1997. Т. 18, № 1. С. 74–79.
20. Ким В.А. Самоорганизация в процессах упрочнения, трения и изнашивания режущего инструмента. Владивосток: Дальнавука, 2001. 203 с.
21. Бершадский Л.И. Структурная термодинамика трибосистем. Киев: Знаніє, 1990. 253 с.
22. Мигранов М.Ш., Шустер Л.Ш. Интенсификация процесса металлообработки на основе использования эффекта самоорганизации при трении. М.: Машиностроение, 2005. 202 с.
23. Эффект дальнодействия при формировании nanoструктурных топокомпозитов под воздействием комбинированных ионно-плазменных потоков / Коротаев Д.Н., Полещенко К.Н., Еремин Е.Н., Орлов П.В., Вершинин Г.А., Тарасов Е.Е. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2020. Т. 16, № 4 (184). С. 187–192.

References

1. Grigoriev S.N., Vereschaka A.A., Vereschaka, A.S., Kutin A.A. Cutting tools made of layered composite ceramics with nano-scale multilayered coatings. Procedia CIRP, no. 1, pp. 318–323 (2012).
2. Vereshchaka A.S., Karpuschewski B., Dubner L. Development of the method of obtaining nanostructured functional coatings. Proceedings of the Intern. Scient. Conf. "Production. Technology", vol. 1, 62 p. (2008).
3. Smith I.J., Muenz W.D., Donohue L.A., Petrov I., Greene J.E. Improved Ti_{1-x}Al_xN PVD coatings for dry high speed cutting operations. Surf Eng, vol. 14 (1), pp. 37–41 (1998).
4. Blinkov I.V., Volkhonskii A.O., Anikin V.N., Petzhik M.I., Derevtsova D.E. Phase composition

- and properties of wear resistant Ti–Al–Cr–Zr–Nb–N coatings manufactured by the arc physical deposition method. *Inorganic Materials: Applied Research*, vol. 2, no. 3, pp. 285–291 (2011).
5. Volkhonskii A.O., Blinkov I.V., Elyutin A.V., Podstyazhonok O.B. High-performance wear-resistant ion-plasma coatings based on five-component nitrides for a hard-alloy cutting tool operating under constant loads. *Metallurgist*, vol. 54, pp. 374–377 (2010).
 6. Blinkov I.V., Volkhonsky A.O., Podstyazhonok O.B. Structure and properties of multilayer coatings deposited with PVD-arc technology. *Surface engineering*, no. 2, pp. 57–63 (2011).
 7. Upadhyay R., Brossard N., Chen C.H. Mechanisms underlying astringency: introduction to an oral tribology approach. *J. Phys. D: Appl. Phys*, vol. 49, p. 104003 (2016).
 8. Grinberg P.B., Korotaev D.N., Poleshchenko K.N., Surikov V.I. Development and production of nanostructured topocomposites. *Vestnik SibADI* [The Russian Automobile and Highway Industry Journal], 2015, no. 3(43), pp. 39–45. (In Russ.)
 9. Grinberg P.B., Poleshchenko K.N., Goryunov V.N., Tarasov E.E. The method of producing nanostructured topocomposites to increase carrying capacity of structural elements of power equipment. *Vestnik Omskogo universiteta* [Herald of Omsk University], 2012, no. 2, pp. 253–258. (In Russ.)
 10. Poleshchenko K.N., Korotaev D.N., Tarasov E.E. Structural and morphological features of nanostructured topocomposite coatings of a tribotechnical application. *Vestnik SibADI* [The Russian Automobile and Highway Industry Journal], 2016, no. 4(50), pp. 126–132. (In Russ.)
 11. Korotaev D.N., Tarasov E.E., Poleshchenko K.N., Eremin E.N., Ivanova E.V. Formation of wear resistant nanostructural topocomposite coatings on metal materials by ionic-plasma processing. *Journal of Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1050(1), pp. 012037 (2018).
 12. Grinberg P.B., Poleshchenko K.N., Korotaev D. N., Orlov P.V., Vershinin G.A., Tarasov E.E., Ivanova E.V. Receiving nanostructural topocomposite coatings in terms of the cascade cross effect. *Journal of Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1210, pp. 012054 (2019).
 13. Korotaev D.N., Poleshchenko K.N., Eremin E.N., Tarasov E.E. The effect of cluster-gradient architecture of nanostructured topocomposites on features of tribological relations with a heterophase material. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya* [Strengthening Technologies and Coatings], 2020, vol. 16, no. 3 (183), pp. 130–135. (In Russ.)
 14. Moiseenko D.D., Maksimov P.O. The effect of a “chessboard” and forming helical mesostructures at the interface “surface layer – substrate”: simulation by applying a stochastic approach. *Fizicheskaya mezomehanika* [Physical Mesomechanics], 2005, vol. 8, no. 6, pp. 89–96. (In Russ.)
 15. Vereschaka A.S., Vereschaka A.A., Kirillov A.K. Ecologically friendly dry machining by cutting tool from layered composition ceramic with nano-scale multilayered coatings. *Key Eng. Materials*, vol. 496, pp. 67–76 (2012).
 16. Veprek S., Argon A.S. Mechanical properties of super hard nanocomposites. *Surf. Coat. Technol.*, pp. 175–182 (2001).
 17. Panin V.E., Panin A.V. The effect of a surface layer in deformed solids. *Fizicheskaya mezomehanika* [Physical Mesomechanics], 2005, vol. 8, no. 5, pp. 7–15. (In Russ.)
 18. Panin V.E., Panin A.V., Elsukova T.F., Kuzina O.V. The effect of a “chessboard” in distributing stresses and strains at interfaces in loaded bodies: experimental verification and mechanisms of mesoscopic channeling. *Fizicheskaya mezomehanika* [Physical Mesomechanics], 2005, vol. 8, no. 6, pp. 97–105. (In Russ.)
 19. Ivanova V.S., Bushe N.A., Gershman I.S. Structural adaptability to friction as a process of self-organization. *Trenie i iznos* [Friction and Wear], 1997, vol. 18, no. 1, pp. 74–79. (In Russ.)
 20. Kim V.A. *Samoorganizatsiya v protsessakh uprochneniya, treniya i iznashivaniya rezhushchego instrumenta* [Self-organization in processes of hardening, friction and wear of cutting tools]. Vladivostok: Dalnauka, 2001, 203 p. (In Russ.)
 21. Bershadsky L.I. *Strukturnaya termodinamika tribosistem* [Structural thermodynamics of tribological systems]. Kiev: Znanie, 1990, 253 p. (In Russ.)
 22. Migranov M.Sh., Shuster L.Sh. *Intensifikatsiya protsessa metalloobrabotki na osnove ispolzovaniya effekta samoorganizatsii pri trenii* [Intensifying the process of metal treatment by using the effect of self-organization during friction]. Moscow: Mashinostroenie, 2005, 202 p. (In Russ.)
 23. Korotaev D.N., Poleshchenko K.N., Eremin E.N., Orlov P.V., Vershinin G.A., Tarasov E.E. The effect of a long-range action, when forming nanostructured topocomposites by applying combined ion-plasma flows. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya* [Strengthening Technologies and Coatings], 2020, vol. 16, no. 4 (184), pp. 187–192. (In Russ.)

Поступила 29.03.2021; принята к публикации 05.04.2021; опубликована 28.06.2021
Submitted 29/03/2021; revised 05/04/2021; published 28/06/2021

Полещенко Константин Николаевич – доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник научно-исследовательского отдела,
Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СиБАДИ), Омск, Россия.
Email: k_poleschenko@mail.ru. ORCID 0000-0002-8623-4777

Коротаев Дмитрий Николаевич – доктор технических наук, профессор,
Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе, Москва, Россия.
Email: korotaevd99@mail.ru. ORCID 0000-0002-5957-4135

Ерёмин Евгений Николаевич – доктор технических наук, профессор, профессор, Омский государственный технический университет, Омск, Россия.
Email: weld_techn@mail.ru. ORCID 0000-0001-7357-8194

Несов Сергей Николаевич – кандидат физико-математических наук, старший преподаватель, Омский государственный технический университет, Омск, Россия.
Email: nesov55@mail.ru. ORCID 0000-0003-0421-3356

Тарасов Евгений Евгеньевич – инженер-технолог, Федеральный научно-производственный центр «Прогресс», Омск, Россия.
Email: tarasov_ee@mail.ru

Теплоухов Андрей Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, главный специалист, Омский государственный технический университет, ООО «Омсктехуглерод», Омск, Россия.
Email: a.a.lektor@mail.ru. ORCID 0000-0002-5649-2871

Семенюк Наталья Андреевна – кандидат технических наук, старший преподаватель, Омский государственный технический университет, Омск, Россия.
Email: sem-natal@mail.ru. ORCID 0000-0003-0103-7684

Иванова Елена Владимировна – кандидат технических наук, доцент, Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе, Москва, Россия.
Email: elenaivanova-01@mail.ru. ORCID 0000-0003-1107-0533

Ласица Александр Михайлович – кандидат технических наук, доцент, Омский государственный технический университет, Омск, Россия.
Email: lasitsa@mail.ru. ORCID 0000-0002-7187-6400

Иванов Александр Леонидович – кандидат технических наук, доцент, Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), Омск, Россия.
Email: alsib07@yandex.ru

Konstantin N. Poleshchenko – DrSc (Eng.), Professor, Chief Research Officer of the Research Department, Siberian State Automobile and Highway University, Omsk, Russia.
Email: k_poleschenko@mail.ru. ORCID 0000-0002-8623-4777

Dmitriy N. Korotaev – DrSc (Eng.), Professor, Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia.
Email: korotaevd99@mail.ru. ORCID 0000-0002-5957-4135

Evgeniy N. Eremin – DrSc (Eng.), Professor, Omsk State Technical University, Omsk, Russia.
Email: weld_techn@mail.ru. ORCID 0000-0001-7357-8194

Sergey N. Nesov – PhD (Physics and Mathematics), Senior Lecturer, Omsk State Technical University, Omsk, Russia.
Email: nesov55@mail.ru. ORCID 0000-0003-0421-3356

Evgeniy E. Tarasov – process engineer, Federal Research and Production Centre Progress, Omsk, Russia.
Email: tarasov_ee@mail.ru

Andrey A. Teplokhov – PhD (Eng.), Associate Professor, Omsk State Technical University, Chief Specialist, LLC Omsk Carbon Group, Omsk, Russia.
Email: a.a.lektor@mail.ru. ORCID 0000-0002-5649-2871

Natalya A. Semenyuk – PhD (Eng.), Senior Lecturer, Omsk State Technical University, Omsk, Russia.
Email: sem-natal@mail.ru. ORCID 0000-0003-0103-7684

Elena V. Ivanova – PhD (Eng.), Associate Professor, Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia.
Email: elenaivanova-01@mail.ru. ORCID 0000-0003-1107-0533

Alexander M. Lasitsa – PhD (Eng.), Associate Professor, Omsk State Technical University, Omsk, Russia.
Email: lasitsa@mail.ru. ORCID 0000-0002-7187-6400

Alexander L. Ivanov – PhD (Eng.), Associate Professor, Siberian State Automobile and Highway University, Omsk, Russia.
Email: alsib07@yandex.ru

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

NEW TECHNOLOGICAL PROCESSES AND EQUIPMENT

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

УДК 621.762.4:621.891.620

DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-2-79-89



ПОЛУЧЕНИЕ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОЛЕЦ ДЛЯ СЕДЕЛ КЛАПАНОВ ДВС ИЗ АКТИВИРОВАННЫХ ПОРОШКОВ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ

Гасанов Б.Г.¹, Бабец А.В.², Баев С.С.¹

¹ ЮРГПУ (НПИ) имени М.И. Платова, Новочеркасск, Россия

² ООО «Композит Нчк», Новочеркасск, Россия

Аннотация. Показана целесообразность получения цельнопрессованных биметаллических колец и других изделий с рабочими слоями из распыленных порошков быстрорежущих сталей. Установлено, что механоактивация распыленных порошков не способствует росту плотности прессовок. Добавки в шихту порошков пластичных металлов (никеля и меди) улучшают формуемость, незначительно повышают плотность и микротвердость материала формовок. Выявлены закономерности структурообразования межслойных границ и рабочих слоев при спекании цельнопрессованных седел клапанов ДВС. Показано, что на структурообразование и диффузионный массоперенос на указанных границах существенно влияют способ активации порошков, состав шихты, средство компонентов, режим и условия спекания. В зависимости от содержания в шихте никеля и меди микротвердость переходной зоны изменяется в пределах от 2800 до 3200 МПа. Построены концентрационные кривые распределения компонентов в межслойных границах биметаллических образцов различного химического состава, приведены значения коэффициентов взаимной диффузии Fe и Cr в переходной зоне. Выявлено, что после совместного введения порошков меди и никеля они, взаимно растворяясь в процессе спекания, активируют процессы диффузии железа и хрома в переходной зоне. Легирование только никелем приводит к тому, что он связывает хром, образуя твердый раствор сложного состава. Показано, что механические свойства спеченных биметаллических образцов с рабочим слоем на основе распыленных порошков быстрорежущих сталей существенно зависят от условий спекания. После спекания в вакууме предел прочности и относительное удлинение в переходной зоне биметаллических образцов существенно, в 1,5–2 раза, выше по сравнению с образцами, спеченными в диссоциированном аммиаке (ДА).

Ключевые слова: распыленный порошок, активация, биметаллические седла, взаимная диффузия, структурообразование, механические свойства.

© Гасанов Б.Г., Бабец А.В., Баев С.С., 2021

Для цитирования

Гасанов Б.Г., Бабец А.В., Баев С.С. Получение биметаллических колец для седел клапанов ДВС из активированных порошков быстрорежущей стали // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №2. С. 79–89. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-2-79-89>



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

PRODUCING BIMETALLIC RINGS FOR VALVE SEATS OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES FROM ACTIVATED POWDERS OF HIGH-SPEED STEEL

Gasanov B.G.¹, Babets A.V.², Baev S.S.¹

¹ Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia

² LLC Kompozit NCHK, Novocherkassk, Russia

Abstract. This paper shows that it is feasible to produce solid pressed bimetallic rings and other products with working layers of atomized powders of high-speed steels. It was found that the mechanical activation of atomized powders does not contribute to an increase in the density of compacts. Adding powders of ductile metals (nickel and copper) to the charge improves the formability, slightly increases the density and microhardness of the molding material. The authors determined the regularities of the structure formation of interlayer boundaries and working layers during sintering of solid pressed internal combustion engine valve seats. It was shown that the structure formation and diffusion mass transfer at the indicated boundaries were significantly influenced by the method of powder activation, the composition of the charge, the affinity of the components, the mode and conditions of sintering. Depending on the content of nickel and copper in the charge, microhardness of the transition zone varies from 2800 to 3200 MPa. The authors identified concentration curves of the distribution of components in the interlayer boundaries of bimetallic samples of different chemical compositions, and the values of the coefficients of mutual diffusion of Fe and Cr in the transition zone. It was found that after the combined introduction of copper and nickel powders, they activate the diffusion of iron and chromium in the transition zone by mutually dissolving during the sintering process. Alloying with nickel alone leads to the fact that it binds chromium, forming a solid solution of a complex composition. It was shown that the mechanical properties of sintered bimetallic specimens with a working layer based on atomized powders of high-speed steels substantially depended on the sintering conditions. After vacuum sintering ultimate strength and percentage elongation in the transition zone of the bimetallic specimens are significantly higher (by 1.5–2 times) compared to the specimens sintered in dissociated ammonia (DA).

Keywords: atomized powder, activation, bimetallic seats, mutual diffusion, structure formation, mechanical properties.

For citation

Gasanov B.G., Babets A.V., Baev S.S. Producing Bimetallic Rings for Valve Seats of Internal Combustion Engines from Activated Powders of High-Speed Steel. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021, vol. 19, no. 2, pp. 79–89. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-2-79-89>

Введение

Распыленные порошки высоколегированных сталей, содержащие карбиды, бориды, нитриды и другие хрупкие структурные составляющие, отличаются низкими технологическими свойствами. Для повышения плотности и прочности формовок в шихты добавляют различные пластификаторы или перед прессованием их активируют различными способами, например обработкой в планетарных шаровых мельницах [1, 2]. Практический интерес представляют работы, в которых предложены способы формования прессовок из порошков высоколегированных сталей и показаны варианты термомеханического воздействия для повышения механических и эксплуатационных свойств изделий из них [3–5]. Особенno это касается тех работ, которые посвящены разработке технологии получения высоконагруженных деталей, работающих в сложных условиях [6–8]. Например, для седел выпускных клапанов газораспределительных меха-

низмов двигателей внутреннего сгорания (ДВС), которые подвергаются более высоким тепловым и механическим нагрузкам, разработаны альтернативные сплавы на основе порошков быстрорежущих сталей с пониженным содержанием вольфрама, молибдена, кобальта и других металлов [9–13].

Для получения материалов с заданными функциональными характеристиками перспективны исследования, связанные с разработкой технологий получения биметаллических седел клапанов на основе распыленных порошков высоколегированных сталей и сплавов с целью снижения стоимости готовых изделий и повышения их рабочего ресурса за счет изменения структуры и свойств в процессе эксплуатации. Однако при разнородных химических составах слоев биметаллов при их получении могут возникать дефекты в межслойных границах, обусловленные различием их технологических свойств и влиянием диффузионного массопереноса на структурообразование материалов [14, 15].

Целью данной работы является исследование кинетики формирования структуры материалов и разработка технологии получения цельнопрессованных биметаллических седел клапанов ДВС с рабочим слоем из активированных порошков быстрорежущей стали и базовым слоем на основе распыленных порошков железа.

Материалы и методика исследований

Механическую активацию шихты проводили в планетарной шаровой мельнице САНД-1 при скорости вращения 180 об/мин в течение 120 мин и соотношении массы шаров к массе шихты 4:1. Наружный слой кольцевых образцов получали из порошков железа ПЖРВ 2.200.28, внутренний (рабочий) слой – из механоактивированной гетерогенной смеси, состоящей из распыленных порошков быстрорежущей стали РХ-HCX23 производства фирмы Höganäs (Швеция), никеля ПНК-1Л5 и меди ПМС-1. Двухслойные кольцевые и цилиндрические образцы изготавливали статическим холодным прессованием на специальной оснастке.

Часть формовок с исходной пористостью 20–30% спекали при температуре 1120°C в среде диссоциированного аммиака (ДА) в течение 1,5 ч, а другая часть – в вакуумной печи при 1150°C с выдержкой в интервале 1,5–4,5 ч.

Микроструктурные исследования проводили на металлографическом микроскопе «Altami MET-1M» и растровом электронном микроскопе Quanta 200. Микротвердость измеряли на цифровом микротвердомере HVS-1000 и на приборе ПМТ-3 по ГОСТ 9450-76 при нагрузке 0,5 Н. Твердость по Виккерсу измеряли на стационарном твердомере ТП-7Р-1 при нагрузке 50 Н. Рентгенофазовый анализ проводили на рентгеновском порошковом дифрактометре ARL X'TRA Thermo Fisher Scientific. Качественный фазовый анализ осуществляли путём сравнения

полученных дифрактограмм с эталонами из базы данных ICDD PDF-2 2012.

Микрорентгеноспектральный анализ проводили методами электронно-зондовых исследований на растровом электронном микроскопе Tescan VEGA II LMU, оснащенным системой энергодисперсионного микроанализа INCA ENERGY 450/XT производства фирмы OXFORD InstrumentsAnalytical, обеспечивающими возможность проведения элементного анализа в диапазоне от Na до U.

Механические свойства в переходной зоне определяли на специальных биметаллических образцах согласно ГОСТ 1497-84 на разрывной испытательной машине УММ-5.

Результаты исследований и их обсуждение

Поскольку оценочными показателями материалов, влияющими на эксплуатационную надежность пары «клапан – седло» газораспределительного механизма ДВС, являются твердость, прочность, износостойкость, красно- и жаростойкость, то на первом этапе было исследовано влияние исходной пористости и режима спекания цилиндрических образцов из порошков быстрорежущей стали на микротвердость.

Анализ результатов элементного картирования и дифрактограмм порошков стали РХ-HCX23 (рис. 1) показал, что материал частиц представляет собой пересыщенный твердый раствор хрома и других легирующих элементов в α-железе (около 57% (мас.), остальное – карбиды и оксиды металлов (хрома, вольфрама, молибдена и ванадия). Объемную или массовую концентрацию всех структурных составляющих трудно идентифицировать, но можно выделить рефлексы, характерные для карбидов хрома (типа Cr₂₃C₆ и Cr₇C₃), вольфрама и молибдена (рис. 2, а).

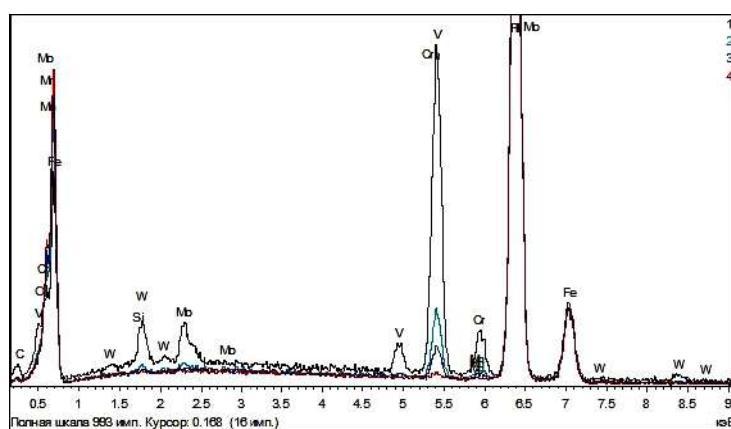


Рис. 1. EDX-спектр порошка РХ-HCX23
Fig. 1. EDX spectrum of PX-HCX23 powder

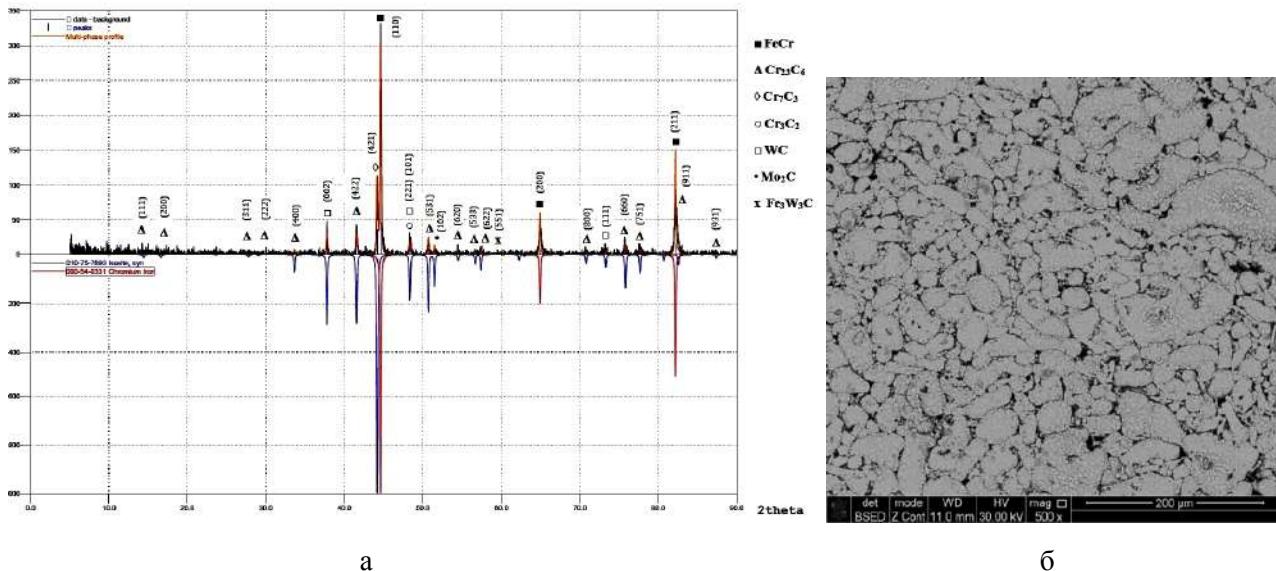


Рис. 2. Дифрактограмма (а) и микроструктура материала прессовки (б) из распыленного порошка быстрорежущей стали РХ – ХСХ23

Fig. 2. Diffraction pattern (a) and microstructure of the compacting material (б) from atomized powder of high-speed steel PX-HCX23

Микротвердость частиц порошка РХ – ХСХ23 в состоянии поставки колебалась в интервале 3000–3500 МПа. После их механоактивации она повысилась на 2–5%, т.е. в пределах погрешности измерений. Нужно отметить, что в процессе обработки в планетарной шаровой мельнице разрушаются конгломераты частиц распыленных порошков, поэтому легирующие добавки достаточно равномерно распределяются по всему объему спеченных образцов (рис. 2, б).

Процесс распыления расплава исследуемых быстрорежущих сталей сопровождается быстрым охлаждением образовавшихся капель, в результате которого сначала кристаллизуются тугоплавкие карбиды металлов. Они расположены, как правило, на периферии полученных частиц и имеют дендритную структуру без заметных осей второго порядка, а выделившиеся в центре – более равноосную конфигурацию (светлый фон на рис. 2, б). Поэтому структура, морфология частиц и распределение компонентов в распыленных порошках быстрорежущих сталей в значительной степени определяют технологические характеристики шихты.

При прессовании порошков РХ – ХСХ23 до и после их механоактивации конфигурация частиц мало изменяется. Это связано с тем, что уплотнение происходит в основном за счет структурной деформации. Остаточная пори-

стость формовок при давлении прессования 800 МПа составляла 23% (рис. 3, а, кривая 1), после спекания в ДА и вакууме она практически не изменяется (рис. 3, б, в, кривая 1). В случае, когда перед обработкой в шаровой мельнице в шихту добавляли по 5% (мас.) порошков никеля и меди, пористость формовок при том же давлении прессования снизилась до 21% (рис. 3, а, кривая 4).

После спекания в ДА при 1120°C в течение 1,5 ч пористость формовок и порошка РХ – ХСХ23, прессованных при давлении 600 МПа, практически не изменилась и составила 26–27% (рис. 3, б, кривая 1), а микротвердость в разных участках повысилась с 4500–5500 до 6500–8000 МПа. Такое изменение микротвердости обусловлено тем, что при спекании из пересыщенного твердого раствора выделяются дисперсные карбиды хрома, молибдена и вольфрама. После спекания в вакууме с выдержкой 4,5 ч плотность тех же образцов повышается с 5,74 до 6,41 г/см³, а пористость, соответственно, снижается с 27 до 23–24% (рис. 3, в, кривая 1). Твердость прессовок из порошков РХ – ХСХ23 после спекания в вакууме составляет около 2300 МПа. Это связано с тем, что при повышении температуры и времени спекания в вакууме при 1150°C, 4,5 ч карбиды металлов частично растворяются в austenite.

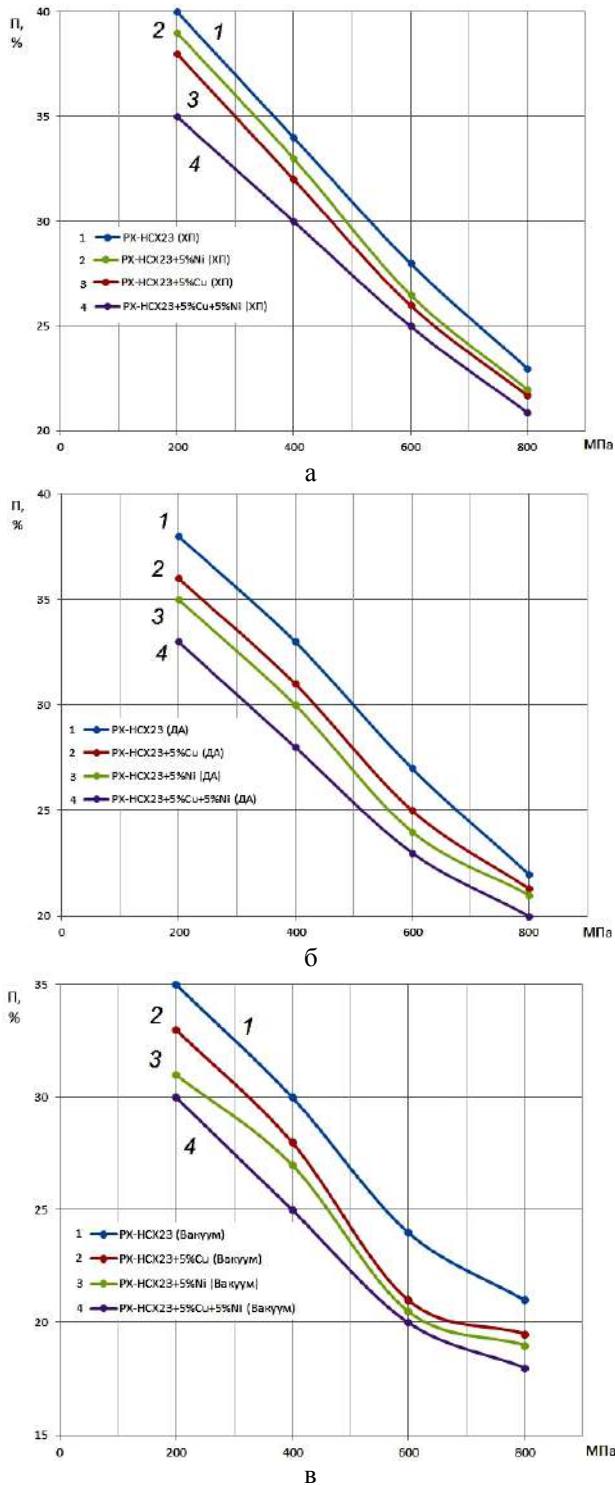


Рис. 3. Влияние давления прессования на пористость образцов из порошков быстрорежущей стали РХ-НСХ23 (с добавками и без них) после:
а – ХП; б – спекания при 1120°C, 1,5 ч в ДА;
в – спекания при 1150°C, 4,5 ч в вакууме

Fig. 3. Influence of molding pressure on porosity of the samples made of PX-HCX23 high-speed steel powders (with and without additives) after: a is CP; б is sintering at 1120°C, 1.5h in DA; в is vacuum sintering at 1150°C, 4.5h

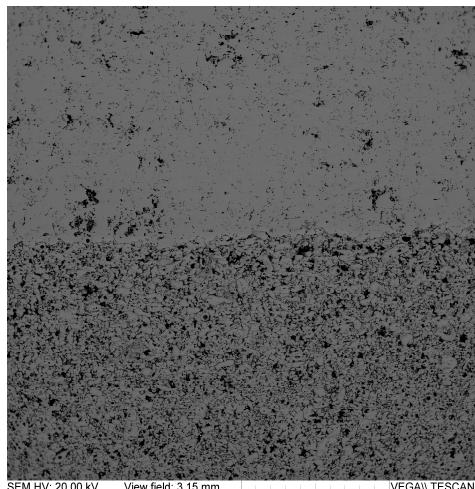
При последующем охлаждении дополнительно выделяются более крупные вторичные карбиды. Поэтому микротвердость матрицы стала снижаться до 4900 МПа. Аналогично изменяется плотность и микротвердость прессовок из смеси порошков РХ – НСХ23 + Cu, РХ – НСХ23 + Ni, РХ – НСХ23 + Cu + Ni. В частности, пористость формовок из механоактивированной шихты РХ – НСХ23 + Cu + Ni, прессованных при Р = 600 МПа (П=25%), после спекания в ДА составила около 23% (рис. 3, б, кривая 4), а в вакууме она снизилась до 20% (рис. 3, в, кривая 4).

Микротвердость в переходной зоне биметаллических образцов исходной пористостью 18–24% с разным химическим составом рабочего слоя также зависит от условий спекания (рис. 4). После спекания образцов в ДА при 1120°C с выдержкой 1,5 ч в разных зонах межслойных границ в зависимости от содержания в шихте порошка никеля и меди HV0,05 изменяется в пределах от 2800 до 3200 МПа (рис. 4, кривые 1 и 2). В процессе спекания в вакууме хром и другие металлы более активно диффундируют в железо, микротвердость матрицы в переходной зоне биметаллических образцов плавно снижается до 2000–2200 МПа (рис. 4, кривые 3 и 4).

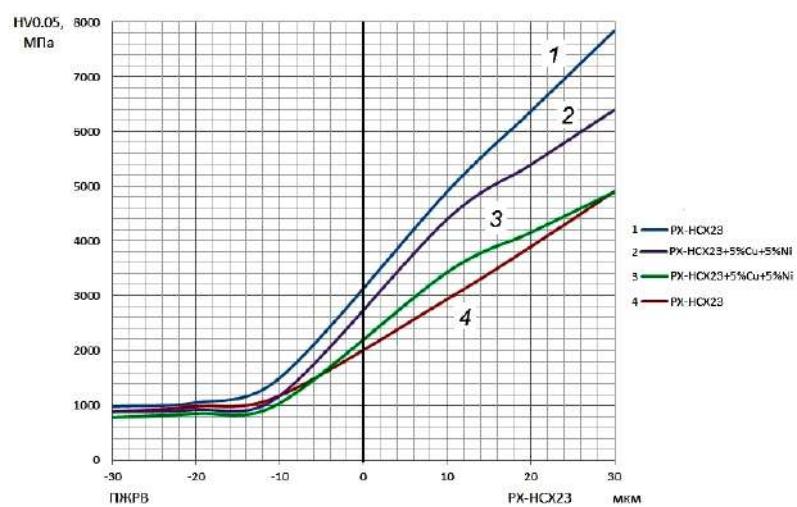
Для изучения влияния режима механоактивации и химического состава шихты исследуемых материалов на диффузионный массоперенос в переходной зоне проводили элементный анализ распределения компонентов в различных участках межслойных границ биметаллических цельнопрессованных образцов. При этом концентрацию компонентов определяли как по среднестатистическим значениям, полученных в отдельных точках, так и по результатам картирования.

На рис. 5, 6 показано распределение компонентов на одном участке переходной зоны биметаллических образцов из механоактивированного порошка РХ-НСХ23 без добавок и с добавками никеля и меди, а также распыленного порошка ПЖРВ 2.200.28 после спекания в ДА при 1120°C, 1,5 ч.

Нужно отметить, что на фотографиях микроструктуры межслойных границ (рис. 5, а и 6, а) диффузионная зона имеет более светлый фон, а фазы, имеющие более высокий средний атомный вес, окрашены в более темные тона. На участках картирования на рис. 6 более темный фон имеют карбиды хрома (в), молибдена (г) и вольфрама (д). Это подтверждают и кривые распределения компонентов в сплаве и переходной зоне.



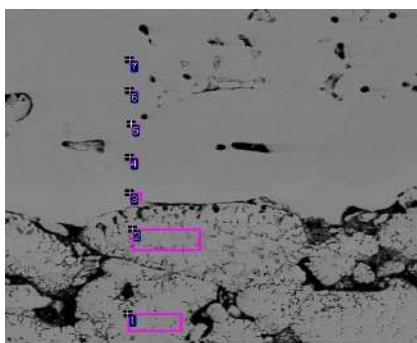
а



б

Рис. 4. Микроструктура межслойной границы (а) и влияние химического состава шихты на микротвердость в переходной зоне биметаллических материалов (б) из порошков РХ – НСХ23 (с добавками и без них) при спекании в ДА (1, 2) и вакууме (3, 4)

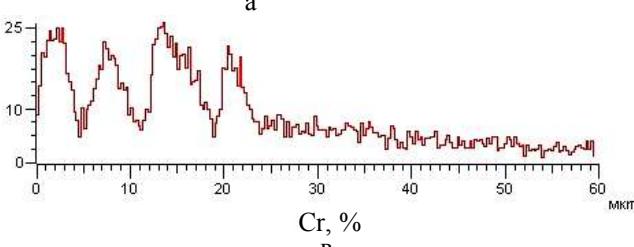
Fig. 4. Microstructure of the interlayer boundary (a) and the effect of the chemical composition of the charge on microhardness in the transition zone of bimetallic materials (б) from PX-HCX23 powders (with and without additives) during sintering in DA (1, 2) and in vacuum (3, 4)



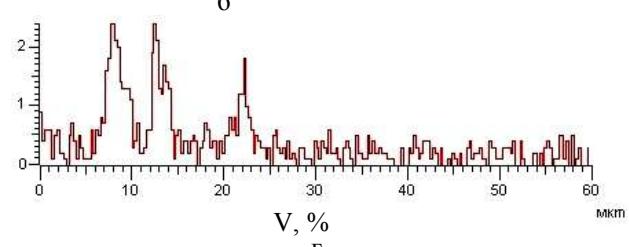
а

	V, %	Cr, %	Fe, %	Mo, %	W, %
1	2,45	23,04	68,46	2,61	2,28
2	2,12	16,99	75,17	2,25	1,60
3	0,24	7,45	89,52	1,09	0,43
4	0,16	1,77	97,15	0,28	0,32
5	0,15	0,66	98,44	0,14	0,24
6	0,23	0,35	99,37	0,10	0,09
7	0,03	0,05	99,51	0,01	0,01

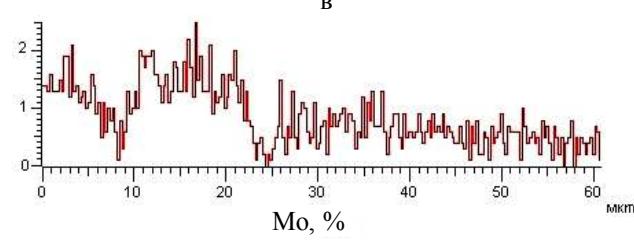
б



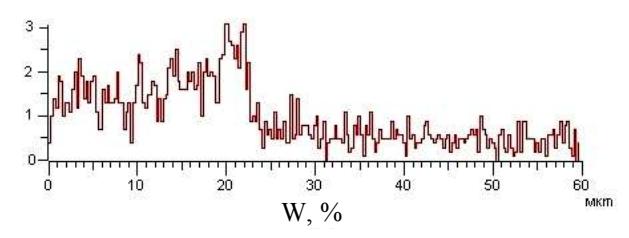
в



г



д



е

Рис. 5. Микроструктура (а), распределение компонентов (масс. %) в разных точках (б) и концентрация элементов (ат. %) по результатам картирования (в – Cr; г – V; д – Mo; е – W) на межслойной границе биметаллического образца

Fig. 5. Microstructure (a), distribution of components (wt.%) at different points (б) and concentration of elements (at.%) according to the results of mapping (в is Cr; г is V; д is Mo; е is W) at the interlayer boundary of the bimetallic sample

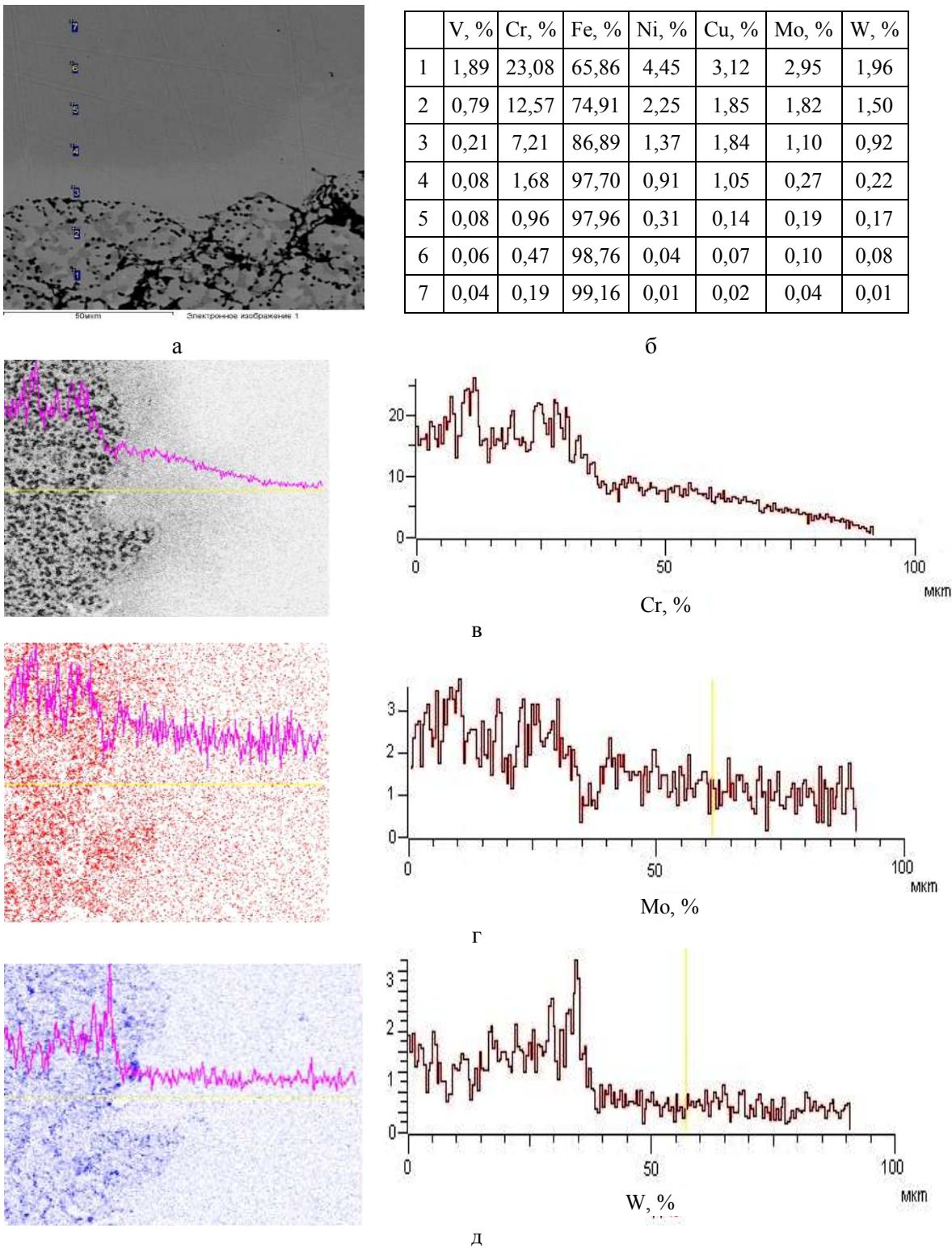


Рис. 6. Микроструктура (а), распределение компонентов (масс. %) в разных точках (б) и концентрация элементов (ат. %) по результатам картирования (в – Cr; г – Mo; д – W) на межслойной границе биметаллического образца

Fig. 6. Microstructure (a), distribution of components (wt.%) at different points (б) and concentration of elements (at.%) according to the results of mapping (в is Cr; г is Mo; д is W) at the interlayer boundary of the bimetallic sample

По результатам исследований построены концентрационные кривые распределения компонентов в переходной зоне исследуемых биметаллических образцов (рис. 7). Ширина диффузационной зоны Cr на межслойных границах биметаллических образцов после спекания при 1120°C в течение 1,5 ч составила около 55–60 мкм. В случае совместного добавления в шихту из порошка быстрорежущей стали 5% Cu и 5% Ni она достигает 80–110 мкм, а при введении в шихту только Ni ее ширина составляет 40–45 мкм (см. рис. 7). Эти данные показывают, что после совместного введения порошков меди и никеля они, взаимно растворяясь в процессе спекания, активируют процессы диффузии железа и хрома в переходной зоне. Легирование только никелем приводит к тому, что он связывает хром, образуя твердый раствор сложного состава.

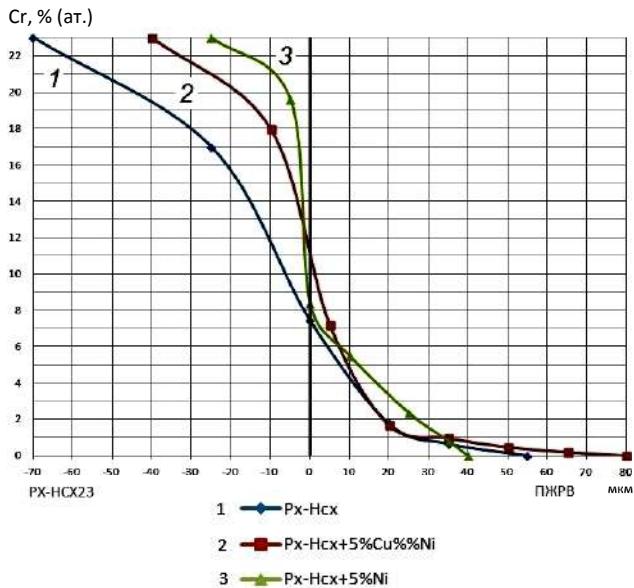


Рис. 7. Концентрационные кривые распределения хрома на межслойных границах биметаллических образцов без добавок (1), с добавками в шихту порошков никеля и меди (2), с добавками только никеля (3)

Fig. 7. Concentration curves of the distribution of chromium at the interlayer boundaries of bimetallic samples without additives (1), with additives of nickel and copper powders to the charge (2), only nickel additives (3)

Для снижения погрешности расчета коэффициентов взаимной диффузии компонентов \tilde{D} в переходной зоне проводили сглаживание концентрационных кривых на основе статистической обработки результатов картирования 4–5 зон каждого образца. По полученным кривым

определяли \tilde{D} графическим методом Матано [16]. Этот метод позволяет относительно точно количественно оценивать значения \tilde{D} при концентрациях компонентов в пределах от 10 до 90% (ат.-%). Анализ результатов эксперимента позволяет заключить, что при добавлении только никеля в шихту из механоактивированных порошков быстрорежущей стали РХ-НСХ23 он активно растворяется в матрице, образуя с хромом твердый раствор, т.е. никель блокирует диффузию хрома в железо. Если в шихте содержится одновременно и медь, и никель, то после механоактивации они не только интенсивно независимо взаимно растворяются друг в друге, т.к. имеют изоморфное кристаллическое строение, но и активируют взаимную диффузию хрома и никеля.

Ранее показано, что зависимость коэффициентов взаимодиффузии компонентов от концентрации в парах из чистых металлов заметно выше, чем парах из их сплавов [16]. Анализ полученных результатов проведенных исследований также подтверждает, что на диффузионный массоперенос существенно влияют такие факторы, как способ активации порошков, химическое сродство компонентов, плотность и характер распределения неравновесных вакансий, обусловленные прежде всего объемом и конфигурацией пор и др.

В качестве примера в данной работе приведены значения коэффициентов взаимной диффузии Fe и Cr в переходной зоне биметаллических образцов различного химического состава. Авторами [17] установлено, что при спекании формовок из гетерогенных порошковых смесей, содержащих Fe и Cr, коэффициент их взаимной диффузии зависит от концентрации хрома и имеет при температуре спекания 1200°C максимальное значение $(2,5\text{--}5,0)\cdot10^{-12}\text{ м}^2/\text{с}$ при содержании в смеси около 10–15% Cr (ат.). В исследуемых диффузионных парах наибольшие значения коэффициентов взаимной диффузии при 1120°C $\tilde{D}_{\text{Fe-Cr}} = (4,5\text{--}5,0)\cdot10^{-14}\text{ м}^2/\text{с}$ получены при содержании хрома около 15–20% (ат.) (рис. 8, кривая 1).

После одновременного введения в шихту меди и никеля коэффициенты взаимной диффузии хрома и железа несколько снижаются (рис. 8, кривая 2). В частности, если содержание хрома в шихте составляет 8–12 % (ат.), то $\tilde{D}_{\text{Fe-Cr}}$ снизился до $(2,5\text{--}3,6)\cdot10^{-14}\text{ м}^2/\text{с}$. С уменьшением кон-

центрации хрома в сплаве до 5,0–10 % (ат.), в обоих случаях $\tilde{D}_{\text{Fe-Cr}}$ плавно снижается до $(2,0\text{--}3,0)\cdot10^{-14}$ м²/с. В случае добавления только никеля в шихту, содержание хрома 5,0–15,5% (ат.) на коэффициент $\tilde{D}_{\text{Fe-Cr}}$ в переходной зоне влияния практически не оказывает (рис. 8, кривая 3).

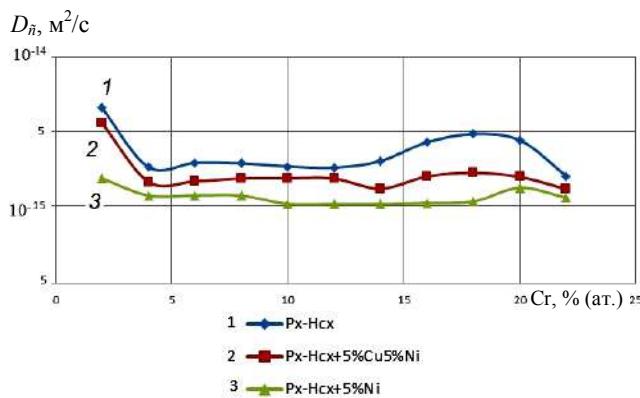


Рис. 8. Зависимость коэффициента взаимной диффузии от концентрации хрома: без введения легирующих элементов в шихту (1), с добавлением в шихту по 5% (масс.) Cu и Ni (2), с добавлением в шихту только 5% (масс.) Ni (3)

Fig. 8. Dependence of the coefficient of mutual diffusion on the concentration of chromium: without adding alloying elements to the charge (1); with the addition of 5% (wt.) of Cu and Ni to the charge (2); with the addition of only 5% (wt.) of Ni to the charge (3)

В качестве примера в таблице приведены результаты испытаний на растяжение некоторых биметаллических образцов с пористостью 19–27% из порошков железа и быстрорежущей стали после спекания в ДА и вакууме. Предел прочности σ_b и относительное удлинение δ спеченных в вакууме образцов одинакового состава и пористости существенно выше в сравнении с образцами, спеченными в ДА. Температура и время спекания в меньшей степени влияют на σ_b и δ . Эти величины существенно зависят от структуры материала быстрорежущей стали. Экспериментально установлено, что при спекании сплавов в вакууме формируется достаточно однородная структура с равномерным распределением карбидов и упрочненной матрицей. В образцах, спеченных в ДА, структура неоднородная, только частично протекает межчастичное сращивание частиц быстрорежущей стали. Поэтому биметаллические образцы, спеченные в ДА, разрушаются в основном по материалу быстрорежущей стали.

Таблица. Результаты испытаний спеченных биметаллических образцов из исследуемых материалов на растяжение

Table. Tensile tests of sintered bimetallic specimens from the materials under study

Химический состав и пористость образцов	Режим и среда спекания	σ_b , МПа	δ , %
PX-HCX23-ПЖРВ, П = 26–27%	1150°C, 1,5 ч в (ДА)	112–184	1,6–2,6
PX-HCX23+5%Cu+5%Ni-ПЖРВ, П=23–24 %	1150°C, 1,5 ч в (ДА)	150–210	2,6–2,9
PX-HCX23-ПЖРВ, П = 23–24 %	1150°C, 1,5 ч (Вакуум)	430–601	2,8–4,0
PX-HCX23+5%Cu+5%Ni-ПЖРВ, П= 19–20 %	1150°C, 1,5 ч (Вакуум)	475–680	3,5–4,4

Заключение

1. Установлено, что механоактивация распыленных порошков быстрорежущих сталей не способствует росту плотности прессовок. Добавки в шихту порошков пластичных металлов (никеля и меди) улучшают их формуемость, но незначительно повышают плотность и микротвердость материала.

2. Выявлены закономерности структурообразования межслойных границ и рабочих слоев при спекании цельнопрессованных биметаллических образцов. Показано, что на структурообразование и диффузионный массоперенос на межслойных границах существенно влияют способ активации порошков и состав шихты, средство компонентов, режимы и условия спекания. В зависимости от содержания в шихте порошка никеля и меди микротвердость переходной зоны изменяется в пределах от 2800 до 3200 МПа.

3. Построены концентрационные кривые распределения компонентов в межслойных границах биметаллических образцов различного химического состава, приведены значения коэффициентов взаимодиффузии Fe и Cr в переходной зоне. Выявлено, что после совместного введения порошков меди и никеля они, взаимно растворяясь в процессе спекания, активируют процессы диффузии железа и хрома в переходной зоне. Легирование только никелем приводит к тому, что он связывает хром, образуя твердый раствор сложного состава.

4. Показано, что механические свойства спеченных биметаллических образцов с рабочим слоем на основе распыленных порошков быстрорежущих сталей существенно зависят от условий спекания. После спекания в вакууме предел прочности в переходной зоне и относительное удлинение образца возрастают в 1,5–2,0 раза по сравнению с образцами, спеченными в ДА.

Список литературы

1. Принципы расчета параметров работы планетарной мельницы, обеспечивающих получение шихт с требуемыми технологическими свойствами / Дорофеев Ю.Г., Волкин Д.Б., Мирошников В.И., Бабец А.В. // Порошковые и композиционные материалы. Структура, свойства, технология: сб. науч. тр. / Юж.-Рос. гос. техн. ун-т им. М.И. Платова. Новочеркасск: ЮРГТУ, 2001. С. 72–76.
2. The quality of hot-stamped powder carbide steel / Y.G. Dorofeev, V.Y. Dorofeev, L.I. Svistun, G.G. Serdyuk // Steel in Translation, 2013. Vol. 43. № 5. Pp. 331–334.
3. Свистун Л.И., Павлыго Т.М., Дмитренко Д.В. Технология горячей штамповки порошков карбидосталей типа легированная сталь – карбид // Технология металлов. 2009. № 6. С. 30–36.
4. Прюммер Р. Обработка порошкообразных материалов взрывом. М.: Мир, 1990. 124 с.
5. Влияние режима двухступенчатого спекания на структурообразование и свойства порошковых цельнопрессованных биметаллических материалов на основе железа / Гасанов Б.Г., Передерий В.Г., Ефимов А.Д., Баев С.С. // Изв. вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2018. № 2. С. 23–34.
6. Study of the mechanical and metallurgical properties of sintered steels for valve seat inserts application / Gomes M.P., Santos I.P., Mucsi C.S., Colosio M.A., Rossi J.L. // Proceedings of the VII Encontro Científico de Física Aplicada. Serra, ES, Brazil, 2016, pp. 59–61.
7. Heat Treatment of Sintered Valve Seat Inserts / M.P. Gomes, I. Santos, C.P. Couto, E.G. Betini, L.A.M. Reis, C.S. Mucsi, M. Colosio, J.L. Rossi // Materials Research, 2018, pp. 1–10.
8. Sintered Valve Seat Inserts – Microstructural Characterization / Filho E.S. Jesus, E.R.B. Jesus, L. Salgado, S.L. Jesus, M.A. Colosio, J.C. Santos, et al // Materials Science Forum, 2006, pp. 65–70.
9. Sintering of AISI M2 high-speed steel with the addition of NbC / Wentzcovitch A., Ambrozio Filho F., Silva L.C.E., Neves M.D.M. // Materials Science Forum, 2012, pp. 90–95.
10. Machining. P/M High-Speed Tool Steels / Pinnow K.E., Stasko W. // ASM Handbook, 1995, pp. 127–145.
11. The Development of a High-Speed Steel Based Sintered Material for High Performance Exhaust Valve Seat Inserts / Kawata H., Hayashi K., Ishii K., Maki K., Ehira A., Toriumi M. // SAE Technical Paper in United States. 1998.
12. Kawata H., Maki K. Development of high performance valve seat insert materials for gas engines // Powder Metallurgy Technology, 2011, pp. 64–65.
13. Basshuysen R., Schäfer F. Internal Combustion Engine. Basics, Components, Systems, and Perspectives // Handbook. Warrendale, PA, 2004. pp. 174–182.
14. Contact Interaction Peculiarities at the Boundary of Layers of Structural Steel – High-Speed Steel Hot-Forged Powder Bimetal / Dorofeyev Yu. G., Dorofeyev V. Yu., Babets A. V., Bessarabov E. N., Romanova O. N., Sviridova A. N. // Russian Journal of Non-Ferrous Metals, 2018. Vol. 59. No 6. Pp. 643–652.
15. Порошковые горячештамповые биметаллы железографит-карбидосталь, технология получения, структура, свойства / Бессарабов Е.Н., Дорофеев Ю.Г., Дорофеев В.Ю., Ганшин А.В. // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2014. № 3. С. 54–58.
16. Процессы взаимной диффузии в сплавах / Боровский И.Б., Гуров К.П., Марчукова И.Д., Угасте Ю.Э. М.: Наука, 1973. 359 с.
17. Perederi V.G., Gasanov B.G., Sirotin P.V. Determination Features of the Component Diffusion Coefficient of the Fe-Cr-Ni-Gr Powder Systems Sintering. Materials Science Forum, 2016. 870 p.

References

1. Dorofeev Yu.G., Volzhin D.B., Miroshnikov V.I., Babets A.V. Principles of calculating the parameters of the planetary mill, ensuring the production of charges with the required technological properties. *Poroshkovye i kompozitsionnye materialy. Struktura, svoystva, tekhnologiya. Sb. nauch. tr.* [Powder and composite materials. Structure, properties, technology. Proceedings]. Novocherkassk: Platov South-Russian State Technical University, 2001, pp. 72–76. (In Russ.)
2. Dorofeev Y.G., Dorofeev V.Y., Svistun L.I., Serdyuk G.G. The quality of hot-stamped powder carbide steel. Steel in Translation, vol. 43, no. 5, pp. 331–334 (2013).
3. Svistun L.I., Pavlygo T.M., Dmitrenko D.V. Technology of hot stamping of carbide steel powders of the alloy steel–carbide type. *Tekhnologiya metallov* [Technology of Metals], 2009, no. 6, pp. 30–36. (In Russ.)
4. Prümmer R. *Obrabotka poroshkoobraznykh materialov vzryvom* [Processing of powdery materials by explosion]. Moscow: Mir, 1990, 124 p. (In Russ.)
5. Gasanov B.G., Perederiy V.G., Efimov A.D., Baev S.S. Influence of a two-stage sintering schedule on the structure formation and properties of solid pressed iron-based bimetallic materials. *Izv. vuzov. Poroshkovaya metallurgiya i funktsionalnye pokrytiya* [Universities' Proceedings. Powder Metallurgy and Functional Coatings], 2018, no. 2, pp. 23–34. (In Russ.)
6. Gomes M.P., Santos I.P., Mucsi C.S., Colosio M.A., Rossi J.L. Study of the mechanical and metallurgical properties of sintered steels for valve seat inserts application. Proceedings of the 7th Encontro Científico de Física Aplicada. Serra, ES, Brazil, 2016, pp. 59–61.
7. Gomes M.P., Santos I., Couto C.P., Betini E.G., Reis L.A.M., Mucsi C.S., Colosio M., Rossi J.L. Heat treatment of sintered valve seat inserts. Materials Research, pp. 1–10 (2018).
8. Filho E.S. Jesus, E.R.B. Jesus, L. Salgado, S.L. Jesus, M.A. Colosio, J.C. Santos et al. Sintered valve seat inserts - microstructural characterization. Materials Science Forum, 2006, pp. 65–70.
9. Wentzcovitch A., Ambrozio Filho F., Silva L.C.E., Neves M.D.M. Sintering of AISI M2 high-speed steel with the addition of NbC. Materials Science Forum, 2012, pp. 90–95.

10. Pinnow K.E., Stasko W. Machining. P/M high-speed tool steels. ASM Handbook, pp. 127–145 (1995).
11. Kawata H., Hayashi K., Ishii K., Maki K., Ehira A., Torigumi M. The development of a high-speed steel based sintered material for high performance exhaust valve seat inserts. SAE Technical Paper in United States (1998).
12. Kawata H., Maki K. Development of high performance valve seat insert materials for gas engines. Powder Metallurgy Technology, pp. 64–65 (2011).
13. Basshuysen R., Schäfer F. Internal combustion engine. Basics, components, systems, and perspectives. Handbook. Warrendale, PA, pp. 174–182 (2004).
14. Dorofeyev Yu.G., Dorofeyev V.Yu., Babets A.V., Bessarabov E.N., Romanova O.N., Sviridova A.N. Contact interaction peculiarities at the boundary of layers of structural steel – high-speed steel hot-forged powder bimetal. Russian Journal of Non-Ferrous Metals, vol. 59, no. 6, pp. 643–652 (2018).
15. Bessarabov E.N., Dorofeev Yu.G., Dorofeev V.Yu., Ganshin A.V. Powder hot-stamped bimetals iron-graphite-carbidosteel, production technology, structure, properties. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki* [Universities' Proceedings. North Caucasian Region. Technical Sciences], 2014, no. 3, pp. 54–58. (In Russ.)
16. Borovskiy I.B., Gurov K.P., Marchukova I.D., Ugaste Yu.E. *Protsessy vzaimnoy diffuzii v splavakh* [Processes of mutual diffusion in alloys]. Moscow: Nauka, 1973, 359 p. (In Russ.)
17. Perederi V.G., Gasanov B.G., Sirotin P.V. Determination features of the component diffusion coefficient of the Fe-Cr-Ni-Gr powder systems sintering. Materials Science Forum, 870 p. (2016).

Поступила 24.02.2021; принята к публикации 10.03.2021; опубликована 28.06.2021
Submitted 24/02/2021; revised 10/03/2021; published 28/06/2021

Гасанов Бадрудин Гасанович – доктор технических наук, профессор,
ЮРГПУ (НПИ) им. М.И. Платова, Новочеркасск, Россия.
Email: gasanov.bg@gmail.com

Бабец Александр Васильевич – кандидат технических наук, директор,
ООО «Композит НЧК», Новочеркасск, Россия.
Email: babets@kompozite.ru

Баев Сергей Сергеевич – аспирант,
ЮРГПУ (НПИ) им. М.И. Платова, г. Новочеркасск, Россия.
Email: baiev93@mail.ru

Badrudin G. Gasanov – DrSc (Eng.), Professor, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia. Email: gasanov.bg@gmail.com

Alexander V. Babets – PhD (Eng.), Director of LLC Kompozit NCHK, Novocherkassk, Russia.
Email: babets@kompozite.ru

Sergey S. Baev – postgraduate student, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia. Email: baiev93@mail.ru

НАДЕЖНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

RELIABILITY AND DURABILITY OF METALLURGICAL EQUIPMENT

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.7
DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-2-90-97



ВЫБОР СОСТАВА ОБОРУДОВАНИЯ ГЛАВНОЙ ЛИНИИ ПРОКАТНОГО СТАНА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ТРУБ С ОРЕБРЕНИЕМ

Некрасов И.И., Федулов А.А., Паршин В.С.

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

Аннотация. Постановка задачи. В настоящее время вопросам энергосбережения уделяется значительное внимание в связи с ограниченностью природных ресурсов и все возрастающим техногенным загрязнением окружающей среды. Абсорбционные холодильные машины отличают от других холодильных машин возможность использования вторичных тепловых ресурсов, таких как сбросы ТЭЦ, тепловые отходы промышленных предприятий. Они широко применяются в системах кондиционирования и теплоснабжения, отличаются экономичностью, безопасностью и малошумностью. В конструкциях данных машин в целях повышения эффективности работы, снижения металлоемкости и габаритов применяют трубы с внутренним оребрением. Изготовление труб с внутренним оребрением возможно методами резания, накатки оребрения и прокатки полос с оребрением с последующей формовкой в трубу. Наиболее эффективным для производства труб с внутренним оребрением является способ с применением прокатки оребренных полос с последующей формовкой, отличающийся высокой производительностью и качеством получаемых труб. Целью данного исследования являлись: оценка состава оборудования главной линии стана кварто $55 \times 260 \times 220$, ее несущей способности, выбор рациональной схемы главной линии стана для прокатки полос с оребрением. **Используемые методы.** Для нахождения значений моментов от технологической нагрузки при прокатке полос с оребрением, входящих в дифференциальные уравнения, произведен расчет данного процесса прокатки с использованием конечно-элементной модели. Созданная конечно-элементная модель позволяет определять усилия и моменты прокатки на валках с учетом натяжения концов прокатываемой полосы для различных видов наносимого оребрения. Для обеих схем произведено определение динамических нагрузок на звеньях главной линии стана путем составления динамической модели и решения соответствующей системы дифференциальных уравнений. **Результаты.** В результате проведенных расчетов получены значения: коэффициентов динамичности нагрузок, действующих на звеньях главного привода, коэффициентов запаса по напряжениям в теле шпиндельных устройств при действии циклических нагрузок, коэффициентов запаса по моменту на моторной муфте. **Практическая значимость.** Проведенный анализ нагруженности элементов главной линии стана кварто $55 \times 260 \times 220$ позволил произвести оценку его оборудования с точки зрения прокатки оребренных полос, предназначенных для производства труб с внутренним оребрением, и обосновать рациональность выбора состава оборудования главной линии прокатного стана для производства такого вида труб с приводом через опорные валки.

Ключевые слова: абсорбционные холодильные машины, трубы с оребрением, главная линия прокатного стана, прокатка полос, конечно-элементное моделирование, динамика нагружения оборудования.

© Некрасов И.И., Федулов А.А., Паршин В.С., 2021

Для цитирования

Некрасов И.И., Федулов А.А., Паршин В.С. Выбор состава оборудования главной линии прокатного стана для производства труб с оребрением // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №2. С. 90–97. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-2-90-97>



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

CHOOSING THE COMPONENTS OF THE ROLLING MILL MAIN LINE FOR THE RIBBED TUBE PRODUCTION

Nekrasov I.I., Fedulov A.A., Parshin V.S.

Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

Abstract. Problem statement. At present, considerable attention is paid to the issues of energy saving due to limited natural resources and the increasing technology-related pollution of the environment. Absorption refrigerators differ from other cooling machines by the possibility of using secondary heat resources, such as discharges from thermal power plants, thermal waste from industrial enterprises. They are widely used in air conditioning and heating systems because of their energy-saving features, high reliability and quiet working conditions. In the design of these machines, in order to increase the efficiency of their operation, reduce the metal consumption and sizes, internally ribbed tubes are used. The production of internally ribbed tubes is possible by cutting, rolling the ribbing and rolling strips with such ribbing followed by forming into a tube. The most effective method for the production of internally ribbed tubes is a method of using rolling of ribbed strips with subsequent forming, which is characterized by high productivity and quality of the finished tubes. This study was aimed at assessing the equipment composition of the main line of quarto mill 55×260×220, its bearing capacity, the selection of a reasonable layout of the main line of the mill for rolling strips with the one-side ribbing. **Methods used.** To find the values of the torque from the technological load in rolling strips with the ribbing included in the differential equations, the simulation of this rolling process was performed using a FE model. The designed model makes it possible to determine the forces and torque of rolling taking into account tension of the ends of the rolled strip for various types of the applied ribbing. Dynamic loads on the links of the main line of the mill were determined for both layouts by compiling a dynamic model and solving the corresponding system of differential equations. **Results.** The authors obtained the following values: dynamic load factors acting on the links of the main drive, safety factors for stresses in the volume of the spindle devices under cyclic loads, and safety factors for torque on the motor coupling. **Practical relevance.** The analysis of the loading on the elements of the main line of quarto mill 55×260×220 made it possible to assess the equipment from the point of view of rolling ribbed strips intended for the production of internally ribbed tubes and to substantiate the rationality of the choice of the main line components for the rolling mill driven through back-up rolls.

Keywords: absorption refrigerators, ribbed tubes, main line of the rolling mill, strip rolling, FE simulation, equipment loading dynamics.

For citation

Nekrasov I.I., Fedulov A.A., Parshin V.S. Choosing the Components of the Rolling Mill Main Line for the Ribbed Tube Production. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021, vol. 19, no. 2, pp. 90–97. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-2-90-97>

Введение

При изготовлении абсорбционных холодильных агрегатов с целью повышения эффективности теплопередачи применяют трубы с внутренним оребрением из углеродистых марок сталей (рис. 1) [1–6]. Технология получения таких труб включает: нанесение оребрения на полосу в линии полосового прокатного стана, установку рулона оребренной полосы на разматыватель трубоэлектросварочного агрегата (ТЭСА), последующую формовку, сварку, калибровку и порезку полученной оребренной трубы на мерные длины, отжиг в печи с защитной атмосферой [7].

Существующие ТЭСА, предназначенные для производства труб с гладкой поверхностью, позволяют получать трубы с внутренним оребрением, совмещающая высокое качество с производительностью.

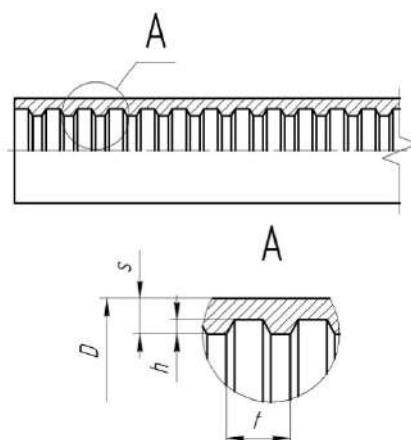


Рис. 1. Труба с внутренним кольцевым оребрением: D – наружный диаметр; s – толщина стенки; h – высота оребрения; t – шаг оребрения

Fig. 1. Internal spiral-ribbed tube: D is an outer diameter; s is wall thickness; h is rib height; t is a rib pitch

Прокатный стан, применяемый для нанесения оребрения, также должен отвечать требованиям к качеству получаемых полос, надежности, производительности и экономичности. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования процесса прокатки полос с односторонним попечным оребрением, а также получение опытно-промышленной партии труб с внутренним оребрением показали, что наилучшим прототипом при создании оборудования для нанесения оребрения на полосу является стан кварт 55×260×220 ОАО АХК «ВНИИметмаш» (рис. 2).

Энергосиловые характеристики данного стана, типоразмеры прокатываемых полос, скорость прокатки удовлетворяют параметрам технологического процесса оребрения. Возможно ведение процесса прокатки как с приводом на рабочие валки, так и с приводом на опорные валки рабочей клети стана. Стан оборудован разматывате-

лем и моталкой, позволяющими производить прокатку полосы в рулонах.

Следует заметить, что прокатка оребренных полос сопровождается появлением переменных во времени нагрузок, характер которых зависит от вида наносимого оребрения и геометрии прокатных валков.

Целью данного исследования являлись: оценка состава оборудования главной линии стана Кварт 55×260×220, ее несущей способности, выбор рациональной схемы оборудования главной линии стана для прокатки полос с оребрением. При этом рассмотрены схемы главной линии прокатного стана согласно рис. 3.

Исключение редуктора привода при достаточной мощности установленного электродвигателя позволяет повысить КПД привода, уменьшить его габариты и снизить эксплуатационные расходы.

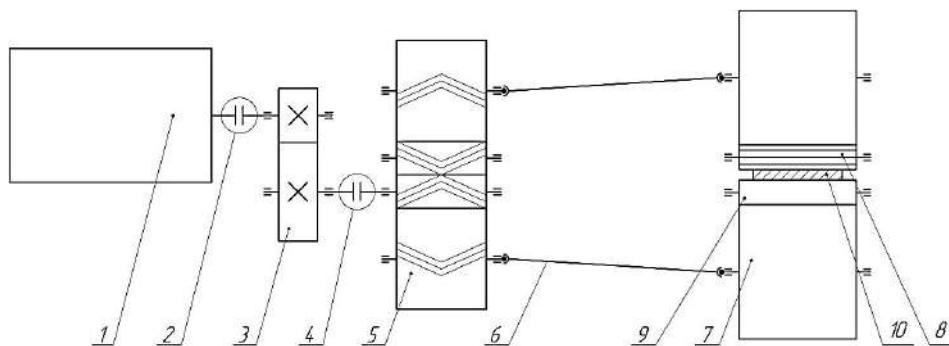


Рис. 2. Схема главной линии стана кварт 55×260×220: 1 – электродвигатель; 2 – моторная муфта; 3 – редуктор; 4 – коренная муфта; 5 – шестеренная клеть; 6 – шпиндель; 7 – опорный валок; 8 – рабочий профилированный валок; 9 – рабочий гладкий валок; 10 – прокатываемая полоса

Fig. 2. The diagram of the main line of quarto mill 55×260×220: 1 is an electric motor; 2 is a motor coupling; 3 is a gear box; 4 is a base coupling; 5 is a pinion stand; 6 is a spindle; 7 is a back-up roll; 8 is a work shaped roll; 9 is a work smooth roll; 10 is a rolled strip

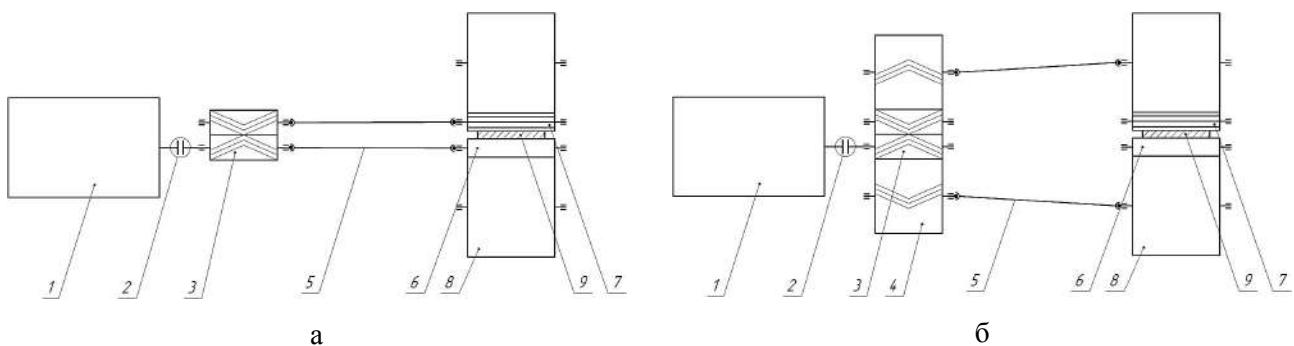


Рис. 3. Рассматриваемые схемы главной линии прокатного стана кварт: а – с приводом через рабочие валки; б – с приводом через опорные валки; 1 – электродвигатель; 2 – моторная муфта; 3 – шестеренный валок малого диаметра; 4 – шестеренный валок большого диаметра; 5 – шпиндель; 6 – рабочий гладкий валок; 7 – рабочий профилированный валок; 8 – опорный валок; 9 – прокатываемая полоса

Fig. 3. The diagrams of the main line of the quarto rolling mill under study (a is driven via work rolls; b is driven via back-up rolls; 1 is an electric motor; 2 is a motor coupling; 3 is a pinion shaft of a small diameter; 4 is a pinion shaft of a large diameter; 5 is a spindle; 6 is a work smooth roll; 7 is a work shaped roll; 8 is a back-up roll; 9 is a rolled strip)

**Моделирование процесса нагружения
главной линии прокатного стана кварт
55×260×220**

Для определения нагрузок в главной линии прокатного стана кварт было создана 3-массовая динамическая модель главной линии стана [8–9], изображенная на **рис. 4**.

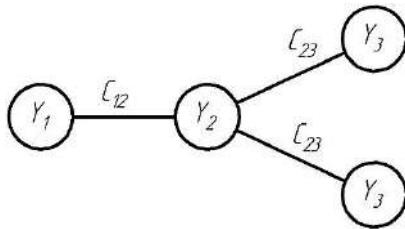


Рис. 4. Динамическая модель главной линии прокатного стана кварт

Fig. 4. The dynamic model of the main line of the quarto rolling mill

Система уравнений, описывающих динамику привода стана по каждой из веток, при этом выглядит следующим образом:

$$\frac{d^2}{d\tau^2} M_{12} = \frac{M_1}{Y_1} C_{12} - C_{12} \frac{Y_1 + Y_2}{Y_1 Y_2} M_{12} + \frac{C_{12}}{Y_2} M_{23}; \quad (1)$$

$$\frac{d^2}{d\tau^2} M_{23} = \frac{C_{23}}{Y_2} M_{12} - C_{23} \frac{Y_2 + Y_3}{Y_2 Y_3} M_{23} + \frac{C_{23}}{Y_3} M_3(\tau), \quad (2)$$

где τ – время, с; M_{ij} – моменты упругих сил на соответствующих звеньях привода машины, кН·м; C_{ij} – приведенные жесткости звеньев, кН·м/рад; Y_i – приведенные моменты инерции звеньев, кг·м²; M_1 – момент на валу электродвигателя привода, кН·м; $M_3(\tau)$ – момент от технологической нагрузки, действующей на рабочий валок стана, кН·м.

По схеме **рис. 3, а** (привод через рабочие валки) приведенные жесткости звеньев определялись по формулам

$$C_{12} = C_M; \quad (3)$$

$$C_{23} = C_{шп}, \quad (4)$$

где C_M – жесткость моторной муфты, кН·м/рад; $C_{шп}$ – жесткость шпинделя привода, кН·м/рад.

Выражения для приведенных моментов инерции:

$$Y_1 = Y_{дв}; \quad (5)$$

$$Y_2 = Y_M + 2Y_{шк1}; \quad (6)$$

$$Y_3 = Y_{шп} + Y_{вр} + \frac{Y_{во}}{U_B^2}, \quad (7)$$

где $Y_{дв}$ – момент инерции ротора двигателя, кг·м²; Y_M – момент инерции моторной муфты, кг·м²; $Y_{шк1}$ – момент инерции шестеренного вала малого диаметра, кг·м²; $Y_{шп}$ – момент инерции шпинделя, кг·м²; $Y_{вр}$ – момент инерции рабочего вала, кг·м²; $Y_{во}$ – момент инерции опорного вала, кг·м²; U_B – передаточное отношение пары «рабочий валок – опорный валок».

По схеме **рис. 3, б** (привод через опорные валки) приведенные жесткости звеньев определялись по формулам

$$C_{12} = C_M; \quad (8)$$

$$C_{23} = \frac{C_{шп}}{U_{шк}^2}, \quad (9)$$

где $U_{шк}$ – передаточное число зубчатого зацепления шестеренной клети.

Выражения для приведенных моментов инерции:

$$Y_1 = Y_{дв}; \quad (10)$$

$$Y_2 = Y_M + 2Y_{шк1} + \frac{2Y_{шк2}}{U_{шк}^2}; \quad (11)$$

$$Y_3 = \frac{Y_{шп} + Y_{во} + Y_{вр} U_B^2}{U_{шк}^2}, \quad (12)$$

где $Y_{шк2}$ – момент инерции шестеренного вала большого диаметра, кг·м².

Моменты от технологической нагрузки задавались функцией вида

$$M_3(\tau) = k_1 \sin(k_2 \tau + k_3) + k_4, \quad (13)$$

где k_1 , k_2 , k_3 , k_4 – коэффициенты, определяющие характер кривой нагружения.

Коэффициенты k_1 , k_2 , k_3 , k_4 определялись путем нахождения значений моментов, действующих на валки прокатного стана при прокатке полос с односторонним поперечным трапециoidalным оребрением с шагом профиля $t = 1,26$ мм из стали 10, толщиной $h = 1,5$ мм, шириной $b = 70$ мм, при показателе трения по Зибелю $\psi = 0,25$, величине обжатия полосы $\varepsilon = 5\dots20\%$ с применением программного комплекса DEFORM-3D [10–11], базирующегося на методе конечных элементов (**рис. 5**). Рассматриваемый диапазон обжатий позволяет получать полосы с оребрением высотой $\Delta h = 0,04\dots0,2$ мм.

В результате решения системы уравнений, описывающих динамику привода стана, определены значения коэффициентов динамичности нагрузок, действующих на звенья главного привода, с использованием следующего выражения:

$$k_{\Delta} = \frac{M_{\text{дин}}}{M_3}, \quad (14)$$

где $M_{\text{дин}}$ – значение динамической нагрузки, кН·м; M_3 – приведенное значение момента от технологической нагрузки на звене, кН·м.

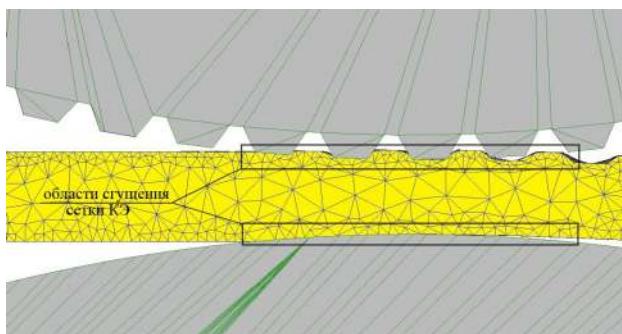


Рис. 5. Моделирование процесса прокатки полосы с оребрением

Fig. 5. Simulation of the rolling process of the ribbed strip

Расчитывались также значения коэффициентов запаса по напряжениям в теле шпинделя при расчете на усталостную прочность и коэффициенты запаса по моменту на моторной муфте с учетом коэффициента режима работы.

Результаты расчетов приведены на рис. 6–11. На рис. 6, 7 показаны примеры результатов расчета по определению значений динамической нагрузки на звеньях главного привода прокатного стана, а на рис. 8–11 приведены зависимости коэффициентов динамичности нагрузок на звеньях и коэффициентов запаса от величины обжатия полосы.

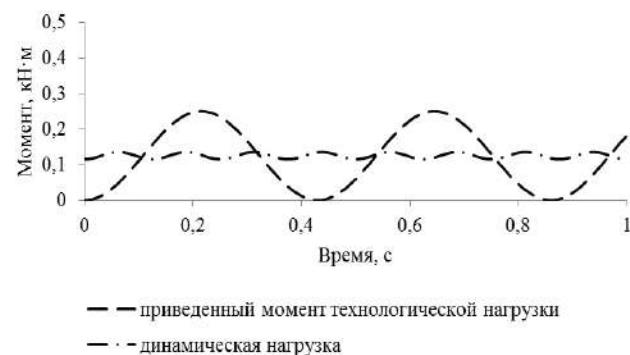


Рис. 6. Значение динамической нагрузки и приведенного момента от технологической нагрузки на шпиндельных устройствах в начальный момент времени прокатки при обжатии полосы 20% (привод через рабочие валки)

Fig. 6. Dynamic loading and reduced torque from process load on spindle assemblies at initial time of rolling with the strip rolled by 20% (driven via work rolls)

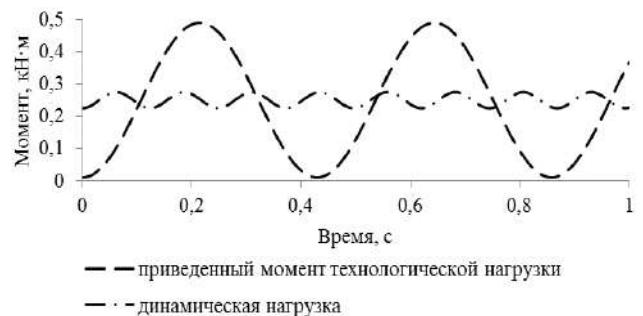


Рис. 7. Значение динамической нагрузки и приведенного момента от технологической нагрузки на моторной муфте в начальный момент времени прокатки при обжатии полосы 20% (привод через рабочие валки)

Fig. 7. Dynamic loading and reduced torque from process load on the motor coupling at initial time of rolling with the strip rolled by 20% (driven via work rolls)

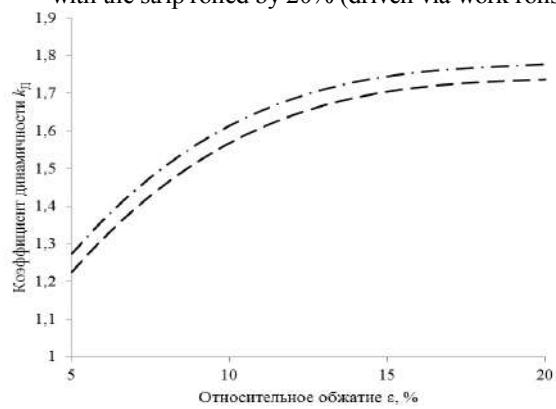


Рис. 8. Зависимости коэффициента динамичности нагрузок, действующих на звенья главного привода при схеме привода через рабочие валки, от относительного обжатия полосы

Fig. 8. The “dynamic factor – percentage reduction” curve derived from the loads on the main drive links, when driven via work rolls

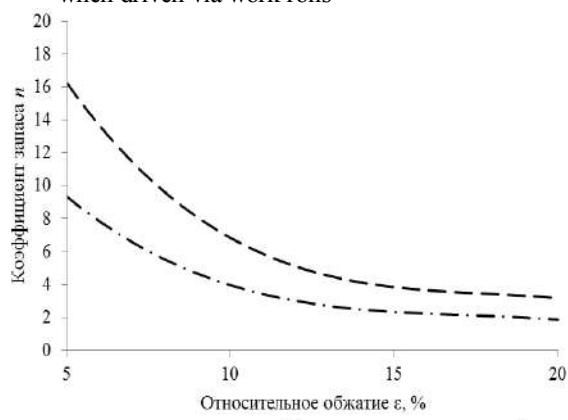


Рис. 9. Зависимости коэффициентов запаса для звеньев главного привода при схеме привода через рабочие валки от относительного обжатия полосы

Fig. 9. The “safety factor – percentage reduction” curve for the main drive links, when driven via work rolls

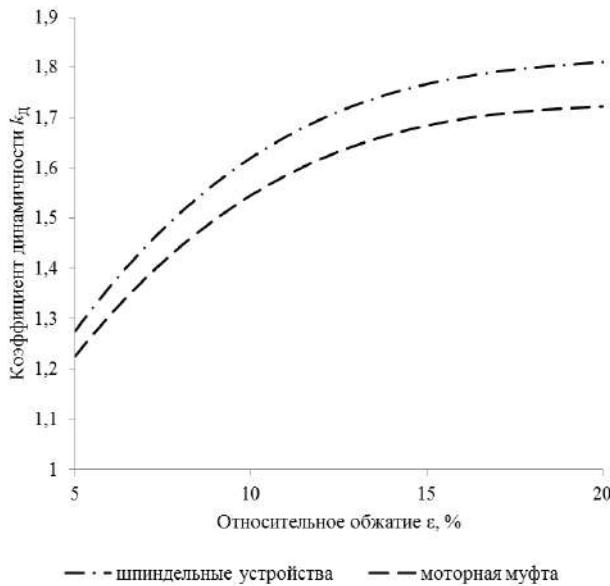


Рис. 10. Зависимости коэффициента динамичности нагрузок, действующих на звенья главного привода при схеме привода через опорные валки, от относительного обжатия полосы
Fig. 10. The “dynamic factor – percentage reduction” curve derived from the loads on the main drive links, when driven via back-up rolls

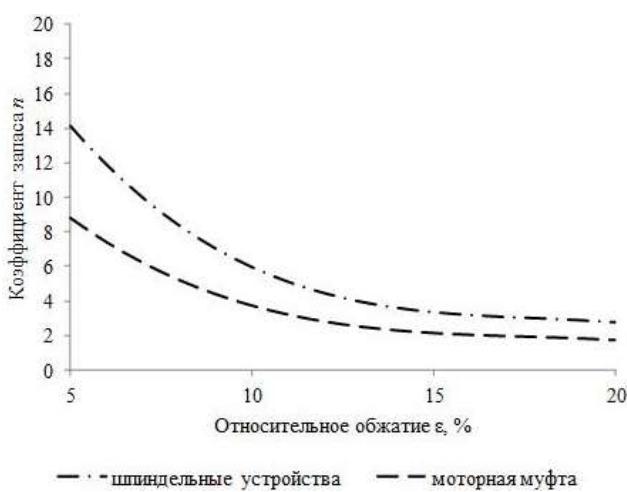


Рис. 11. Зависимости коэффициентов запаса для звеньев главного привода при схеме привода через опорные валки от относительного обжатия полосы
Fig. 11. The “safety factor – percentage reduction” curve for the main drive links, when driven via back-up rolls

Анализ полученных результатов

Как видно из полученных графиков, значения коэффициентов динамичности нагрузки на моторной муфте и шпиндельных устройствах стана увеличиваются при увеличении обжатия полосы. Наибольшие значения коэффициентов динамич-

ности нагрузки наблюдаются на шпиндельных устройствах стана. Диапазон изменения коэффициентов при этом составляет $k_d = 1,27–1,81$. Коэффициенты запаса по напряжениям в теле шпинделля и по моменту на моторной муфте имеют тенденцию к снижению при увеличении обжатия полосы. Минимальное значение коэффициента запаса по напряжениям в теле шпиндельных устройств составляет $n_{\text{ШР}} = 1,86$ при рассмотрении схемы привода через рабочие валки и находится в диапазоне допускаемых величин ($[n] = 1,5–2,5$) [12–13]. При рассмотрении схемы привода через опорные валки минимальное значение коэффициента запаса по напряжениям в теле шпиндельных устройств в рассматриваемом диапазоне обжатия полосы $\varepsilon = 5–20\%$ составляет $n_{\text{ШО}} = 2,75$. Минимальные значения коэффициентов запаса по моменту на моторной муфте составляют при этом $n_{\text{МР}} = 3,16$ и $n_{\text{МО}} = 1,72$ соответственно (при $[n] = 1$). Таким образом, более благоприятной с точки зрения нагрузок выглядит схема привода рабочих валков стана через опорные.

Следует также заметить, что особенностью процесса прокатки полос с оребрением является повышенный износ оребрения профилированного рабочего валка и, как следствие, необходимость более частой перевалки. В случае схемы привода через рабочие валки процесс их перевалки осложняется необходимостью производить работы, связанные с отсоединением и присоединением шпиндельных устройств. Перевалка рабочих валков на станах с приводом рабочих валков через опорные таких проблем не имеет. Процесс перевалки в этом случае выглядит проще и занимает меньшее время [14]. Кроме того, на станах с приводом рабочих валков через опорные легче обеспечить несущую способность элементов главной линии стана при создании новых конструкций, а также возможно использование рабочих валков малого диаметра, что снижает энергосиловые параметры процесса прокатки.

Учитывая вышесказанное, можно сделать вывод, что наиболее рациональной для прокатки полос с оребрением является безредукторная схема главной линии стана квартро $55\times260\times220$ с приводом рабочих валков через опорные.

Заключение

Рассмотрены безредукторные схемы главной линии полосового прокатного стана квартро $55\times260\times220$ с приводом через рабочие и опорные валки. Определены значения моментов от техно-

логической нагрузки при прокатке полос с оребрением путем моделирования данного процесса с использованием метода конечных элементов. Произведено решение системы дифференциальных уравнений, описывающих динамику нагружения главной линии прокатного стана при прокатке полос с оребрением. Проведенный анализ нагруженности элементов главной линии стана квартро $55 \times 260 \times 220$ позволил произвести оценку его оборудования с точки зрения прокатки оребренных полос, предназначенных для производства труб с внутренним оребрением и обосновать рациональность выбора состава оборудования главной линии прокатного стана для производства такого вида труб с приводом через опорные валки.

Список литературы

1. Кутепов А.М., Стерман Л.С., Стюшин Н.Г. Гидродинамика и теплообмен при парообразовании: учебное пособие для втузов. М.: Высш. шк., 1986. 448 с.
2. Повышение эффективности теплообменных труб энергетических установок / В.В. Олимпиев, Б.Г. Мирзоев, И.А. Попов и др. // Инженерно-физический журнал. 2019. Т. 92. №3. С. 608–618.
3. Выбор рациональных интенсификаторов теплообмена в теплообменном оборудовании / С.А. Бурцев, Ю.А. Виноградов, Н.А. Кисилёв, М.М. Стронгин // Наука и образование. 2016. №12. С. 35–56.
4. Мирмов Н.И., Мирмов И.Н. Абсорбционные холодильные машины для получения отрицательных температур охлаждения // Труды БГТУ. 2017. Сер. 1. №2. С. 328–341.
5. Thermohydraulic Efficiency of Tubes with Internal Spiral Finning / A.N.Skrypnik, A.V.Shchelchkov, I.A.Popov et al. // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2018. Vol. 91. No.1. P. 52–63.
6. Promthaisong Pitak, Boonloi Fmnart, Jedsadaratanachai Withada. Numerical investigation on turbulent forced convection and heat transfer characteristic in spirally semicircle-grove tube // International Journal of Mechanical and Materials Engineering. 2016. Vol. 11. No. 1. P. 9–11.
7. Разработка технологии и оборудования для изготовления труб с внутренним оребрением / В.С. Паршин, И.И. Некрасов, А.П. Карамышев, С.М. Газман // Сталь. 1994. №4. С. 51–53.
8. Кожевников С.Н. Динамика машин с упругими звенями. Киев: Изд-во АН УССР, 1960. 160 с.
9. Иванченко Ф.К. Динамика и прочность прокатного оборудования / Ф.К. Иванченко, П.И. Полухин, М.А. Тылкин, В.П. Полухин. М.: Металлургия, 1970. 487 с.
10. Практическое руководство к программному комплексу DEFORM: учебное пособие / В.С. Паршин, А.П. Карамышев, И.И. Некрасов, А.А. Путин, А.А. Федулов. Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2010. 266 с.
11. Моделирование процессов ОМД в программном комплексе Deform: методические указания / А.В. Сотов, В.Г. Смелов, А.В. Агаповичев, Р.Д. Карташов. Самара: Изд-во Самар. ун-та, 2017. 47 с.
12. Дунаев П.Ф., Леликов О.П. Конструирование узлов и деталей машин. М.: Издательский центр «Академия», 2008. 496 с.
13. Плотников П.Н., Недошивина Т.А. Детали машин: расчет и конструирование: учебное пособие. Екатеринбург: Изд-во урал. ун-та, 2016. 236 с.
14. Пат. 2497615 Российской Федерации, МПК B21B 31/02. Опорный узел рабочих валков прокатной клети КВАРТО / С.В. Паршин, А.А. Федулов, А.П. Карамышев, И.И. Некрасов, А.И. Путин, заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», ООО «НТП «РадиоАлПро». №2011144035/02. заявл. 31.10.2011, опубл. 10.11.2013.

References

1. Kutepov A.M., Sterman L.S., Styushin N.G. *Gidrodinamika i teploobmen pri paroobrazovanii: uchebnoe posobie dlya vтузов* [Hydrodynamics and heat exchange during steam formation: a teaching aid for higher technical education institutions]. Moscow: Higher school, 1986, 448 p. (In Russ.)
2. Olimpiev V.V., Mirzoev B.G., Popov I.A. et al. Increasing efficiency of heat exchange tubes of power facilities. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal* [Journal of Engineering Physics and Thermophysics], 2019, vol. 92, no. 3, pp. 608–618. (In Russ.)
3. Burtsev S.A., Vinogradov Yu.A., Kisilev N.A., Stronigin M.M. Choosing feasible heat exchange intensifiers in heat exchange equipment. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie* [Science and education: scientific publication], 2016, no. 12, pp. 35–56. (In Russ.)
4. Mirmov N.I., Mirmov I.N. Absorption refrigerators used to generate negative cooling temperatures. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2017, series 1, no. 2, pp. 328–341. (In Russ.)
5. Skrypnik A.N., Shchelchkov A.V., Popov I.A. et al. Thermohydraulic efficiency of tubes with internal spiral finning. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2018, vol. 91, no. 1, pp. 52–63.
6. Promthaisong Pitak, Boonloi Fmnart, Jedsadaratanachai Withada. Numerical investigation on turbulent forced convection and heat transfer characteristic in spirally semicircle-grove tube. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 2016, vol. 11, no. 1, pp. 9–11.
7. Parshin V.S., Nekrasov I.I., Karamyshev A.P., Gazman S.M. Developing the technology and equipment to produce internally ribbed tubes. *Stal* [Steel], 1994, no. 4, pp. 51–53. (In Russ.)
8. Kozhevnikov S.N. *Dinamika mashin s uprugimi zvenyami* [Dynamics of machines with elastic linkage]. Kiev: Publishing House of the Academy of Sciences of the Ukrainian Soviet Socialist Republic. 1960, 160 p. (In Russ.)

9. Ivanchenko F.K., Polukhin P.I., Tylkin M.A., Polukhin V.P. *Dinamika i prochnost prokatnogo oborudovaniya* [Dynamics and strength of rolling equipment]. Moscow: Metallurgy, 1970, 487 p. (In Russ.)
10. Parshin V.S., Karamyshev A.P., Nekrasov I.I., Pugin A.A., Fedulov A.A. *Prakticheskoe rukovodstvo k programmnому kompleksu DEFORM: uchebnoe posobie* [Practical guide on DEFORM: a teaching aid]. Yekaterinburg, Publishing House of Ural Federal University, 2010, 266 p. (In Russ.)
11. Sotov A.V., Smelov V.G., Agapovich A.V., Kartashov R.D. *Modelirovaniye protsessov OMD v programmnom komplekse Deform: metodicheskie ukazaniya* [Simulation of metal forming processes using Deform: methodology instructions]. Samara: Publishing House of Samara University, 2017, 47 p. (In Russ.)
12. Dunaev P.F., Lelikov O.P. *Konstruirovaniye uzlov i detaley mashin* [Design of machine assemblies and parts]. Moscow: Academy Publishing Center, 2008, 496 p. (In Russ.)
13. Plotnikov P.N., Nedoshivina T.A. *Detali mashin: raschet i konstruirovaniye: uchebnoe posobie* [Calculation and design of machine parts:a teaching aid]. Yekaterinburg: Publishing House of Ural University, 2016, 236 p. (In Russ.)
14. Parshin S.V., Fedulov A.A., Karamyshev A.P., Nekrasov I.I., Pugin A.I. *Oporny uzel rabochikh valkov prokatnoy kleti KVARTO* [Mounting assembly of work rolls of the QUARTO mill stand]. Patent RF, no. 2497615, 2013.

Поступила 02.03.2021; принята к публикации 09.04.2021; опубликована 28.06.2021
Submitted 02/03/2021; revised 09/04/2021; published 28/06/2021

Некрасов Игорь Иванович – доцент, кандидат технических наук,
Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия.
Email: nekrasovii@yandex.ru

Федулов Артем Анатольевич – доцент, кандидат технических наук,
Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия.
Email: artem.feduloff@yandex.ru

Паршин Владимир Сергеевич – профессор, доктор технических наук,
Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия

Igor I. Nekrasov – Associate Professor, PhD (Eng.),
Ural Federal University, Russia. Email: nekrasovii@yandex.ru

Artem A. Fedulov – Associate Professor, PhD (Eng.),
Ural Federal University, Russia. Email: artem.feduloff@yandex.ru

Vladimir S. Parshin – Professor, DrSc (Eng.),
Ural Federal University, Russia

СТАНДАРТИЗАЦИЯ, СЕРТИФИКАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ

STANDARDIZATION, CERTIFICATION AND QUALITY MANAGEMENT

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 62-19
DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-2-98-102



НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ БАЗА ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Извеков Ю.А.

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

Аннотация. Металлургические предприятия представляют собой совокупность различных технических систем, которые эксплуатируются в тяжелых и сверхтяжелых режимах. Вместе с этим многие из этих технических систем обладают уникальностью, высокой стоимостью производства и эксплуатации, а также работают за пределами гарантийных сроков. Вывод из строя таких систем, а тем более их аварии могут привести к непоправимым потерям, человеческим жертвам, потери предприятием прибыли. Оценке качества технических систем металлургических предприятий с позиций надежности и безопасности уделяется недостаточное внимание, поэтому представленная статья обладает достаточной степенью актуальности. Исследование в основе своей содержит конструкционный риск-анализ. Новизна выделяется в создании научно-методической базы оценки качества технических систем металлургического предприятия как вероятности их безаварийной и надежной эксплуатации. Предложены математические модели и по ним рассчитаны количественные показатели риска аварии для 15 кранов кислородно-конвертерного цеха металлургического предприятия. Полученные показатели удовлетворительно сходятся с известными фактическими данными, что говорит об адекватности и правильности такого подхода. Такой подход впервые применен для металлургической отрасли, что говорит о перспективности его развития и применения. Обозначенная научно-методическая база является основой для создания цифровых двойников диагностики и мониторинга фактического технического состояния исследуемых технических систем. Изменение свойств элементов системы приводит к изменению вероятностей их отказов, аварий. Используя предложенный подход, будем строить вероятностные модели для технической системы (краны), группы систем (цеха), сложной системы (металлургическое предприятие), связывающие их свойства и вероятность их отказа, ведущего к аварии. Свойства таких систем изменяются с течением времени. Диагностика и мониторинг фиксирует эти изменения. Для прогнозирования изменения технических систем будем использовать функцию плотности вероятностей циклов нагружения, действующих напряжений, деформаций.

Ключевые слова: качество, безопасность, критерии риска, конструкционный риск-анализ, количественная оценка риска, вероятность, вероятностное моделирование, техническая система, научно-методическая база, цифровой двойник.

© Извеков Ю.А., 2021

Для цитирования

Извеков Ю.А. Научно-методическая база оценки качества технических систем металлургического предприятия // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №2. С. 98–102. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-2-98-102>



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

SCIENTIFIC AND METHODOLOGICAL BASE FOR ASSESSING THE QUALITY OF TECHNICAL SYSTEMS OF A METALLURGICAL ENTERPRISE

Izvekov Yu.A.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Metallurgical enterprises are a combination of various technical systems that operate in severe and super heavy duty modes. At the same time, many of these technical systems are unique, costly to manufacture and operate, and operate outside the warranty period. The failure of such systems, and even more so their accidents, may lead to irreparable losses, human casualties, loss of profits by the enterprise. Insufficient attention is paid to assessing the quality of technical systems of metallurgical enterprises from the standpoint of reliability and safety, therefore, the presented paper has a sufficient degree of relevance. The study basically contains a structural risk analysis. The novelty is highlighted in the creation of a scientific and methodological base for assessing the quality of technical systems of a metallurgical enterprise as the likelihood of their trouble-free and reliable operation. The paper describes the proposed mathematical models and calculated quantitative indicators of an accident risk for 15 cranes of the basic oxygen furnace shop of a metallurgical enterprise. The obtained indicators are in satisfactory agreement with the known actual data, indicating adequacy and correctness of this approach. This approach was first applied for the metallurgical industry, which indicates the prospects for its development and application. The designated scientific and methodological base is the basis for the creation of digital twins for diagnostics and monitoring of the actual technical state of the technical systems under study. Changes in the properties of system elements lead to a change in the probabilities of their failures and accidents. Using the proposed approach, we will build probabilistic models for a technical system (cranes), a group of systems (a shop), a complex system (a metallurgical enterprise), connecting their properties and the probability of their failure leading to an accident. The properties of such systems change over time. Diagnostics and monitoring are applied to record these changes. To predict changes in technical systems, we will use the probability density function of loading cycles, acting stresses, and deformations.

Keywords: quality, safety, risk criteria, structural risk analysis, quantitative risk assessment, probability, probabilistic modeling, technical system, scientific and methodological base, digital twin

For citation

Izvekov Yu.A. Scientific and Methodological Base for Assessing the Quality of Technical Systems of a Metallurgical Enterprise. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021, vol. 19, no. 2, pp. 98–102. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-2-98-102>

Введение

В России и за рубежом на протяжении трех последних десятилетий создается и продолжает развиваться научно-методическая база обеспечения безопасности по критериям риска [1–5]. Металлургическая отрасль наряду с атомной, нефтегазовой, оборонной и другими является очень важной и насыщенной потенциально опасными объектами. Она также должна являться объектом пристального внимания с точки зрения промышленной безопасности. Современное состояние промышленной безопасности на металлургических предприятиях не отвечает современным требованиям: применяется устаревшее оборудование (в некоторых случаях больше 80%), его модернизация осуществляется медленными темпами, люди, эксплуатирующие вверенную им технику, не всегда вовремя проходят переподготовку и повышение квалификации [2, 3].

Таким образом, назрела необходимость в изучении и применении новых подходов к обеспечению промышленной безопасности на металлургических предприятиях. Основу металлургического предприятия составляют различные технические системы, которые работают в тяжелых и сверхтяжелых режимах работы [2, 3, 6]. Качество таких систем должно включать в себя их надежную и безопасную работу [2, 3]. Современное развитие технологий металлургической отрасли не содержит единую научно-методическую базу для оценки качества технических систем металлургического предприятия по критериям риска.

Полученные результаты и их обсуждение

Опасные производственные объекты определены в [7]. В [2, 3] показана и обоснована научно-методическая база оценки качества с позиций надежности и безопасности мостовых металлур-

гических кранов грузоподъемностью 50 и 300 т. Такие краны относятся в опасным производственным объектам.

Будем рассматривать металлургическое предприятие Публичное акционерное общество (ПАО) «Магнитогорский металлургический комбинат (ММК)». Это металлургическое предприятие насчитывает 40 цехов (20 из которых основные, 20 вспомогательные). Распределение кранового хозяйства (см. **рисунок**) показывает, что мостовые краны составляют порядка 70% от общего количества кранов [2,3].



Рис. Крановое хозяйство ПАО «ММК»
Fig. Crane facilities of PJSC MMK

В [2, 3] для оценки качества таких технических систем, как мостовые металлургические краны, с позиций надежности и безопасности был предложен конструкционный риск-анализ, который позволяет определить вероятность их надежной и безаварийной на этапе эксплуатации и послегарантийной эксплуатации. Автором на основе [1–3], вероятностного моделирования, теории случайных процессов удалось получить количественные оценки риска аварии для исследуемых кранов и условий эксплуатации.

В общем случае риск рассчитывался по формуле

$$R = P_A \cap P_f(a) \cap L \cap U, \quad (1)$$

где P_A – вероятность аварии; $P_f(a)$ – вероятность элемента системы; L – эволюция аварийного состояния; U – ущерб аварии.

Предложена следующая классификация рисков:

- нормальный риск вероятность аварии – 0,159;
- предельно допустимый риск – 0,521;

- предельный (катастрофический) риск – 0,749.

Качество в этом случае представляется функцией, обратной риску, соответственно, по ее значению можно определить дальнейшую судьбу эксплуатируемого крана.

В кислородно-конвертерном цехе (ККЦ) ПАО «ММК» эксплуатируются от 10 до 15 мостовых металлургических кранов. В самом первом (модельном) приближении можем определить риск аварии для всего цеха, учитывая (1):

$$R_{\text{KKЦ}} = \prod_{i=1}^n R_i. \quad (2)$$

Тогда для ККЦ получим следующие данные (см. **таблицу**).

Таблица. Значения риска для ККЦ ПАО «ММК» с 15-ю эксплуатирующими кранами
Table. Risk values for the BOF shop of PJSC MMK with 15 operating cranes

Нормальный риск	1,05E-12
Предельно допустимый риск	5,66E-06
Катастрофический риск	7,30E-04

Полученные данные удовлетворительно сходятся с известными, что говорит о правомерности и адекватности такого подхода [1].

Показан самый предельный случай (2), на деле же риск может быть посчитан суммированием, когда вероятность аварии возможна не на всех, а на некоторых технических системах. В первые 20 лет XXI века число таких кранов, то есть технических систем с указанной степенью израсходованного ресурса на ПАО «ММК» увеличилось на 15% [8–10]. В этом случае величина ущерба от аварий таких систем будет значительно снижать общую прибыль предприятия.

Возникает противоречие между наработанными циклами таких кранов и жесткими требованиями к безопасности и рискам их функционирования во время эксплуатации как показателей качества [8].

Предложенный подход может явиться научно-методической базой для создания новых систем оценки качества диагностики и мониторинга опасных производственных объектов с использованием так называемых цифровых двойников, которые будут оценивать их техническое состояние и принимать решение о продлении ресурса и обеспечения безопасной эксплуатации с продленным ресурсом. Такие системы мониторинга и прогнозирования будут своевременно получать информацию о фактическом техническом состоянии технической системы и принять

тии решения о продлении эксплуатации или вывода из нее.

Полученные соотношения типа (1), (2) могут быть основой таких цифровых двойников. Используя предложенный подход, будем строить вероятностные модели для технической системы (краны), группы систем (цеха), сложной системы (металлургическое предприятие), связывающие их свойства и вероятность их отказа, ведущего к аварии. Свойства таких систем изменяются с течением времени. Диагностика и мониторинг фиксирует эти изменения. Для прогнозирования изменения технических систем будем использовать функцию плотности вероятностей циклов нагружения, действующих напряжений, деформаций в несущих конструкциях.

В общем случае, продолжая говорить о цифровых двойниках, можно записать условие оценки качества технической системы в следующем виде:

$$\vec{O} = \vec{Y}(N, \sigma, \varepsilon); \vec{Z}(N, \sigma, \varepsilon); \vec{W}(N, \sigma, \varepsilon), \quad (3)$$

где \vec{O} – вектор оценки качества; \vec{Y} – вектор контролируемых параметров; \vec{Z} – вектор корректирующих воздействий; \vec{W} – вектор управляющих воздействий; N – количество циклов крана; σ – действующие напряжения в несущих конструкциях; ε – действующие деформации в несущих конструкциях.

Заключение

Таким образом, для оценки качества технической системы металлургического предприятия с позиций надежности и безопасности при помощи конструкционного риска-анализа может быть создана научно-методическая база. Она позволит оценивать фактическое техническое состояние не только одной системы, например крана, но и их совокупность, например цех, по результатам мониторинга с использованием цифровых двойников вычислять риск аварии и принимать решение о возможности ее эксплуатации, продлении ресурса, необходимом техническом обслуживании или о выводе из эксплуатации из-за катастрофического риска.

Дальнейшее развитие этой научно-методической базы позволит расширить ее применение сначала на основные цеха металлургического предприятия, а затем, при соответствующем обеспечении и разработке цифровых двойников, собственно на все предприятия.

Таким образом, предложенный подход может быть началом разработки новых требований

стандартизации и оценки качества металлургической отрасли с позиций ее безопасной и надежной эксплуатации.

Список литературы

1. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Анализ риска и проблем безопасности. В 4-х ч. // Ч. 4. Научно-методическая база анализа риска и безопасности / науч. руковод. К.В. Фролов. М.: МГОФ «Знание», 2007. 864 с.: ил.
2. Извеков Ю.А. Научные основы методологии оценки и повышения качества технических систем металлургического предприятия // Сборник трудов V Международной научно-технической конференции «Живучесть и конструкционное материаловедение (ЖИВКОМ-2020)» в дистанционном формате. Москва, 27–29 октября 2020 года / Москва. ИМАШ РАН им. А.А. Благонравова, 2020. С. 118–119.
3. Izvekov Yu.A. Quantitative Evaluation Algorithm for Technical System Reliability // Scientific Works of the 6th International Scientific Conference on Fundamental Research and Innovative Technologies in Mechanical Engineering. November 26–27, 2019. Moscow: IMASH RAS A.A. Blagonravova, 2019.P. 195–196.
4. Hammad D.B., Shafiq N., Nuruddin M.F. Criticality Index of Building Systems Using Multi-Criteria Decision Analysis Technique, MATEC Web of Conferences, EDP Sciences 15:01018 (2014).
5. Kumamoto H., Henley E.J. Probabilistic Risk Assessment and Management for Engineers and Scientists, IEEE Press, New York (1996).
6. Проектирование цехов сталеплавильного производства: учебник / К.Н. Вдовин, В.Ф. Мысик, В.В. Точилкин, Н.А. Чиченев. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2016. 505 с.
7. Федеральный закон «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» от 21.07.97 г. № 116-ФЗ.
8. ГОСТ Р ИСО 9000-2015. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь (с Поправкой). М.: Стандартинформ, 2015. 53 с.
9. Кузьмин Д.А., Кузьмичевский А.Ю. Метод расчета вероятности хрупкого разрушения оборудования АЭС в различных режимах эксплуатации с постулируемой дефектностью // Надежность и безопасность энергетики. 2021. Т. 14. №. 1. С. 34–39.
10. Скворцова Н.К., Филимонова Л.А., Андронова К.А. Риск-ориентированный подход для обеспечения промышленной безопасности на предприятиях топливно-энергетического комплекса // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Экономика и право. 2021. №. 1. С. 65–74.

References

1. Frolov K.V. Bezopasnost Rossii. Pravovye, sotsialno-ekonomicheskie i nauchno-tehnicheskie aspekty. Analiz risika i problem bezopasnosti. V 4-kh ch. Ch.4. Nauch-

- no-metodicheskaya baza analiza riska i bezopasnosti* [Safety of Russia. Legal, social, economic, scientific and technical aspects. Risk and safety Analysis. In 4 parts. Part 4: Scientific and methodological base for analyzing risks and safety]. Moscow: Znanie, 2007, 864 p. (In Russ.).
- 2. Izvekov Yu.A. Scientific foundations of the methodology for assessing and improving the quality of technical systems of a metallurgical enterprise. *Sbornik trudov V Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii Zhivuchest i konstruktionskoe materialovedenie (ZhIVKOM-2020) v distantsionnom formate* [Proceedings of the 5th Online International Scientific and Technical Conference *Survivability and Structural Materials Science (ZhIVKOM-2020)*]. Moscow: Blagonravov Institute of Machine Science, RAS, 2020, pp. 118–119. (In Russ.)
 - 3. Izvekov Yu.A. Quantitative evaluation algorithm for technical system reliability. Proceedings of the 6th International Scientific Conference on Fundamental Research and Innovative Technologies in Mechanical Engineering. Moscow: Blagonravov Institute of Machine Science, RAS, 2019, pp. 195–196.
 - 4. Hammad D.B., Shafiq N., Nuruddin M.F. Criticality index of building systems using multi-criteria decision analysis technique. MATEC Web of Conferences, EDP Sciences 15:01018 (2014).
 - 5. Kumamoto H., Henley E.J. Probabilistic risk assessment and management for engineers and scientists. IEEE Press, New York (1996).
 - 6. Vdovin K.N., Mysik V.F., Tochilkin V.V., Chichenev N.A. *Proektirovanie tsekhov staleplavilnogo proizvodstva: uchebnik* [Design of steelmaking shops. Textbook]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2016, 505 p. (In Russ.)
 - 7. Federal Law "On Industrial Safety of Hazardous Production Facilities" dated July 21, 1997, no. 116-FZ.
 - 8. GOST R ISO 9000-2015. Quality management systems. Fundamentals and vocabulary (with an Amendment). Moscow: Standartinform, 2015, 53 p. (In Russ.)
 - 9. Kuzmin D.A., Kuzmichevsky A.Yu. Method of calculating the probability of brittle fracture of NPP equipment in various operating modes with postulated defectiveness. *Nadezhnost i bezopasnost energetiki* [Reliability and Safety of Power Engineering], 2021, vol. 14, no. 1, pp. 34–39. (In Russ.)
 - 10. Skvortsova N.K., Filimonova L.A., Andronova K.A. A risk-oriented approach to ensure industrial safety at enterprises of the fuel and energy complex. *Sovremennaya nauka: aktualnye problemy teorii i praktiki. Seriya: Ekonomika i pravo* [Modern Science: Topical Problems of Theory and Practice. Series: Economics and Law], 2021, no. 1, pp. 65–74. (In Russ.)

Поступила 17.05.2021; принята к публикации 03.06.2021; опубликована 28.06.2021
Submitted 17/05/2021; revised 03/06/2021; published 28/06/2021

Извеков Юрий Анатольевич – кандидат технических наук, доцент,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: yurij.izvekov@mail.ru. ORCID 0000-0002-1892-4055

Yury A. Izvekov – PhD (Eng.), Associate Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: yurij.izvekov@mail.ru. ORCID 0000-0002-1892-4055

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

УДК 658.562

DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-2-103-111



АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ СУЩЕСТВУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ И КОНСТРУКЦИЙ НА ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТАХ

Наркевич М.Ю., Корниенко В.Д., Логунова О.С., Полякова М.А., Извеков Ю.А.

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

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Проведен анализ существующих проблем обеспечения безопасности зданий и сооружений, технических устройств на опасных производственных объектах. Отмечено, что в соответствии с Указом Президента РФ от 09.05.2017 № 203 «О Стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017–2030 годы» происходит бурное развитие цифровых и информационных технологий. Однако в строительной отрасли процессы цифровизации и автоматизации применяются в основном в системах инженерно-технического обеспечения зданий и сооружений (охраные системы, противопожарные системы, системы регулирования параметров микроклимата и освещённости помещений и т.д.), при этом вопросы обеспечения безопасности (в т.ч. механической) зданий, сооружений, технических устройств и их частей продолжают оставаться в рамках традиционного подхода к оценке качества, регламентированного стандартами, входящими в Перечни, утвержденные постановлениями Правительства РФ № 985 и № 687. Установлено, что применяемая традиционная система оценки качества несовременна, имеет ряд существенных недостатков, устранение которых возможно лишь на условиях модернизации самой системы. **Используемые методы.** Систематизация и анализ действующей нормативной базы в области промышленной безопасности, сравнения. **Новизна.** Выявлены и проанализированы наиболее важные и перспективные направления развития системы оценки качества материалов, изделий и конструкций на опасных производственных объектах. **Результат.** Определено, что при общем снижении числа аварий на опасных производственных объектах состояние защищённости жизненно важных интересов личности и общества продолжает оставаться под угрозой, в том числе из-за высокого уровня аварийности объектов I и II классов опасности. **Практическая значимость.** Анализ эффективности существующей системы оценки качества материалов, изделий и конструкций на опасных производственных объектах показал, что с целью дальнейшего снижения риска возникновения аварий и инцидентов необходимо внедрение, в рамках цифровизации, нового подхода к оценке качества строительных материалов, изделий и конструкций в промышленной безопасности, основанного на использовании технологий машинного зрения и компьютерной экспертизы.

Ключевые слова: качество строительных материалов, изделий и конструкций, цифровизация, промышленная безопасность, опасный производственный объект, авария, инцидент, обследование зданий и сооружений, система дистанционного контроля (надзора) промышленной безопасности опасных производственных объектов.

© Наркевич М.Ю., Корниенко В.Д., Логунова О.С., Полякова М.А., Извеков Ю.А., 2021

Для цитирования

Анализ эффективности существующей системы оценки качества материалов, изделий и конструкций на опасных производственных объектах / Наркевич М.Ю., Корниенко В.Д., Логунова О.С., Полякова М.А., Извеков Ю.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №2. С. 103–111. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-2-103-111>



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

ANALYSIS OF EFFICIENCY OF THE EXISTING QUALITY ASSESSMENT SYSTEM FOR MATERIALS, PRODUCTS, AND STRUCTURES AT HAZARDOUS PRODUCTION FACILITIES

Narkevich M.Yu., Kornienko V.D., Logunova O.S., Polyakova M.A., Izvekov Yu.A.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Problem statement (relevance). The authors analyzed the existing problems of ensuring safety of buildings and structures, technical devices at hazardous production facilities. It is noted that in accordance with Decree of the President of the Russian Federation No. 203 dated May 9, 2017 "On the Strategy for the Development of the Information Society in the Russian Federation for 2017–2030", there is a rapid development of digital and information technologies. However, in the construction industry the processes of digitalization and automation are mainly used in the systems of engineering and technical support of buildings and structures (security systems, fire protection systems, systems for controlling the parameters of the microclimate and illumination of premises, etc.), while the issues of ensuring safety (including mechanical safety) of buildings, structures, technical devices and their parts remain within a conventional approach to quality assessment regulated by the standards included in the Lists approved by Resolutions of the Government of the Russian Federation No. 985 and No. 687. It is established that the traditional quality assessment system used is not up-to-date, has a number of significant shortcomings, whose elimination is possible only under the conditions of modernizing the system itself. **Methods Applied.** The methods of systematization and analysis of the current regulatory framework in the field of industrial safety, and comparison. **Novelty.** The authors identified and analyzed the most important and promising areas of development of the quality assessment system for materials, products and structures at hazardous production facilities. **Result.** It was determined that with a general decrease in the number of accidents at hazardous production facilities, the state of protection of the vital interests of the individual and society continues to be under threat, including due to a high level of accidents at facilities of hazard classes 1 and 2. **Practical Relevance.** The analysis of efficiency of the existing quality assessment system for materials, products and structures at hazardous production facilities has shown that in order to further reduce the risk of accidents and incidents, it is necessary to introduce, within the framework of digitalization, a new approach to assessing the quality of building materials, products and structures in industrial safety based on the use of machine vision technologies and computer expert evaluation.

Keywords: quality of building materials, products and structures, digitalization, industrial safety, hazardous production facility, accident, incident, inspection of buildings and structures, remote control (supervision) system of industrial safety at hazardous production facilities.

For citation

Narkevich M.Yu., Kornienko V.D., Logunova O.S., Polyakova M.A., Izvekov Yu.A. Analysis of Efficiency of the Existing Quality Assessment System for Materials, Products, and Structures at Hazardous Production Facilities. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021, vol. 19, no. 2, pp. 103–111. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-2-103-111>

Введение

Для государства в целом важен уровень безаварийного производства стратегически важной для отечественной экономики продукции, а также повышения инвестиционной привлекательности российских компаний на мировом рынке, что, в свою очередь, в полной мере коррелируется с целями национального проекта «Цифровая экономика РФ», а также стратегией развития информационного общества и искусственного интеллекта в Российской Федерации, которые представлены в Указах Президента РФ от 09.05.2017 № 203 «О Стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017–2030 годы» и от 10.10.2019 № 490 «О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации» [1, 2].

Актуальность исследований и разработок в данном направлении подчеркивает и факт недавней экологической катастрофы, связанной с утечкой 21 тыс. т дизельного топлива, произошедшей на акционерном обществе «Норильско-Таймырская энергетическая компания» (АО «НТЭК»), входящем в группу компаний «Норильский никель». Сумма экологического ущерба оценена Федеральной службой по надзору в сфере природопользования (Росприроднадзор) в 147,7 млрд руб. [3].

Полученные результаты и их обсуждение

В рамках традиционного подхода к оценке качества зданий и сооружений на опасных производственных объектах (например, ГОСТ 31937-2011 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состоя-

ния» [4], СП 13-102-2003 «Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений» [5], РД 11-288-99 «Методика определения технического состояния кожухов доменных печей и воздухонагревателей» [6], РД 08-95-95 «Положение о системе технического диагностирования сварных вертикальных цилиндрических резервуаров для нефти и нефтепродуктов» [7] и др.) вопросы безопасности зданий, сооружений, технических устройств и их частей продолжают оставаться крайне актуальными, требующими разработки и использования принципиально нового подхода, основанного на последних достижениях науки и техники.

Также следует отметить, что в соответствии с действующим законодательством оценке качества подлежат все этапы жизненного цикла зданий, сооружений и технических устройств (инженерные изыскания, проектирование, строительство (в том числе консервация), эксплуатация (в том числе текущие ремонты), реконструкция, капитальный ремонт, снос). Качество и, как следствие, безопасность использования зданий, сооружений, технических устройств и их частей напрямую зависит от ряда факторов: периодичности контроля, квалификации контролёров, точности применяемых средств контроля, а также условий, при которых контроль проводится.

Внедрение автоматизированных цифровых систем непрерывного мониторинга в процессы оценки качества зданий, сооружений, технических устройств и их частей на различных этапах их жизненного цикла обусловлено необходимостью проведения оценки их безопасности в режиме реального времени. Это позволит снизить риск разрушения зданий, сооружений, технических устройств и их частей на опасных производственных объектах, повысить их эксплуатационную надежность и долговечность, а также спрогнозировать переход зданий, сооружений, технических устройств и их частей в аварийное состояние. Таким образом, предмет предлагаемого исследования находится в фокусе сразу нескольких областей научного знания.

Уже сейчас крупные промышленные компании и предприятия России финансово и интеллектуально инвестируют в создание принципиально новых технологий, позволяющих предотвратить (снизить потенциальный риск возникновения) аварий и инцидентов на опасных производственных объектах, минимизировать возможные последствия различных аварийных ситуаций.

Согласно ФЗ №116 «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» [8], организация, эксплуатирующая опас-

ный производственный объект, обязана подтвердить соответствие зданий, сооружений и технических устройств обязательным требованиям промышленной безопасности путем проведения экспертизы. Кроме того, несоблюдение требований промышленной безопасности приводит к возникновению аварий и инцидентов на опасных производственных объектах, что влечет за собой остановку производственного процесса, значительные экономические убытки, причинение вреда окружающей среде, а иногда и человеческие жертвы. При этом подтверждение соответствия объекта экспертизы обязательным требованиям оценивается на момент проведения экспертизы промышленной безопасности.

При этом имеет место традиционная модель дискретной оценки качества зданий и сооружений исходя из экспертного анализа степени соответствия установленным требованиям промышленной безопасности. Устанавливается один из следующих выводов [8]:

- объект экспертизы соответствует требованиям промышленной безопасности и может быть применен при эксплуатации опасного производственного объекта;

- объект экспертизы не в полной мере соответствует требованиям промышленной безопасности и может быть применен при условии внесения соответствующих изменений в документацию или выполнения соответствующих мероприятий в отношении технических устройств либо зданий и сооружений;

- объект экспертизы не соответствует требованиям промышленной безопасности и не может быть применен при эксплуатации опасного производственного объекта.

Следует подчеркнуть, что данная оценка соответствия отражает реальное состояние опасного производственного объекта лишь на дату утверждения заключения промышленной безопасности, при этом действует на несколько лет вперед, до следующей экспертизы.

На фоне увеличения количества опасных производственных объектов и растущей интенсивности их эксплуатации (**рис. 1, 2**) увеличивается вероятность возникновения аварий и инцидентов. Согласно заявлению Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор) в России установленся тренд на ежегодное снижение общего числа аварий на опасных производственных объектах и, как следствие, общего количества погибших и травмированных людей. В 2019 г. количество аварий на опасных производственных объектах составило 150, что на 14,3%

меньше, чем в 2018 г., а несчастных случаев со смертельным исходом произошло 165, что, в свою очередь, на 7% меньше, чем в 2018 г. [10].

Следует отметить, что общее снижение количества аварий на опасных производственных объектах в целом не характеризует аварийность в отдельных отраслях промышленности. Например, зафиксирован рост числа аварий на объектах нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности, составивший примерно 37% за 2019 г. [16]. Причем на объектах нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности опасных производственных объектов высокого (II) и чрезвычайного высокого (I) классов опасности значительно больше, чем в других отраслях промышленности.

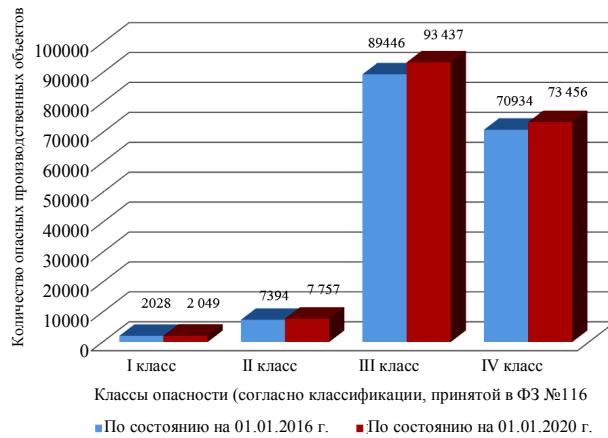


Рис. 1. Количество зарегистрированных на территории РФ единиц ОПО по состоянию на начало 2016 и 2020 гг. [11–15]

Fig. 1. The number of hazardous facilities registered in the Russian Federation at the beginning of 2016 and 2020 [11–15]

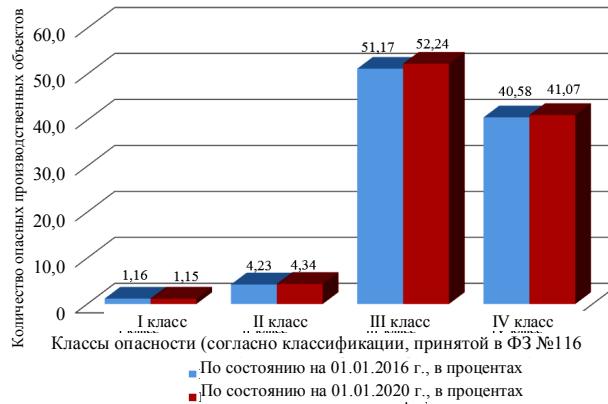


Рис. 2. Количество зарегистрированных на территории РФ единиц ОПО по состоянию на начало 2016 и 2020 гг., в процентах [11–15]

Fig. 2. Percentage of hazardous facilities registered in the Russian Federation at the beginning of 2016 and 2020 [11–15]

По данным, представленным Ростехнадзором [15], в последние годы отмечается всплеск аварийности на объектах металлургических и коксохимических производств (рис. 3).

Согласно данным, опубликованным в RISKNEWS, экономический ущерб от аварий на объектах нефтегазового комплекса за 11 месяцев 2020 г. вырос на 76% и составил 5 млрд 356 млн руб. (без учета экологического ущерба) [17].

Таким образом, при общем снижении числа аварий на опасных производственных объектах состояние защищённости жизненно важных интересов личности и общества продолжает оставаться под угрозой, в том числе из-за высокого уровня аварийности объектов I и II классов опасности.

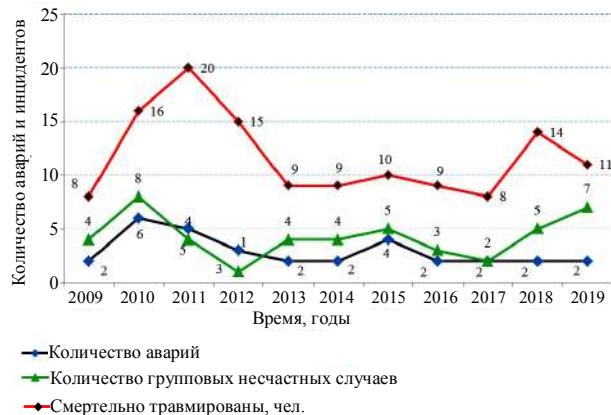


Рис. 3. Динамика аварийности и травматизма на объектах металлургических и коксохимических производств в 2009–2019 гг. [15]

Fig. 3. Trend in the accident rate and injuries at facilities of metallurgical and coke and chemical by-product divisions in 2009–2019 [15]

Статистические данные показывают, что среди всех видов аварий на опасных производственных объектах аварии, вызванные разрушением зданий и сооружений, являются одними из самых редких. Однако такие аварии «лидируют» по величине ущерба, так как в случае обрушения строительных конструкций производственных объектов избежать повреждений технологического оборудования практически невозможно, а это, в свою очередь, ведёт к негативным последствиям в виде выбросов опасных веществ, взрывов топливно-воздушных смесей, пожаров, экологических загрязнений. При этом следует отметить, что в условиях обрушения зданий и сооружений работы по оперативной ликвидации последствий аварий значительно затрудняются. Следовательно, величина риска разрушения зданий и сооружений на опасных производственных объектах является одним из ключевых критериев обеспе-

чения промышленной безопасности.

Переход строительных конструкций зданий и сооружений на опасных производственных объектах в аварийное состояние на стадии эксплуатации происходит вследствие:

- накопления эксплуатационных дефектов и повреждений;
- перегрузки конструкций в результате нарушения технологического процесса и производственных инструкций, образования значительных суговых и пылевых отложений на элементах конструкций;
- воздействия опасных природных и техногенных факторов.

Для поддержания зданий и сооружений в работоспособном состоянии следует проводить регулярный контроль за их техническим состоянием, т.е. производить оценку качества зданий и сооружений.

В настоящее время применяется метод дискретной оценки качества для зданий, сооружений, технических устройств и их частей на соответствие требованиям промышленной безопасности.

В период между проведением экспертиз детальная экспертная оценка соответствия технического состояния зданий, сооружений, технических устройств и их частей не проводится. В указанный период сохраняется вероятность появления и развития критических дефектов, влияющих на переход зданий, сооружений, технических устройств и их частей в аварийное состояние. При этом опасные факторы аварии, такие как взрыв, пожар и др., связанные исключительно с технологическим оборудованием, могут ускорить процесс перехода конструкции в аварийное состояние, а в отдельных случаях привести и к хрупкому (внезапному) разрушению конструкции.

С вступлением в силу Федерального закона № 184-ФЗ «О техническом регулировании» [1, 2] произошло совершенствование правовых основ путем установления обязательных требований к продукции и процессам на всех стадиях жизненного цикла (проектирование, производство, эксплуатация и утилизация), а также реформирование в сферах стандартизации, подтверждения соответствия, государственного контроля и надзора с учетом требований Всемирной торговой организации (ВТО).

При этом образована единая, взаимоувязанная система технического нормирования безопасности и качества продукции и услуг, подтверждения соответствия, государственного контроля и надзора. Требования к продукции

разделены на обязательные, установленные техническими регламентами (ТР), и добровольные, содержащиеся в стандартах.

В отношении зданий и сооружений принят Федеральный закон от 30 декабря 2009 г. № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» [19] (далее – Закон № 384-ФЗ, ТР о ЗиС).

В целях применения ТР № 384-ФЗ действуют следующие перечни национальных стандартов и сводов правил:

- Перечень № 985 [20], утвержденный постановлением Правительства РФ от 04.07.2020 № 985, - обязательный, действует с 1 августа 2020 г.;
- Перечень № 687 [21], утвержденный приказом Росстандарта от 02.04.2020 № 687 - добровольный, действует с 2 апреля 2020 г.

В частности, в Перечень № 985 включены своды правил, объектом регулирования которых являются опасные производственные объекты, а также отдельный ГОСТ 31937-2011 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния» [4].

В отношении опасных производственных объектов действует ФЗ №116 «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» [8] и федеральные нормы и правила (ФНП) в области промышленной безопасности «Правила проведения экспертизы промышленной безопасности» от 20.10.2020 № 420 [9]. Согласно данному ФНП устанавливаются требования к экспертизе зданий и сооружений на опасном производственном объекте, а также мероприятия по обследованию зданий и сооружений (включая материалы и строительные конструкции).

Действующая редакция ФЗ №116 «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» предусматривает создание на предприятиях, эксплуатирующих опасные производственные объекты I или II класса опасности, системы управления промышленной безопасностью и обеспечивать ее функционирование (ст. 11, п. 3).

Специально разработанные алгоритмы машинного зрения позволяют дистанционно, без участия человека, проводить компьютерную экспертизу зданий, сооружений, технических устройств и их частей на предмет соответствия требованиям промышленной безопасности.

Автоматизированная система цифрового непрерывного дистанционного автоматизированного мониторинга зданий, сооружений, технических устройств и их частей может эксплуатироваться как самостоятельная система либо инте-

грироваться в систему управления промышленной безопасностью предприятия с целью предупреждения аварий и инцидентов на опасных производственных объектах. Предполагается использование указанной системы и для осуществления функции государственного мониторинга промышленной безопасности.

Заключение

В рамках проведенных исследований рассмотрены традиционные подходы к оценке качества материалов, изделий и конструкций зданий и сооружений, эксплуатируемых на опасных производственных объектах. Установлено, что применяемая традиционная система оценки качества несовременна, имеет ряд существенных недостатков, устранение которых возможно лишь на условиях модернизации самой системы. Необходима разработка концепции структуры комплексной системы непрерывного дистанционного автоматизированного мониторинга для дистанционного контроля и оценки качества материалов, изделий и конструкций зданий и сооружений, эксплуатируемых на опасных производственных объектах.

Применение комплексной системы непрерывного дистанционного автоматизированного мониторинга на опасных производственных объектах в сочетании с применяемыми системами управления промышленной безопасности обеспечит снижение риска разрушения зданий, сооружений, технических устройств и их частей путем принятия упреждающих решений на основе оперативной и ретроспективной информации, полученной в условиях непрерывного цифрового мониторинга.

Список литературы

1. Указ Президента РФ от 09.05.2017 № 203 «О стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017-2030 годы» [Электронный ресурс] // Официальный интернет-портал правовой информации www.pravo.gov.ru, 10.05.2017, № 0001201705100002.
2. Указ Президента РФ от 10.10.2019 № 490 «О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации» [Электронный ресурс] // Официальный интернет-портал правовой информации www.pravo.gov.ru, 11.10.2019, № 0001201910110003.
3. Бурмистрова С., Подобедова Л. Росприроднадзор оценил ущерб от аварии в Норильске в рекордные \$ 2 млрд. Режим доступа: «www.rbk.ru»: <https://www.rbc.ru/business/06/07/2020/5ef9e42a9a7947264d24cc19> (дата обращения: 19.05.2021 г.).
4. ГОСТ 31937-2011. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния: принят Межгосударственной научно-технической комиссией по стандартизации, техническому нормированию и сертификации в строительстве (протокол № 39 от 8 декабря 2011 г.) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200100941>.
5. СП 13-102-2003. Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений: принят и рекомендован к применению в качестве нормативного документа в Системе нормативных документов в строительстве постановлением Госстроя России от 21 августа 2003 г. № 153.
6. РД 11-288-99. Методика определения технического состояния кожухов доменных печей и воздухонагревателей: утв. Постановлением Госгортехнадзора России от 02.06.99. № 35.
7. РД 08-95-95. Положение о системе технического диагностирования сварных вертикальных цилиндрических резервуаров для нефти и нефтепродуктов: утв. постановлением Госгортехнадзора России от 25.07.95 № 38.
8. Федеральный закон от 21.07.1997 № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» (с изменениями на 8 декабря 2020 года) [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_15234/.
9. Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила проведения экспертизы промышленной безопасности»: приказ Ростехнадзора от 20 октября 2020 года № 420 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/573053315>.
10. «Дружба» не в счет: Ростехнадзор рассказал о снижении числа аварий в 2019 году на 14%. Режим доступа: «www.interfax.ru»: <https://www.interfax.ru/business/692202> (дата обращения: 19.05.2021 г.).
11. Годовой отчет о деятельности федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2015 г. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/%D0%93%D0%BE%D0%B4%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B9%20%D0%BE%D1%82%D1%87%D0%B5%D1%82%20%D0%B7%D0%B0%202016%20%D0%B3%D0%BE%D0%B4%203.pdf (дата обращения: 19.05.2021 г.).
12. Годовой отчет о деятельности федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2016 г. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/%D0%93%D0%BE%D0%B4%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B9%20%D0%BE%D1%82%D1%87%D0%B5%D1%82%20%D0%B7%D0%B0%202016%20%D0%B3%D0%BE%D0%B4%203.pdf (дата обращения: 19.05.2021 г.).
13. Годовой отчет о деятельности федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2017 г. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/%D0%93%D0%BE%D0%B4%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B9%20%D0%BE%D1%82%D1%87%D0%B5%D1%82%20%D0%B7%D0%B0%202017%20%D0%B3%D0%BE%D0%B4%203.pdf (дата обращения: 19.05.2021 г.).

- 0% B5%D1%82%20%D0%A0%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%
B5%D1%85%D0%BD%D0%B0%D0%
4%D0%
B7%D0%BE%D1%80%D0%
B0%20%D0%
B7%D0%
B0%20%202017%20%D0%
B3.%20(%D0%
B
E%D0%BA%D0%BE%D0%
BD%D1%87%D0%
B0%
D1%82).pdf (дата обращения: 19.05.2021 г.).
14. Годовой отчёт о деятельности федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2018 г. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/%D0%93%D0%BE%D0%B4%D0%BE%D0%_B2%D0%BE%D0%
B9%20%D0%BE%D1%82%D1%87%D0%
B5%D1%82%20%D0%
B7%D0%
B0%202018%20%D0%
B3%D0%BE%D0%
B4.pdf](https://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/%D0%93%D0%BE%D0%B4%D0%BE%D0%_B2%D0%BE%D0%
B9%20%D0%BE%D1%82%D1%87%D0%
B5%D1%82%20%D0%
B7%D0%
B0%202018%20%D0%
B3%D0%BE%D0%
B4.pdf) (дата обращения: 19.05.2021 г.).
15. Годовой отчёт о деятельности федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2019 г. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/%D0%93%D0%BE%D0%B4%D0%BE%D0%_B2%D0%BE%D0%
B9%20%D0%BE%D1%82%D1%87%D0%
B5%D1%82%20%D0%
B7%D0%
B0%202019%20%D0%
B3%D0%BE%D0%
B4%D1%83.pdf](https://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/%D0%93%D0%BE%D0%B4%D0%BE%D0%_B2%D0%BE%D0%
B9%20%D0%BE%D1%82%D1%87%D0%
B5%D1%82%20%D0%
B7%D0%
B0%202019%20%D0%
B3%D0%BE%D0%
B4%D1%83.pdf) (дата обращения: 19.05.2021 г.).
16. Ростехнадзор: Количество аварий на опасных производственных объектах в 2019 году уменьшилось на 14,3%. Режим доступа: «www.risk-news.ru»: https://www.risk-news.ru/news/rostekhnadzor_kolichestvo_avariy_na_opasnykh_proizvodstvennykh_obejktakh_v_2019_godu_umenshilos_na_14/ (дата обращения: 19.05.2021 г.).
17. Экономический ущерб от аварий в нефтегазовом комплексе вырос на 76 % - до 5,4 млрд рублей. Режим доступа: «www.risk-news.ru»: https://www.risk-news.ru/news/ekonomicheskiy_ushcherb_ot_avariy_v_neftegazovom_komplekse_vyros_na_76_do_5_4_mlrd_rublej/ (дата обращения: 19.05.2021 г.).
18. Федеральный закон от 27.12.2002 г. № 184-ФЗ «О техническом регулировании» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://178.21.14.178:3000/docs/>.
19. Федеральный закон от 30.12.2009 № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» (с изменениями на 2 июля 2013 года) [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_95720/.
20. Постановление Правительства РФ от 04.07.2020 № 985 «Перечень национальных стандартов и сводов правил (частей таких стандартов и сводов правил), в результате применения которых на обязательной основе обеспечивается соблюдение требований Федерального закона «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://178.21.14.178:3000/docs/d?nd=677001448>.
21. Приказ Росстандарта от 02.04.2020 № 687 «Перечень документов в области стандартизации, в результате применения которых на добровольной основе обеспечивается соблюдение требований Федерального закона «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://178.21.14.178:3000/docs/d?nd=677001448>.

References

- Decree of the President of the Russian Federation No. 203 dated May 9, 2017 “On the Strategy for the Development of the Information Society in the Russian Federation for 2017-2030”. An official Internet portal of legal information. Available at: www.pravo.gov.ru, no. 0001201705100002 (Accessed on May 19, 2021).
- Decree of the President of the Russian Federation No. 490 dated October 10, 2019 “On the Development of Artificial Intelligence in the Russian Federation”. An official Internet portal of legal information. Available at: www.pravo.gov.ru, no. 0001201910110003 (Accessed on May 19, 2021).
- Burmistrova S., Podobedova L. Rosprirodnadzor (the Federal Service for Supervision of Natural Resource Usage) estimated the damage from the accident in Norilsk at record \$2 billion. Available at: <https://www.rbc.ru/business/06/07/2020/5ef9e42a9a7947264d24cc19> (Accessed on May 19, 2021).
- State standard GOST 31937-2011. Buildings and constructions. Rules of inspection and monitoring of the technical condition. Adopted by the Interstate Scientific and Technical Commission for Standardization, Technical Regulation and Certification in Construction (Protocol No. 39 dated December 8, 2011). Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200100941> (Accessed on May 19, 2021).
- Set of rules SP 13-102-2003. Rules for Inspection of Load-Bearing Structures of Buildings and Facilities. Adopted and recommended for use as a regulatory document in the System of regulatory documents in construction by Resolution of Gosstroy (the State Committee for Construction) of Russia No. 153 dated August 21, 2003.
- Guiding document RD 11-288-99. Methodology for determining the technical condition of blast furnace casings and air heaters. Approved by Resolution of the Gosgortekhnadzor (Federal Mining and Industrial Inspectorate) of Russia No. 35 dated June 2, 1999.
- Guiding document RD 08-95-95. Regulations on the system of technical diagnostics of welded vertical cylindrical tanks for oil and oil products. Approved by Resolution of the Gosgortekhnadzor (Federal Mining and Industrial Inspectorate) of Russia No. 38 dated July 25, 1995.
- Federal Law No. 116 dated July 21, 1997 “On Industrial Safety of Hazardous Production Facilities” (as amended on December 8, 2020). Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_15234/ (Accessed on May 19, 2021).

9. Order of Rostekhnadzor (the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision) "On Approval of Federal Norms and Rules in the Field of Industrial Safety "Rules for conducting industrial safety expertise"" No. 420 dated October 20, 2020. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/573053315> (Accessed on May 19, 2021).
10. «Friendship» does not count: Rostekhnadzor reported the decrease in the number of accidents in 2019 by 14%. Available at: <https://www.interfax.ru/business/692202> (Accessed on May 19, 2021).
11. Annual report on the activities of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision in 2015. Available at: https://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/%D0%93%D0%BE%D0%B4%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%99%D0%BE%D1%82%D1%87%D0%85%D1%82%202015.pdf (Accessed on May 19, 2021).
12. Annual report on the activities of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision in 2016. Available at: https://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/%D0%93%D0%BE%D0%B4%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%99%D0%BE%D1%82%D1%87%D0%85%D1%82%202016.pdf (Accessed on May 19, 2021).
13. Annual report on the activities of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision in 2017. Available at: https://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/%D0%93%D0%BE%D0%B4%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%99%D0%BE%D1%82%D1%87%D0%85%D1%82%202017.pdf (Accessed on May 19, 2021).
14. Annual report on the activities of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision in 2018. Available at: https://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/%D0%93%D0%BE%D0%B4%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%99%D0%BE%D1%82%D1%87%D0%85%D1%82%202018.pdf (Accessed on May 19, 2021).
15. Annual report on the activities of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision in 2019. Available at: https://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/%D0%93%D0%BE%D0%B4%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%99%D0%BE%D1%82%D1%87%D0%85%D1%82%202019.pdf (Accessed on May 19, 2021).
16. Rostekhnadzor (the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision): The number of accidents at hazardous production facilities in 2019 decreased by 14.3%. Available at: https://www.risk-news.ru/news/rostekhnadzor_kolichestvo_avariy_na_opasnykh_proizvodstvennykh_obektakh_v_2019_godu_u_menshilos_na_14/ (Accessed on May 19, 2021).
17. Economic damage from accidents in the oil and gas complex increased by 76%, up to 5.4 billion rubles. Available at: https://www.risk-news.ru/news/ekonomicheskiy_ushcherb_ot_avariy_v_neftegazovom_komplekse_vyros_na_76_do_5_4_mlrd_rubley (Accessed on May 19, 2021).
18. Federal Law No. 184-FZ dated December 27, 2002 "On Technical Regulation". Available at: <http://178.21.14.178:3000/docs/> (Accessed on May 19, 2021).
19. Federal Law No. 384-FZ dated December 30, 2009 "Technical Regulation on Safety of Buildings and Structures" (as amended on July 2, 2013). Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_95720/ (Accessed on May 19, 2021).
20. Decree of the Government of the Russian Federation No. 985 dated July 4, 2020 "The list of national standards and sets of rules (parts of such standards and sets of rules), whose application on a mandatory basis complies with the requirements of the Federal Law "Technical Regulation on Safety of Buildings and Structures"". Available at: <http://178.21.14.178:3000/docs/d?nd=677001448> (Accessed on May 19, 2021).
21. Order of Rosstandart (the Federal Agency on Technical Regulating and Metrology) No. 687 dated April 2, 2020 "The list of documents in the field of standardization, whose application on a voluntary basis complies with the requirements of the Federal Law "Technical Regulation on the Safety of Buildings and Structures"". Available at: <http://178.21.14.178:3000/docs/d?nd=677001448> (Accessed on May 19, 2021).

Поступила 24.05.2020; принята к публикации 07.06.2021; опубликована 28.06.2021
Submitted 24/05/2020; revised 07/06/2021; published 28/06/2021

Наркевич Михаил Юрьевич – кандидат технических наук, доцент,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: narkevich_mu@mail.ru; ORCID 0000-0001-6608-8293

Корниенко Владимир Дмитриевич – эксперт в области промышленной безопасности
по зданиям и сооружениям 1-й категории, ведущий инженер,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: volodya.kornienko2319@yandex.ru

Логунова Оксана Сергеевна – доктор технических наук, профессор, директор института строительства, архитектуры и искусства, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.

Email: logunova66@mail.ru. ORCID 0000-0002-7006-8639

Полякова Марина Андреевна – доктор технических наук, доцент, профессор, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: m.polyakova@magtu.ru. ORCID 0000-0002-1597-8867

Извеков Юрий Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: yurij.izvekov@mail.ru. ORCID 0000-0002-1892-4055

Mikhail Yu. Narkevich – PhD (Eng.), Associate Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: narkevich_mu@mail.ru. ORCID 0000-0001-6608-8293

Vladimir D. Kornienko – category 1 expert on industrial safety for buildings and structures, lead engineer,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: volodya.kornienko2319@yandex.ru.

Oksana S. Logunova – DrSc (Eng.), Professor, Director of the Institute of Construction, Architecture and Art,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: logunova66@mail.ru. ORCID 0000-0002-7006-8639

Marina A. Polyakova – DrSc (Eng.), Associate Professor, Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: m.polyakova@magtu.ru. ORCID 0000-0002-1597-8867

Yury A. Izvekov – PhD (Eng.), Associate Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: yurij.izvekov@mail.ru. ORCID 0000-0002-1892-4055

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+681.515.4

DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-2-112-121



РАЗРАБОТКА УНИВЕРСАЛЬНЫХ АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ ТОКОВЫХ СИГНАЛОВ ДЛЯ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ ПЕЧИ

Николаев А.А., Тулупов П.Г., Ивекеев В.С.

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

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). В настоящее время в большинстве систем управления электрическими режимами дуговых сталеплавильных печей и установок «ковш-печь» не предусмотрена возможность использования устройств измерения токовых сигналов альтернативных тем, что поставляются комплектно с основным технологическим оборудованием. Вследствие этого особую актуальность приобретает задача разработки универсальных алгоритмов обработки токовых сигналов в составе усовершенствованной системы управления электрическим режимом. **Используемые методы.** Работа выполнена с использованием теоретического анализа наиболее распространённых методик измерения токов электрических дуг, а также с использованием методов математического моделирования. **Новизна.** Как правило, в современных системах управления электрическим режимом отсутствует возможность выбора источника измерения токового сигнала. Кроме того, в научно-технической литературе по данной тематике варианты решения поставленной задачи практически не рассматривались. **Результат.** Разработан новый алгоритм универсальной обработки токовых сигналов, который позволяет использовать в системе управления электрическим режимом сигналы с трансформаторов тока на первичной стороне печного трансформатора, трансформаторов тока, встроенных в обмотку печного трансформатора, а также поясов Роговского при различных вариантах подключения обмоток печного трансформатора. **Практическая значимость.** Новый алгоритм универсальной обработки токовых сигналов открывает широкий спектр возможностей для применения альтернативных источников измерения токовых сигналов вне зависимости от способа соединения обмоток печного трансформатора и без необходимости использования дополнительных схемных решений на аппаратном уровне. Вследствие этого система управления, в составе которой будет применяться данный алгоритм, будет обладать большим потенциалом к внедрению по сравнению с существующими аналогами.

Ключевые слова: дуговая сталеплавильная печь, печной трансформатор, трансформатор тока, пояс Роговского, алгоритм обработки токовых сигналов.

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

© Николаев А.А., Тулупов П.Г., Ивекеев В.С., 2021

Для цитирования

Николаев А.А., Тулупов П.Г., Ивекеев В.С. Разработка универсальных алгоритмов обработки токовых сигналов для усовершенствованной системы управления электродуговой печи // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №2. С. 112–121. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-2-112-121>



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

DESIGN OF UNIVERSAL ALGORITHMS FOR PROCESSING OF MULTI-SOURCE CURRENT SIGNALS FOR AN IMPROVED CONTROL SYSTEM OF AN ELECTRIC ARC FURNACE

Nikolaev A.A., Tulupov P.G., Iveykeev V.S.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). Nowadays, the vast majority of electric mode control systems for electric arc furnaces and ladle furnaces are not provided with the possibility of using devices for measuring current signals alternative to those supplied in a package of the main technological equipment. As a result, it is of particular relevance to deal with the task of developing universal algorithms for processing current signals as part of an improved electric mode control system. **Methods Applied.** The research was carried out using a theoretical analysis of the most common methods for measuring electric arc currents, as well as using methods of mathematical modeling. **Originality.** As a rule, modern electric mode control systems are not provided with the possibility of choosing a source for measuring a current signal. In addition, scientific and technical literature on this topic devoted almost no attention to options for solving the problem. **Results.** The authors developed a new algorithm for processing of multi-source current signals, which allows the use of signals from current transformers on the primary side of the furnace transformer, current transformers built into the winding of the furnace transformer, as well as Rogowski coils in the electric mode control system with various options for connecting the windings of the furnace transformer. **Practical Relevance.** The new algorithm for processing of multi-source current signals opens up a wide range of possibilities for the use of alternative sources for measuring current signals, regardless of the method of connecting the windings of the furnace transformer and without the need for additional circuit solutions at the equipment level. As a result, the control system, applying this algorithm, will have a greater potential for implementation in comparison with the existing similar ones.

Keywords: electric arc furnace, furnace transformer, current transformer, Rogowski coil, current signal processing algorithm.

The research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project No. FZRU-2020-001).

For citation

Nikolaev A.A., Tulupov P.G., Iveykeev V.S. Design of Universal Algorithms for Processing of Multi-Source Current Signals for an Improved Control System of an Electric Arc Furnace. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021, vol. 19, no. 2, pp. 112–121. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-2-112-121>

Введение

В настоящее время электрометаллургия является одной из наиболее активно развивающихся отраслей современной промышленности. При этом в подавляющем большинстве случаев при проектировании электросталеплавильных цехов предпочтение отдаётся технологии производства жидкой стали в дуговой сталеплавильной печи (ДСП) с последующей внепечной обработкой расплава в установках ковш-печь (УКП). Очевидно, что ДСП и УКП являются технически сложными и энергоёмкими агрегатами, вследствие чего открываются широкие перспективы для исследований, направленных на снижение производственных издержек.

Одним из направлений в исследованиях данного рода является разработка усовершенствованных алгоритмов управления ДСП и УКП с последующей их интеграцией в новую систему управления электрическим режимом, обладаю-

щую рядом преимуществ по сравнению с существующими аналогичными системами. Очевидно, что одним из критериев, которым должна обладать новая система управления, является универсальность применения. В том числе это касается алгоритмов обработки измеряемых сигналов токов дуг и фазных напряжений, обеспечивающих формирование сигналов обратных связей по регулируемым параметрам электрического контура.

В исследовании [1] отмечалось, что подавляющее большинство существующих систем управления электрическим режимом [2, 3] не обладают универсальностью в данном отношении. Обязательным условием корректной работы данных систем является формирование на входе сигналов, пропорциональных фактическим значениям токов дуг и фазных напряжений. На практике при измерении фазного напряжения данное условие достигается без существенных затруднений. Иная ситуация наблюдается при

работе с измерительными сигналами тока дуги. Здесь в ряде случаев необходимо применять определённые схемные решения на аппаратном уровне вследствие различных способов измерения токов дуг и групп соединения обмоток печного трансформатора (ПТ), что обуславливает дополнительные затраты. В связи с этим особую актуальность приобретает задача разработки универсальных алгоритмов обработки сигналов.

Существующие конфигурации систем измерения токов дуг, применяемые для ДСП и УКП

Опыт эксплуатации систем управления электрическим режимом ДСП и УКП различного класса и мощности [4] показал, что на практике, как правило, используются три основные конфигурации системы измерения токов электрических дуг, предусматривающие использование: 1) измерительных трансформаторов, включенных на первичной стороне ПТ для измерения линейных токов; 2) поясов Роговского на вторичной стороне ПТ; 3) трансформаторов тока, включенных непосредственно в трёхфазную первичную обмотку ПТ. Также могут применяться комбинации из двух различных конфигураций. При этом используются следующие группы соединения обмоток ПТ: Y/Δ-11 и Δ/Δ-0. Для наглядности все возможные варианты сочетания соединения обмоток и конфигураций систем измерения токов дуг приведены на рис. 1. Более подробные схемы, в свою очередь, приведены на рис. 2.

Как уже отмечалось ранее, использование сигналов с системы измерения токов дуг напря-

мую без дополнительной обработки не во всех обозначенных случаях представляется возможным. Для удобства анализа, особенности каждого случая приведены в таблице.

Трансформатор тока на первичной стороне ПТ при соединении обмоток по схеме Δ/Δ-0

Данный случай является наиболее простым, поскольку приведение величины тока на вторичную сторону ПТ производится в соответствии с формулой

$$i_{\Delta}(t) = i_{TA}(t) \cdot K_{TA} \cdot K_T, \quad (1)$$

где $i_{\Delta}(t)$ – мгновенное значение тока дуги одной из фаз, А; $i_{TA}(t)$ – мгновенное значение тока в измерительной обмотке трансформатора тока, А; K_{TA} – коэффициент трансформации измерительного устройства, о.е.; K_T – коэффициент трансформации печного трансформатора для выбранной ступени напряжения, о.е.

В большинстве случаев преобразование в соответствии с формулой (1) может быть реализовано с использованием инструментальной базы, доступной в большинстве современных систем управления электрическим режимом. Тем не менее в устаревших системах [1] иногда отсутствует возможность учёта изменения величины K_T в зависимости от ступени печного трансформатора N_{TP} . Вследствие этого на аппаратном уровне приходится прибегать к использованию дополнительных трансформаторов тока, коэффициент трансформации которых изменяется при переключении РПН печного трансформатора, благодаря чему достигается независимая величина коэффициента трансформации $K_{TA1} \cdot K_{TA2} \cdot K_T = \text{const}$.

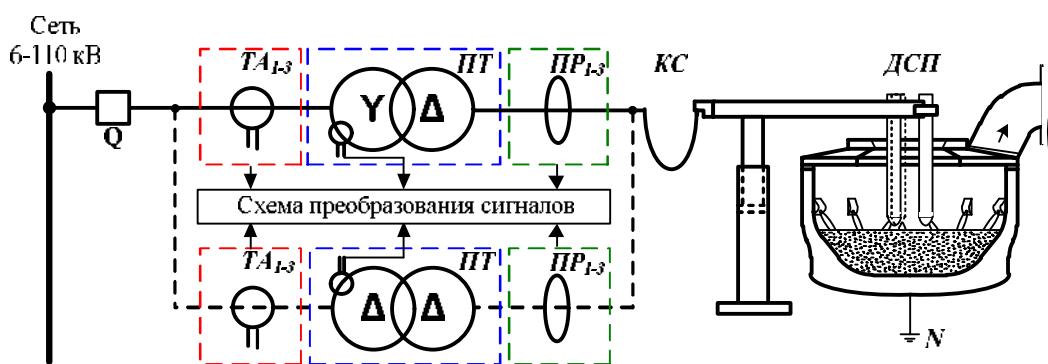


Рис. 1. Возможные типы систем измерения токов электрических дуг и соединения обмоток печного трансформатора: ТА₁₋₃ – измерительные трансформаторы тока в фазах «1», «2» и «3»; ПТ – печной трансформатор со встроенными в обмотку трансформаторами тока; ПР₁₋₃ – пояса Роговского в фазах «1», «2» и «3»; КС – короткая сеть; Q – оперативный вакуумный выключатель

Fig. 1. Possible types of systems for measuring electric arcs currents and connecting the windings of the furnace transformer TA₁₋₃ are measuring current transformers in phases "1", "2" and "3"; ПТ is a furnace transformer with current transformers built into the winding; ПР₁₋₃ are Rogowski coils in phases "1", "2" and "3"; KC is a low voltage circuit, Q is a vacuum switch

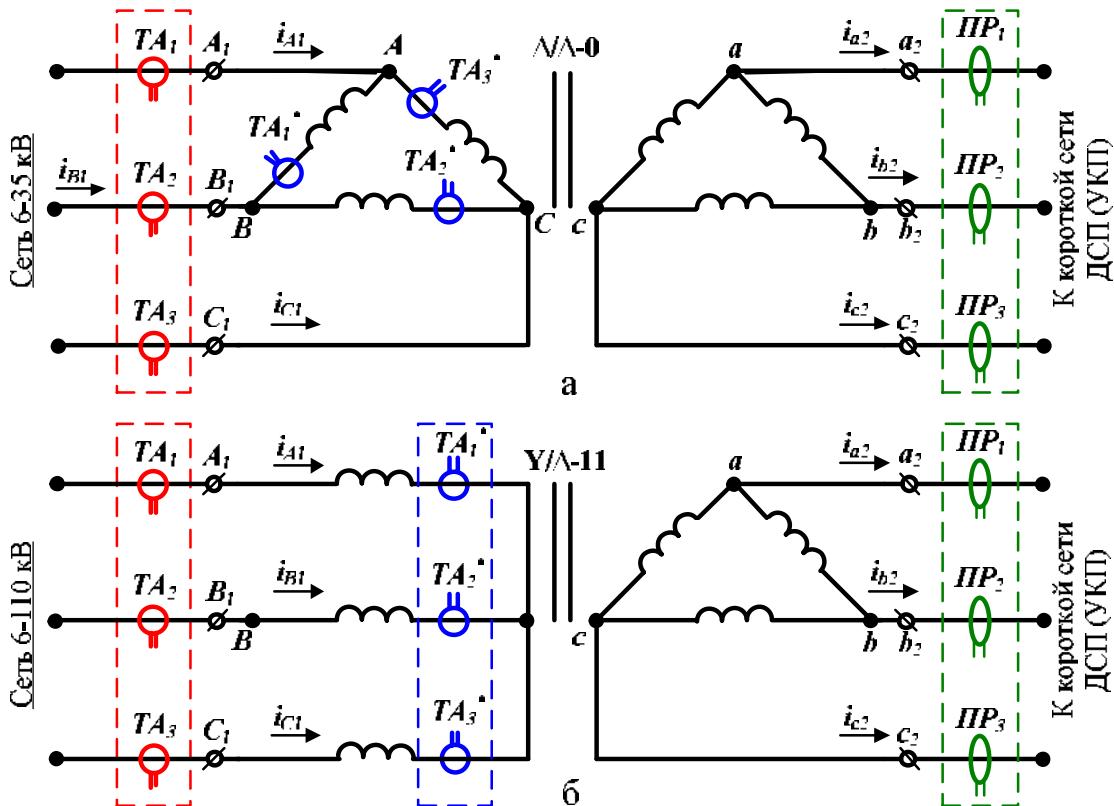


Рис. 2. Варианты включения устройств измерения тока дуги в схему электрического контура ДСП при соединении обмоток печного трансформатора по схеме: а – $\Delta/\Delta-0$; б – $Y/\Delta-11$; i_{a1} , i_{b1} , i_{c1} – токи на первичной стороне печного трансформатора; i_{a2} , i_{b2} , i_{c2} – токи на вторичной стороне печного трансформатора; TA_1 , TA_2 , TA_3 – внешние измерительные трансформаторы тока на первичной стороне ПТ; TA_1^* , TA_2^* , TA_3^* – встроенные в ПТ измерительные трансформаторы тока

Fig. 2. Options for including arc current measuring devices into the electrical circuit of the EAF, when connecting the windings of the furnace transformer according to the scheme: a is $\Delta/\Delta-0$; b is $Y/\Delta-11$; i_{a1} , i_{b1} , i_{c1} are currents on the primary side of the furnace transformer; i_{a2} , i_{b2} , i_{c2} are currents on the secondary side of the furnace transformer; TA_1 , TA_2 , TA_3 are external measuring current transformers on the primary side of the furnace transformer; TA_1^* , TA_2^* , TA_3^* are measuring current transformers built into the primary winding of the furnace transformer

Таблица. Особенности использования различных устройств измерения величины тока дуги в составе системы управления электрическим режимом ДСП (УКП)

Table . Features of the use of various devices for measuring the value of the arc current as part of the EAF (LF) electric mode control system

Конфигурация измерительной системы токов	Соединение $\Delta/\Delta-0$	Соединение $Y/\Delta-0$
Трансформаторы тока, установленные на первичной стороне ПТ	Требуется приведение к току вторичной стороны через КТ для текущей ступени ПТ	Требуется расчёт величины тока на вторичной стороне ПТ по специальному алгоритму
Трансформаторы тока, включенные в обмотку на первичной стороне ПТ	Требуется расчёт величины тока на вторичной стороне ПТ по специальному алгоритму	Требуется расчёт величины тока на вторичной стороне ПТ по специальному алгоритму
Пояса Роговского, установленные на вторичной стороне ПТ	Требуется интегрирование сигнала для восстановления реальных осцилограмм токов дуг	Требуется интегрирование сигнала для восстановления реальных осцилограмм токов дуг

Использование поясов Роговского на вторичной стороне печного трансформатора при соединении обмоток по схеме Δ/Δ-0 и Y/Δ-11

При использовании поясов Роговского выходной сигнал с катушки $U_{\text{ПР}}$ пропорционален производной тока i_d . По этой причине в системе измерения тока используются интегрирующие цепи, восстанавливающие осцилограмму тока за счёт операции интегрирования:

$$u_{\text{ПР}}(t) = L_{\text{ПР}} \frac{di_d(t)}{dt}, \quad (2)$$

$$i_d(t) = K_{\text{ПР}} \int u_{\text{ПР}}(t), \quad (3)$$

где $K_{\text{ПР}}$ – величина коэффициента пропорциональности пояса Роговского, равная индуктивности катушки $L_{\text{ПР}}$, Гн; $u_{\text{ПР}}(t)$ – напряжение на выходе пояса Роговского, В.

Как правило, в современных системах управления электрическим режимом предусмотрено наличие аппаратных цепей интегрирования для восстановления реальной осцилограммы тока дуги. При этом выходной сигнал цепей интегрирования нормируется до значения 20–40 мА или 1–5 А в зависимости от параметров входных датчиков тока, используемых в СУ ДСП (УКП). В этом случае в выражениях (2), (3) учитывают-

ся дополнительные коэффициенты трансформации интегрирующих цепей $K_{\text{ИЦ}}$.

Использование трансформаторов тока, встроенных в трёхфазную первичную обмотку печного трансформатора при группах соединения Δ/Δ-0 и Y/Δ-11

Необходимо отметить, что при подключении обмоток по схеме Y/Δ-11 сигналы с трансформаторов тока, встроенных в обмотку, и внешних трансформаторов тока, установленных перед трансформатором, по очевидным причинам дают эквивалентные результаты. Вследствие этого дальнейшее рассмотрение для соединения Y/Δ-11 будет проведено только для встроенных трансформаторов тока.

Отметим, что данный вариант является наиболее сложным в применении вследствие того, что характер изменения тока в измерительных обмотках трансформаторов при их соединении в схему «полная звезда» не совпадает с характером изменения тока на вторичной стороне ПТ из-за неодинакового соединения обмоток ПТ. Для исследования взаимосвязи между токами на первичной и вторичной сторонах ПТ была разработана математическая модель электрического контура ДСП [5–7], функциональная схема которой представлена на рис. 3.

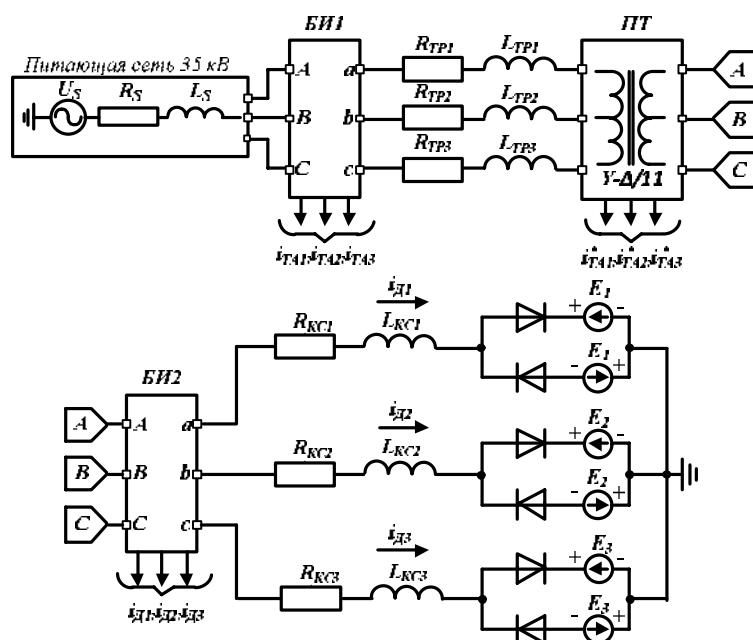


Рис. 3. Функциональная схема математической модели электрического контура ДСП с различными вариантами измерения сигнала тока дуги: БИ1 – блок измерения №1, моделирует внешние трансформаторы тока на первичной стороне; БИ2 – блок измерения №2 для определения фактического значения тока дуги; Е1, Е2, Е3 – противоЭДС электрической дуги

Fig. 3. Functional diagram of the mathematical model of the EAF electrical circuit with various options for measuring the arc current signal: БИ1 is measurement unit No. 1, it simulates external current transformers on the primary side; БИ2 is measurement unit No. 2 to determine actual arc current; Е1, Е2, Е3 are counter EMF of an electric arc

В качестве параметров для работы модели, зададимся следующими значениями: степень печного трансформатора $N_{\text{TP}} = 8$, линейное напряжение на первичной стороне $U_{1\text{L}} = 35$ кВ; линейное напряжение на вторичной стороне $U_{2\text{L}} = 847$ В; коэффициент трансформации ПТ $K_{\text{T}} = 41,322$; активное сопротивление питающей сети, приведённое к первичной стороне $R_S = 0,135$ Ом; индуктивность питающей сети, приведённая к первичной стороне $L_S = 4,302$ мГн; активное сопротивление обмотки ПТ, приведённое к первичной стороне $R_{\text{TP}1,3} = 0,0994$ Ом; индуктивность обмотки ПТ, приведённая к первичной стороне $L_{\text{TP}1,3} = 7,534$ мГн; активное сопротивление участка короткой сети $R_{\text{KC}1} = 0,303$ мОм; $R_{\text{KC}2} = 0,240$ мОм; $R_{\text{KC}3} = 0,286$ мОм; индуктивное сопротивление участка короткой сети $L_{\text{KC}1} = 8,929 \cdot 10^{-6}$ Гн; $L_{\text{KC}2} = 8,766 \cdot 10^{-6}$ Гн; $L_{\text{KC}3} = 8,703 \cdot 10^{-6}$ Гн.

Изначально рассмотрим осциллограммы, полученные с помощью математической модели при различных режимах работы печи (симметричный режим, однофазный обрыв дуги, однофазное КЗ дуги) для случая соединения обмоток ПТ по схеме Y/Δ-11 (рис. 4, а-г). На рис. 4, а и 4, б показаны сигналы i_{TA} и i^*_{TA} , соответствующие сигналам с внешних и встроенных в обмотку ПТ трансформаторов тока. Как уже отмечалось ранее, для случая Y/Δ-11 полученные сигналы идентичны. Отметим, что здесь и далее для удобства анализа принимается в качестве допущения, что коэффициент трансформации всех измерительных устройств равен 1.

На рис. 4, в приведены осциллограммы фактических значений токов электрических дуг i_d . Очевидно, что сигналы $i_{\text{TA}1,2,3}$ и $i^*_{\text{TA}1,2,3}$ являются идентичными по форме и амплитуде только в симметричном режиме. В режиме однофазного обрыва и однофазного КЗ имеет место значительное расхождение как по амплитуде, так и по фазе сигнала. Для того чтобы получить расчётные корректные осциллограммы токов дуг i_d на основании сигналов $i_{\text{TA}1,2,3}$ и $i^*_{\text{TA}1,2,3}$, необходимо использовать следующее преобразование:

$$\begin{cases} i_{d1_P} = K_{\text{T}}(i^*_{\text{TA}_1} - i^*_{\text{TA}_2}) \\ i_{d2_P} = K_{\text{T}}(i^*_{\text{TA}_2} - i^*_{\text{TA}_3}), \\ i_{d3_P} = K_{\text{T}}(i^*_{\text{TA}_3} - i^*_{\text{TA}_1}) \end{cases} \quad (4)$$

где i_{d1_P} , i_{d2_P} , i_{d3_P} – расчётные значения сигнала тока электрической дуги, А; $i^*_{\text{TA}_1}$, $i^*_{\text{TA}_2}$, $i^*_{\text{TA}_3}$ – сигналы с трансформаторов тока на первичной стороне ПТ, А.

Выражения (4) получены на основании векторных диаграмм, представленных на рис. 4, показывающих взаимосвязь токов на первичной и вторичной стороне ПТ. Корректность преобразования (4) также подтверждается результатом

моделирования, поскольку расчётный сигнал тока дуги I_{d_P} (см. рис. 4, г) идентичен фактическому (см. рис. 4, в).

В случае осциллограмм для схемы соединения обмоток Δ/Δ-0 (рис. 4, д-з) в целом аналогична. Основное отличие заключается в том, что сигналы с внешних и встроенных в обмотку ПТ трансформаторов тока не идентичны (рис. 4, д и 4, е). Здесь очевидно, что сигнал с внешних трансформаторов тока пропорционален фактическому значению тока дуги и может быть расчитан с использованием параметра K_{T} , о чём говорилось ранее. При этом для сигналов с встроенных в обмотку трансформаторов тока, согласно векторной диаграмме на рис. 5, также необходимо прибегнуть к преобразованию:

$$\begin{cases} i_{d1_P} = \sqrt{3}K_{\text{T}}(i^*_{\text{TA}_1} - i^*_{\text{TA}_3}) \\ i_{d2_P} = \sqrt{3}K_{\text{T}}(i^*_{\text{TA}_2} - i^*_{\text{TA}_1}). \\ i_{d3_P} = \sqrt{3}K_{\text{T}}(i^*_{\text{TA}_3} - i^*_{\text{TA}_2}) \end{cases} \quad (5)$$

Разработка универсального алгоритма обработки сигналов для различных конфигураций систем измерения токов

Проведённый в предыдущем разделе анализ показал, что в связи с многообразием применяемых на производстве систем измерения токов дуг особую актуальность приобретает задача разработки универсального алгоритма обработки сигналов, который позволил бы функционировать системе управления электрическим режимом, внедряемой на действующей ДСП (УКП) с любой конфигурацией измерительных цепей.

Универсальный алгоритм обработки токовых сигналов, реализуемый на базе контроллера системы автоматического управления электрическими режимами ДСП (УКП) должен обеспечивать простую интеграцию существующих систем измерения токов на базе ТТ или поясов Роговского со встроенными датчиками тока системы управления, обеспечивающими нормирование и гальваническую изоляцию сигналов.

В случаях, когда в составе электрооборудования ДСП (УКП) применяются встроенные или внешние трансформаторы тока, устанавливаемые на первичной стороне ПТ, использование данного алгоритма позволяет исключить применение дополнительных аппаратных устройств для формирования сигналов обратных связей по току с постоянным коэффициентом трансформации, например, дополнительных трансформаторов тока с изменяемым коэффициентом трансформации с функцией синхронизации с РПН ПТ. Вследствие этого предлагается на практике использовать алгоритм, функциональная схема которого представлена на рис. 6.

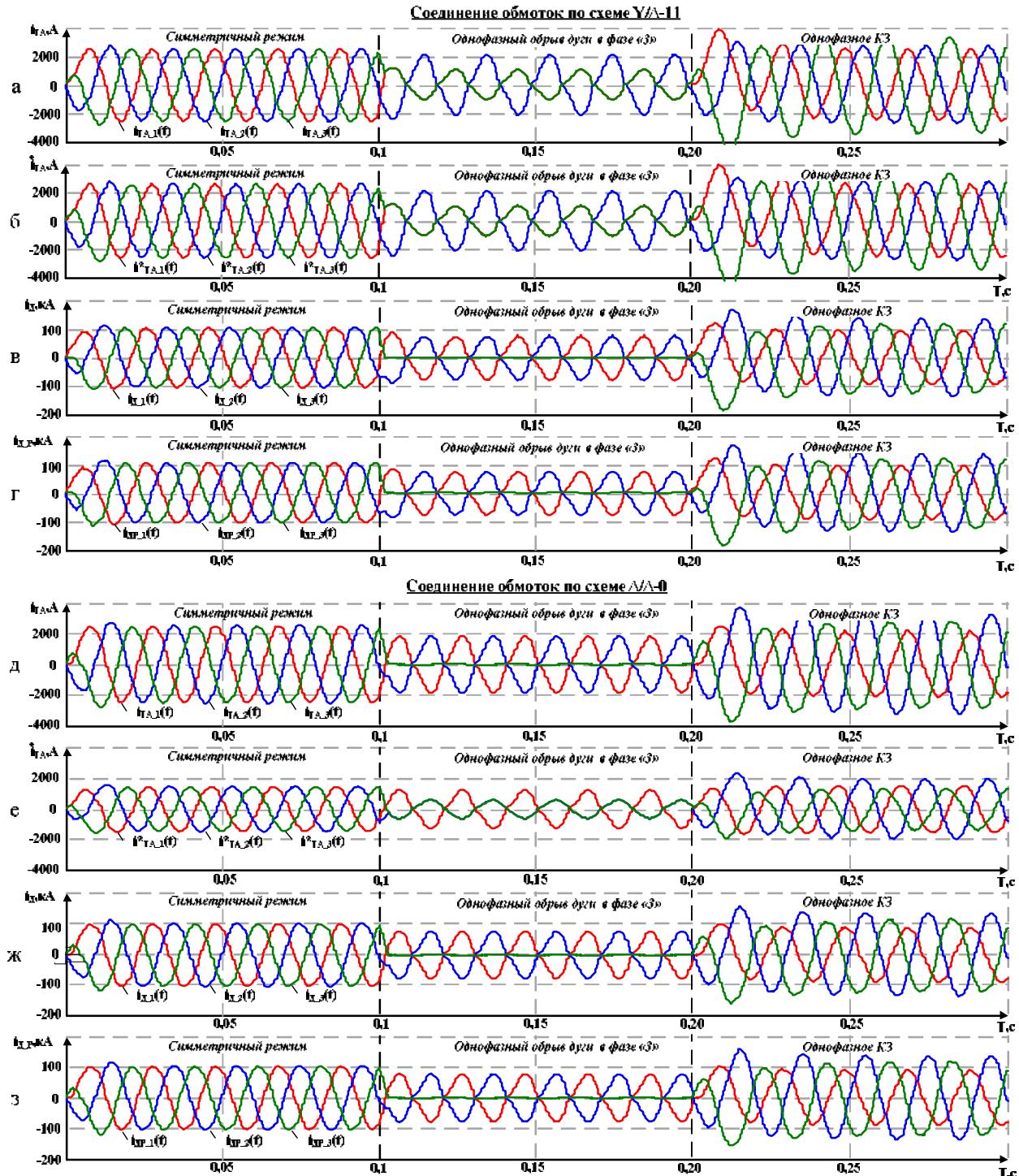


Рис. 4. Осциллографы, демонстрирующие особенности применения встроенных в обмотку трансформаторов тока при различных способах соединения обмотки ПТ: а, д – осциллографы сигналов с внешних трансформаторов тока; б, е – осциллографы сигналов с внутренних трансформаторов тока; в, ж – осциллографы фактического значения тока дуги; г, з – осциллографы восстановленного значения тока дуги

Fig. 4. Oscillograms demonstrating the features of the use of current transformers built into the winding for various methods of connecting the furnace transformer winding: а, д are oscillograms of signals from external current transformers; б, е are oscillograms of signals from internal current transformers, в, ж are oscillograms of actual arc current; г, з are oscillograms of the restored arc current value

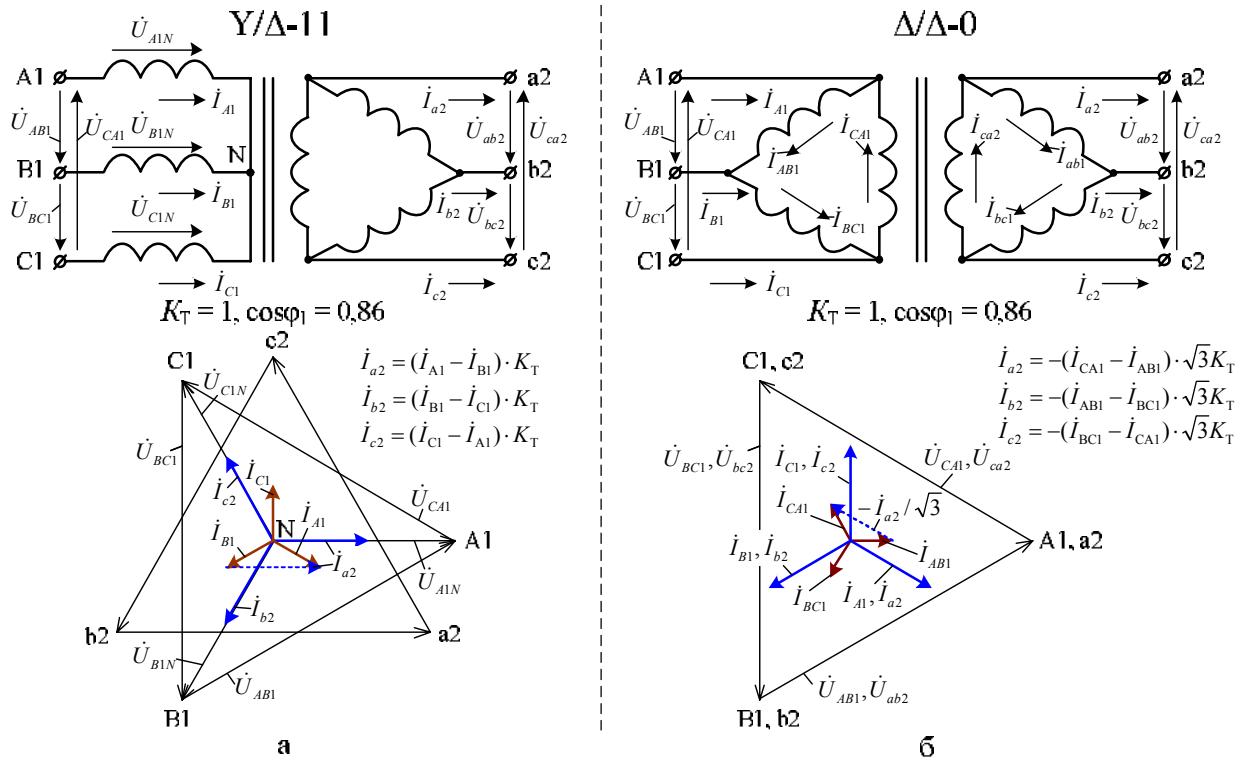


Рис. 5. Векторные диаграммы, показывающие взаимосвязь токов на первичной и вторичной сторонах печного трансформатора при различных группах соединения обмоток: а – группа соединения Y/Δ-11; б – группа соединения Δ/Δ-0

Fig. 5. Vector diagrams showing the relationship between currents on the primary and secondary sides of the furnace transformer for different groups of the winding connection: a is connection group Y/Δ-11; б is connection group Δ/Δ-0

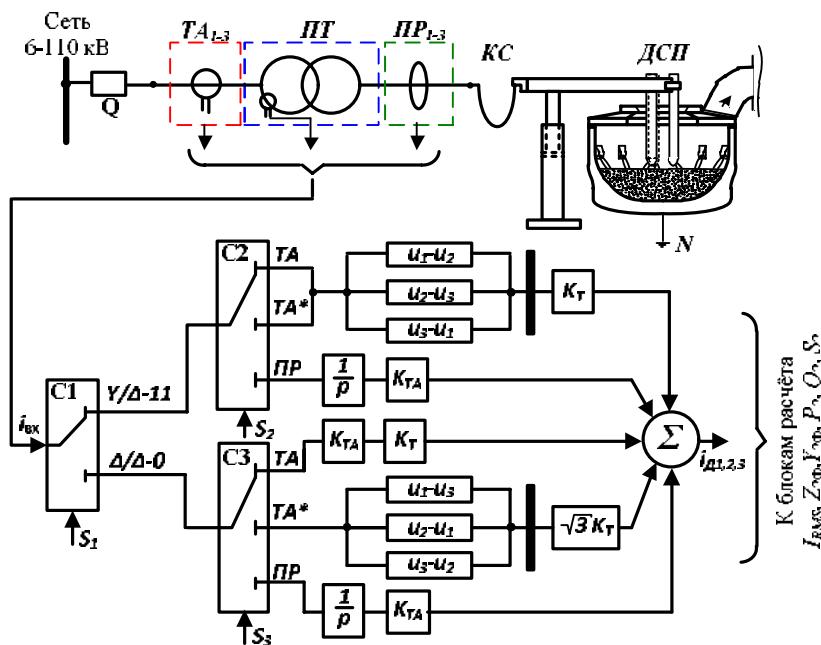


Рис. 6. Функциональная схема универсального алгоритма обработки сигналов для различных способов измерения тока дуги: С1, С2, С3 – селекторы №1, 2, 3; S₁, S₂, S₃ – сигналы управления селекторами №1, 2, 3 соответственно

Fig. 6. Functional diagram of a multi-source signal processing algorithm for various methods of arc current measurement: С1, С2, С3 are selectors No.1, 2, 3; S₁, S₂, S₃ are control signals for selectors No. 1, 2, 3, respectively

Данный алгоритм функционирует следующим образом. Изначально на вход селектора С1 подаётся сигнал $i_{\text{вх}}$ с системы измерения тока ДСП (УКП). В зависимости от величины сигнала управления S1 данный сигнал поступает либо на вход селектора С2 (случай соединения обмоток ПТ по схеме Y/Δ-11), либо на вход селектора С3 (случай соединения обмоток ПТ по схеме Δ/Δ-0). Величины управляющих сигналов S_2 и S_3 определяют, какое устройство измерения тока дуги используется на данный момент. После прохождения через селекторы входной сигнал подвергается преобразованиям, которые были подробно описаны ранее. Конечным результатом работы алгоритма является восстановленное значение сигнала тока электрической дуги на вторичной стороне ПТ, которое поступает непосредственно в систему управления электрическим режимом для дальнейшего расчёта действующего значения тока дуги I_{RMS} , полного импеданса фазы $Z_{2\phi}$ или полного адmittанса фазы $Y_{2\phi}$, активной, реактивной и полной мощности на вторичной стороне ПТ P_2 , Q_2 , S_2 соответственно.

Заключение

1. На практике при эксплуатации систем управления электрическим режимом используются три основные конфигурации систем измерения токов дуг, а именно: 1) системы на базе внешних трансформаторов тока на первичной стороне печного трансформатора; 2) системы на базе измерительных трансформаторов тока, встроенных в печной трансформатор трансформатора; 3) системы на базе поясов Роговского, установленных на вторичной стороне печного трансформатора. Применение той или иной конфигурации при различных группах соединения обмоток печного трансформатора ($\Delta/\Delta-0$ или $Y/\Delta-11$) влечёт за собой необходимость выполнения определённых предварительных преобразований для получения корректных сигналов мгновенных значений токов дуг.

2. В большинстве современных систем управления электрическим режимом ДСП (УКП) отсутствует возможность использования систем измерения токов дуг различной конфигурации. Как правило, имеется возможность работы только с одним типом системы измерения. Вследствие этого данные системы не обладают необходимой универсальностью, что в процессе эксплуатации ДСП (УКП) может вызвать проблемы функционирования этих систем, например при замене ПТ на новый с отличающейся группой соединения обмоток или установке системы измерения токов дуг другого типа.

3. Для решения вышеобозначенной проблемы разработан универсальный алгоритм обработки сигналов для различных способов измерения тока дуги. Данный алгоритм может быть реализован как в составе новой системы управления электрическим режимом, внедряемой в производство, так и в составе отдельного модуля. Данный алгоритм обеспечивает возможность функционирования системы управления ДСП (УКП) при различных конфигурациях системы измерения токов дуг, а также при различных группах соединения обмоток печного трансформатора ($\Delta/\Delta-0$ и $Y/\Delta-11$). Благодаря применению разработанного алгоритма все преобразования сигналов выполняются на программном уровне, без использования дополнительных аппаратных устройств в составе систем измерения тока, что повышает надёжность оборудования и обеспечивает меньшие эксплуатационные издержки [8–10].

Список литературы

1. Николаев А.А., Тулупов П.Г., Ивекеев В.С. Сравнительный анализ современных систем управления электрическим режимом дуговых сталеплавильных печей и установок ковш-печь// Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. Энергетика. 2020. Т. 20. № 3. С. 52–64.
2. Krüger K. Modeling and control of the electrical energy conversion in arc furnaces // Ph.D. Dissertation. Universität der Bundeswehr Hamburg, Düsseldorf, 1998.
3. Boulet B., Lalli G., and Ajersch M. Modeling and control of an electric arc furnace // American Control Conf. 2000.
4. 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. С. 106–120.
5. Bowman B. and Krüger K. Arc Furnace Physics // Germany: Verlag Stahleisen GmbH. 2009.
6. Panoiu M., Panoiu C., and Ghiormez L. Modeling of the electric arc behaviour of the electric arc furnace // 5th Int. Workshop on Soft Computing Applications. 2012. Pp. 261–271.
7. Nikolaev A.A., Tulupov P.G., Savinov D.A. Mathematical model of electrode positioning hydraulic drive of electric arc steelmaking furnace taking into account stochastic disturbances of arcs // 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 16–19 May 2017, St. Petersburg, Russia.
8. Czapla M., Karbowniczek M., Michaliszyn A. The optimization of electric energy consumption in the electric arc furnace // Archives of Metallurgy and Materials. 2008.

9. Bai Erwei. Minimizing Energy Cost in Electric Arc Furnace Steel Making by Optimal Control Designs. // Journal of Energy. 2014. 1–9.
10. Schliephake H., Timm K., Bandusch L. Computer controlled optimization of the productivity of ISPAT-Hamburger Stahlwerke's AC-UHP-EAF//5th European Electric Steel Congress. June 19–23. 1995.

References

1. Nikolaev A.A., Tulupov P.G., Ivezkeev V.S. The comparative analysis of modern electric mode control systems in electric arc and ladle furnaces. *Vestnik yuzhno-ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: energetika* [Bulletin of South Ural State University (Section: Power Engineering)], 2020, vol. 20, no. 3, pp. 52–64. (In Russ.)
2. Krüger K. Modeling and control of the electrical energy conversion in arc furnaces. Ph.D. Dissertation. Universität der Bundeswehr Hamburg, Düsseldorf, 1998.
3. Boulet B., Lalli G., Ajersch M. Modeling and control of an electric arc furnace. American Control Conf. 2000.
4. 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 universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2016, vol. 14, no. 3, pp. 106–120. (In Russ.)
5. Bowman B., Krüger K. Arc furnace physics. Germany: Verlag Stahleisen GmbH. 2009.
6. Panoiu M., Panoiu C., Ghiormez L. Modeling of the electric arc behaviour of the electric arc furnace. 5th Int. Workshop on Soft Computing Applications, pp. 261–271, 2012.
7. Nikolaev A.A., Tulupov P.G., Savinov D.A. Mathematical model of electrode positioning hydraulic drive of electric arc steelmaking furnace taking into account stochastic disturbances of arcs. 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 16–19 May 2017, St. Petersburg, Russia.
8. M Czapla M., Karbowaniczek M., Michaliszyn A. The optimization of electric energy consumption in the electric arc furnace. Archives of Metallurgy and Materials, 2008
9. Bai Erwei. Minimizing energy cost in electric arc furnace steel making by optimal control designs. Journal of Energy, 2014, pp. 1–9.
10. Schliephake H., Timm K., Bandusch L. Computer controlled optimization of the productivity of ISPAT-Hamburger Stahlwerke's AC-UHP-EAF. 5th European Electric Steel Congress. June 19–23, 1995.

Поступила 09.03.2021; принята к публикации 26.04.2021; опубликована 28.06.2021
Submitted 09/03/2021; revised 26/04/2021; published 28/06/2021

Николаев Александр Аркадьевич – кандидат технических наук, доцент,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: aa.nikolaev@magtu.ru. ORCID 0000-0001-5014-4852

Тулупов Платон Гарриевич – аспирант, младший научный сотрудник,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: tulupov.pg@mail.ru

Ивекеев Владимир Сергеевич – аспирант,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: vivekeev@yandex.ru

Alexander A. Nikolaev – PhD (Eng.), Associate Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: aa.nikolaev@magtu.ru. ORCID 0000-0001-5014-4852

Platon G. Tulupov – post graduate student, junior researcher,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: tulupov.pg@mail.ru

Vladimir S. Ivezkeev – post graduate student,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: vivekeev@yandex.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. Аффилияция. 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 страниц.

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.

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», М.В. Чукину.

Телефоны: (3519) 29-85-26, 22-14-93.

Email: rio_mgtu@mail.ru; vestnik@magt.ru (с указанием темы сообщения «Вестник МГТУ»).

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 $\gamma(t)=I_{n'}/I_{n_0}$
от времени и удалённости КЗ от выводов
асинхронного двигателя

- **таблицы** нумеруются, если их число более одной. Заголовок необходим, 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.**