

ВЕСТНИК

Магнитогорского государственного технического
университета им. Г.И. Носова

2021. Т.19, №1

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

Издается с марта 2003 года

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Председатель редакционной коллегии
В.М. Колокольников (Россия)

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

РЕДАКЦИЯ

Главный редактор О.Н. Тулупов
Первый заместитель главного редактора
М.А. Полякова
Заместители главного редактора:
А.Г. Корчунов, О.С. Логунова,
Н.Н. Орехова, В.Р. Храмин
Ответственный секретарь М.В. Шубина
Редактор Н.П. Боярова
Технический редактор И.В. Ключникова
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: <http://www.akc.ru/itm/vestnik-magnitogorskogo-gosudarstvennogo-tehnicheskogo-universiteta-im-gi-nosova/>

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

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

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

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

Адрес редакции:

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

Адрес издателя:

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

Адрес типографии:

455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», участок оперативной полиграфии
Выход в свет 25.03.2021. Заказ 69. Тираж 500 экз. Цена свободная.

VESTNIK

of Nosov Magnitogorsk State Technical University

2021. Vol.19, no.1

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

PUBLISHED SINCE MARCH, 2003

EDITORIAL BOARD MEMBERS

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

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

EDITORIAL STAFF

Editor-in-Chief O.N. Tulupov

First Deputy Chief Editor M.A. Polyakova

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

Executive Secretary M.V. Shubina

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 29.12.10

Editorial office:

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

Publisher office:

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

Printing office:

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

Publication date: 25.03.2021. Order 69. Circulation: 500. Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

Разработка полезных ископаемых	4
<i>Ляшенко В.И., Голик В.И., Дмитрак Ю.В., Франчук В.П.</i>	
Обоснование параметров вибросамочного транспорта твердеющих закладочных смесей в шахты	4
Технологии переработки и утилизации техногенных образований и отходов	17
<i>Никитина Т.Ю., Петров Г.В.</i>	
Современное состояние и технологические перспективы применения малотоксичных растворителей золота для переработки техногенного сырья	17
Литейное производство	29
<i>Аркулис М.Б., Дубский Г.А., Долгушин Д.М., Мишенева Н.И.</i>	
Термодинамика и кинетика кристаллизации алюминиевых сплавов в постоянном магнитном поле	29
Материаловедение и термическая обработка металлов	35
<i>Кулемина А.А., Ковенский И.М.</i>	
Применение электролитических никель- молибденовых покрытий для защиты деталей нефтепромышленного оборудования	35
<i>Шекшеев М.А., Ширяева Е.Н.</i>	
Формирование структуры наплавленного металла низкоуглеродистой стали при различных технологических воздействиях	42
<i>Хлыбов А.А., Ворожева Е.Л.</i>	
Влияние исходной литой структуры на качество горячекатаного проката доэвтектоидной стали	48
Стандартизация, сертификация и управление качеством	60
<i>Полякова М.А., Дрягун Э.П., Соколов А.А., Харитонов В.А., Петров И.М.</i>	
Методика определения степени гармонизации стандартов различных категорий	60
<i>Шিশлонова А.Н., Адищев П.Г., Мальков М.В.</i>	
Входной контроль феррониобия, предназначенного для микролегирования стали	69
Новые технологические процессы и оборудование	75
<i>Елемесов К.К., Наурызбаева Д.К., Крупник Л.А., Басканбаева Д.Д., Игбаева А.Е.</i>	
Изыскание новых конструкционных материалов и технологии изготовления прочных корпусов редукторов и центробежных насосов	75
<i>Иванов В.М., Кожухов Ю.В.</i>	
Повышение качества проектирования малорасходных ступеней центробежных компрессоров путем создания базы данных виртуальных рабочих колес по результатам CFD-моделирования	83

CONTENTS

Mining and Mineral Processing	4
<i>Lyashenko V.I., Golik V.I., Dmitrak Yu.V., Franchuk V.P.</i>	
Rationale for the Parameters of the Vibration Gravity Transportation of Solidifying Filling Mixtures to Mines	4
Recycling of Man-Made Mineral Formations and Waste	17
<i>Nikitina T.Yu., Petrov G.V.</i>	
Current State and Technological Prospects of Applying Low-Toxic Gold Solvents for Processing Technogenic Raw Materials	17
Foundry Engineering	29
<i>Arkulis M.B., Dubskii G.A., Dolgushin D.M., Misheneva N.I.</i>	
Thermodynamics and Kinetics of Crystallization of Aluminum Alloys in a Constant Magnetic Field	29
Materials Science and Heat Treatment of Metals	35
<i>Kulemina A.A., Kovenskiy I.M.</i>	
Electrolytic Nickel-Molybdenum Coatings Applied to Protect Parts of Oilfield Equipment	35
<i>Sheksheev M.A., Shiryayeva E.N.</i>	
Forming the Structure of Deposited Metal of Low-Carbon Steel Under Various Types of Treatment	42
<i>Khlybov A.A., Vorozheva E.L.</i>	
Influence of the Initial Cast Structure on the Quality of Hot Rolled Hypoeutectoid Steel	48
Standardization, Certification and Quality Management	60
<i>Polyakova M.A., Dryagun E.P., Sokolov A.A., Kharitonov V.A., Petrov I.M.</i>	
Method to Estimate the Degree of Harmonization Between Standards of Different Categories	60
<i>Shishlonova A.N., Adishchev P.G., Malkov M.V.</i>	
Incoming Inspection of Ferroniobium Applied for Steel Microalloying	69
New Technological Processes and Equipment	75
<i>Yelemessov K.K., Nauryzbayeva D.K., Krupnik L.A., Baskanbayeva D.D., Igbayeva A.E.</i>	
Research on New Structural Materials and Manufacturing Technologies for Robust Gearbox and Centrifugal Pump Housings	75
<i>Ivanov V.M., Kozhukhov Yu.V.</i>	
Improving the Design Quality of Low Flow Centrifugal Compressor Stages by Creating a Database of Virtual Impellers Based on CFD Modeling Results	83

РАЗРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ MINING AND MINERAL PROCESSING

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

УДК 504.55.054:622(470.6)

DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-1-4-16



ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВИБРОСАМОТЕЧНОГО ТРАНСПОРТА ТВЕРДЕЮЩИХ ЗАКЛАДОЧНЫХ СМЕСЕЙ В ШАХТЫ*

Ляшенко В.И.¹, Голик В.И.², Дмитрак Ю.В.², Франчук В.П.³

¹Украинский научно-исследовательский и проектно-изыскательский институт промышленной технологии, Желтые Воды, Украина

²Северо-Кавказский государственный технологический университет, Владикавказ (PCO–Алания), Россия

³Национальный технический университет «Днепропетровская политехника», Днепр, Украина

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы): при подземной разработке месторождений от 40 до 80% образованных техногенных пустот заполняют твердеющими закладочными смесями. В большинстве случаев твердеющие закладочные смеси транспортируют самотеком, возможности которого зависят от соотношения вертикальной и горизонтальной составляющей закладочного трубопровода, а для глубоких рудников и шахт не превышают 1500 м. **Используемые методы:** теоретических обобщений с применением математической статистики, физическое и математическое моделирование, выполнение расчетов и технико-экономических обоснований, лабораторные и натурные экспериментальные исследования, промышленные испытания в условиях действующих предприятий по стандартным и новым методикам. **Новизна:** изучены технологии и технические средства для транспортирования твердеющих закладочных смесей и разработан алгоритм расчета схем их трубопроводного транспорта в подземные выработанные пространства, содержащих 0,10–0,35 доли единицы диспергированных частиц с концентрацией твердых частиц в воде 0,10–0,85 доли единицы и осадкой стандартного конуса 10–13 см. **Результат:** увеличение дальности доставки твердеющих смесей расширяет область применения технологий с закладкой выработанного пространства, сокращает капитальные и эксплуатационные затраты и избавляет от необходимости строительства новых закладочных комплексов с отвлечением значительных площадей земной поверхности. **Практическая значимость:** изученные нами параметры транспортирования твердеющих смесей в техногенные пустоты на большое расстояние при небольшой глубине горных работ показали, что наиболее перспективным является вибросамотечный транспорт, обеспечивающий гомогенизацию смеси и приращение прочности за счет активации в трубопроводе. Предложен алгоритм расчета параметров трубопроводного транспорта твердеющих закладочных смесей для двух вариантов доставки, который может быть востребован при проектировании технологий разработки месторождений подземным способом.

Ключевые слова: подземная разработка, твердеющая смесь, трубопроводный транспорт, параметры транспортирования, математическое моделирование.

© Ляшенко В.И., Голик В.И., Дмитрак Ю.В., Франчук В.П., 2021

Для цитирования

Обоснование параметров вибросамотечного транспорта твердеющих закладочных смесей в шахты / Ляшенко В.И., Голик В.И., Дмитрак Ю.В., Франчук В.П. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №1. С. 4–16. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-1-4-16>



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

* В работе принимали участие И.К. Поддубный, В.Н. Платонов, В.З. Дятчин, А.Х. Дудченко, А.Г. Скоратенко и др.
Acknowledgement: I.K. Poddubny, V.N. Platonov, V.Z. Dyatchin, A.H. Dudchenko, A.G. Skoratenko, etc. took part in work

RATIONALE FOR THE PARAMETERS OF THE VIBRATION GRAVITY TRANSPORTATION OF SOLIDIFYING FILLING MIXTURES TO MINES

Lyashenko V.I.¹, Golik V.I.², Dmitrak Yu.V.², Franchuk V.P.³

¹State Enterprise Ukrainian Research and Design Institute for Industrial Technology, Zhovti Vody, Ukraine

²North Caucasian Mining and Metallurgical Institute (State Technological University), Vladikavkaz, Russia

³Dnipro Polytechnic National Technical University, Dnipro, Ukraine

Abstract. Problem Statement (relevance of the research): In underground mining from 40 to 80% of the formed man-made cavities are filled with solidifying filling mixtures. In most cases, such solidifying filling mixtures are transported by gravity, and performance depends on the ratio of vertical and horizontal components of filling pipelines, and for deep-level pits and mines their length do not exceed 1500 m. **Methods Applied:** Methods of theoretical generalizations using mathematical statistics, physical and mathematical simulation, calculations and feasibility studies, laboratory and field experimental studies, industrial tests at operating plants according to conventional and new methods. **Novelty:** The authors studied the technologies and facilities for the transportation of solidifying backfill mixtures and developed an algorithm for calculating diagrams of their pipeline transport to underground mined-out spaces containing 0.10–0.35 decimal quantity of dispersed particles with a concentration of solid particles in water of 0.10–0.85 decimal quantity and a 10–13 cm sediment of a standard cone. **Result:** An increased delivery range of solidifying mixtures expands the field of application of technologies with backfilling of mined-out space, reduces capital and operating costs and eliminates the need for building new filling complexes with the diversion of significant landplots. **Practical significance:** The authors studied the parameters of transporting solidifying mixtures to man-made cavities over a long distance at a shallow depth of mining and showed that the most promising transportation was vibration gravity transportation ensuring homogenization of the mixture and an increase in strength due to its activation in the pipeline. An algorithm is suggested to calculate the parameters of the pipeline transport of solidifying backfill mixtures for two delivery options. Such algorithm may be useful, when designing underground mining technologies.

Keywords: underground mining, solidifying mixture, pipeline transport, transportation parameters, mathematical modeling.

For citation

Lyashenko V.I., Golik V.I., Dmitrak Yu.V., Franchuk V.P. Rationale for the Parameters of the Vibration Gravity Transportation of Solidifying Filling Mixtures to Mines. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021, vol. 19, no. 1, pp. 4–16. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-1-4-16>

Введение

При подземной разработке месторождений от 40 до 80% образованных техногенных пустот заполняют твердеющими закладочными смесями. В большинстве случаев твердеющие закладочные смеси транспортируют самотеком, возможности которого зависят от соотношения вертикальной и горизонтальной составляющей закладочного трубопровода и для глубоких рудников и шахт не превышают 1500 м [1, 2]. При самотечно-пневматическом способе твердеющие закладочные смеси движутся вначале самотеком, а затем доставляются сжатым воздухом к месту их укладки. Оба способа применимы при соотношении вертикальной и горизонтальной частей закладочного трубопровода не менее 1/5 [3, 4]. Поэтому совершенствование технологий и технических средств для транспортирования твердеющих закладочных смесей на основе разработки алгоритма расчета схем их трубопроводного транспорта в подземные выработанные пространства, содержащих 0,10–0,35 доли еди-

ницы диспергированных частиц с концентрацией твердых частиц в воде 0,10–0,85 доли единицы и осадкой стандартного конуса 10–13 см, обеспечивающих уменьшение затрат на изготовление и транспортирование твердеющих закладочных смесей, особенно с вовлечением периферийных участков эксплуатируемых месторождений, – важная научная и практическая задача, требующая решения [5, 6].

Для решения поставленных задач были выполнены анализ литературных источников, методов теоретических исследований и обобщений с применением исследования динамики (в зоне резонанса, использовался принцип Вольтерры и понятие о комплексном модуле упругости, введенном Е.С. Сорокиным), математической статистики, физическое и математическое моделирование, расчеты, лабораторные и натурные экспериментальные исследования, промышленные испытания в условиях действующих предприятий по стандартным и новым методикам [7, 8]. Зависимости получены на основе аналитических, экспериментальных исследований и опыта

эксплуатации установок трубопроводного транспорта твердеющих смесей в шахты [9, 10].

Для исследования были поставлены следующие задачи:

1. Выполнить математическое и физическое моделирование, а также расчет параметров самотечного и вибросамотечного транспорта твердеющих закладочных смесей.
2. Разработать технические средства для самотечного и вибросамотечного транспорта твердеющих закладочных смесей.
3. Предложить новый комплекс технических средств для активации вяжущего (доменного гранулированного шлака), инертных заполнителей (грохочения некондиционных материалов до требуемого класса крупности) и воды затворения при изготовлении и транспортировании твердеющих закладочных смесей.

Обсуждение результатов исследований

Установки вибросамотечного транспорта подают твердеющие смеси на расстояние, значительно превышающее высоту вертикального става. На рудниках по добыче урановых руд Тюрингии и Саксонии бывшего Советско-Германского акционерного общества (СГАО) «Висмут» твердеющую смесь с осадкой конуса Строй ЦНИЛ 8,0 см подавали на расстояние, в 3 раза превышающее высоту вертикального става закладочного трубопровода [11, 12]. Установка вибросамотечного транспорта твердеющих закладочных смесей на рудном месторождении Шокпак-Камышовое (Республика Казахстан) включала вертикальный став и горизонтальный трубопровод [13, 14].

Подача твердеющих закладочных смесей осуществлялась порциями объемом до 400 м³. К особенностям процесса транспортирования относились сопротивление транспортированию на каскадном участке, использование малоактивных заполнителей с содержанием глины до 50% и активированного в дезинтеграторе жесткого вяжущего доменного гранулированного шлака. Секционированный участок трубопровода был установлен на резиновые амортизационные опоры, а секции трубопровода длиной по 200 м снабжены вибровозбудителями. Под воздействием вибрации смесь приобретала состояние повышенной текучести. Расход энергии на активацию процесса доставки смесей в установке составил 0,15–0,22 кВт/м³ смеси при подаче на расстояние 2,0 км, частоте колебаний 10–30 Гц и амплитуде 0,5–1,5 мм. Средняя скорость движе-

ния смеси по трубопроводу составила 2,5–3,0 м/с. Смесь транспортировалась без добавки воды при осадке конуса 9 см.

При одинаковом расходе вяжущего в результате вибрации прочность закладочного массива увеличивалась на 20–25%. Вынуждающая сила возбудителя составляла 2–5 кН, амплитуда колебания трубопровода 1,2–2,0 мм, частота колебаний 6–13 Гц. Влияние одного возбудителя воздействовало на участок трубопровода длиной 200–220 м [15, 16].

Самотечный и вибросамотечный трубопроводный транспорт твердеющих закладочных смесей близки по расчету технологических параметров. Преимущество и отличие заключается в том, что при вибросамотечном транспорте обеспечивается уменьшение сопротивления перемещению смеси по трубопроводу и повышается прочность закладки. При этом усложняется конструкция наличием упругих опор и вибровозбудителей, требуется также динамический расчет конструкции [17, 18].

Расчет параметров самотечного трубопроводного транспорта твердеющих смесей

Диаметр закладочного трубопровода

$$D = 24,45 \cdot V_{\text{ср}} \cdot d_c \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\tau_o}}, \quad (1)$$

где $V_{\text{ср}}$ – скорость движения смеси без расслоения, м/с: 0,5–0,7 м/с – при мелком заполнителе, 0,7–1,0 м/с – при крупном заполнителе; d_c – средняя крупность заполнителя, мм; ρ – плотность закладочной смеси, кг/м³; τ_o – предельное напряжение сдвига смеси, Па.

Пропускная способность закладочного трубопровода, м³/с,

$$Q = SV, \quad (2)$$

где S – поперечное сечение трубопровода, м²; V – скорость движения смеси, м/с.

Удельные потери давления на горизонтальном участке закладочного трубопровода Δp , Па/м, определяются из выражения

$$\Delta p = 26,5 \frac{Q \cdot \eta}{D^4} + \frac{2 \cdot \tau_o}{3 \cdot D}, \quad (3)$$

где $\eta = 0,1 \cdot \sqrt{\tau_o}$ – вязкость закладочной смеси, Па/с.

Давление, создаваемое столбом смеси в вертикальном стае закладочного трубопровода p_c , Па, определяется из выражения

$$p_c = \rho \cdot H_1 \cdot g, \quad (4)$$

где $H_1 = k_3 \cdot H$ – эквивалентная высота заполнения смеси вертикального става, м (с учетом потерь напора при транспортировании, $k_3=0,7-0,8$); H – высота вертикального става, м (с учетом перепада высот горизонтального участка); g – ускорение свободного падения, м/с^2 .

Максимальная дальность доставки твердеющей закладочной смеси определяется из выражения

$$L = \frac{P_c}{\Delta p} - l_k \cdot n_k, \quad (5)$$

где l_k , n_k – приведенные потери напора в изгибе (колене) и количество колен.

Пример расчета самотечного трубопроводного транспорта закладочных смесей

Исходные данные: предельное напряжение сдвига $\tau_o = 100$ Па; средняя крупность заполнителя $d_c = 2,3$ мм; плотность смеси $\rho = 2000$ кг/м^3 ; производительность комплекса $Q = 100$ $\text{м}^3/\text{ч}$, $Q = 0,0278$ $\text{м}^3/\text{с}$; высота вертикального става $H = 140$ м; разница по высоте между началом и концом горизонтального участка трубопровода $h_o = 12$ м; количество колен $n_k = 3$ шт.

Решение. Диаметр трубопровода определится из выражения (1):

$$\begin{aligned} D &= 24,45 \cdot V_{\text{ср}} \cdot d_c \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\tau_o}} = \\ &= 24,45 \cdot 0,7 \cdot 0,0023 \cdot \sqrt{\frac{2000}{100}} = 0,176 \text{ м.} \end{aligned}$$

Для трубы с наружным диаметром 194 мм и внутренним 174 мм скорость движения твердеющей закладочной смеси определится из выражения (2):

$$V = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D^2} = \frac{4 \cdot 100}{\pi \cdot 0,174^2} = 1,168 \text{ м/с.}$$

Величина гидростатического давления в начале горизонтального участка трубопровода определится из выражения (4):

$$\begin{aligned} p_c &= \frac{0,7(H - h_o) \rho g}{10^6} = \\ &= \frac{0,7 \cdot (140 - 12) \cdot 2000 \cdot 9,81}{10^6} = 1,758 \text{ МПа.} \end{aligned}$$

Удельные потери давления на горизонтальном участке трубопровода твердеющей закладочной смеси определяются из выражений (3) и (4):

- вязкость $\eta = 0,1 \cdot \sqrt{\tau_o} = 0,1 \cdot \sqrt{100} = 1,0$;

- удельные потери давления

$$\begin{aligned} \Delta p &= 26,5 \frac{Q \cdot \eta}{D^4} + \frac{2 \cdot \tau_o}{3 \cdot D} = \\ &= 26,5 \frac{0,0278 \cdot 1,0}{0,174^4} + \frac{2 \cdot 100}{3 \cdot 0,174} = 1187 \text{ Па/м.} \end{aligned}$$

Дальность доставки твердеющей закладочной смеси самотечным трубопроводным транспортом определится из выражения (5):

$$L = \frac{P_c}{\Delta p} - n_k l_k = \frac{1758000}{1187} - 3 \cdot 20 = 1340 \text{ м.}$$

Расчет параметров трубопроводного вибросамотечного транспорта твердеющих смесей

На трубопровод оказывается вибрационное воздействие знакопеременной силы, которое снижает сопротивление транспортированию, в то время как гидравлический напор или пневматический поток перемещает материал [19]. Основными параметрами вибродоставки являются: длина транспортирования L , высота вертикального става трубопровода H , длина секций l_1 и расположение вибровозбудителя в пределах секции l_2 . Воздействие вибрации обеспечивает тиксотропное разжижение дисперсной среды и перемещение частиц смеси, контактирующей со стенками трубопровода. Воздействие вибрации на твердеющую закладочную смесь проявляется путем ускорения колебаний трубопровода, которое характеризуется коэффициентом режима вибротранспортирования

$$\Gamma = \frac{A \cdot \omega^2}{g}, \quad (6)$$

где A и ω – амплитуда и частота колебаний; g – ускорение земного тяготения, м/с^2 .

При $\Gamma = 0,6-0,9$ создается тиксотропно-разжиженный пристеночный слой и исключается расслоение твердеющей смеси (для смеси, расположенной в емкости, имеющей свободную поверхность, для трубопровода значение Γ можно выбирать несколько больше). Ориентируясь на величину Γ из выражения (6), задаваясь величиной A , находят частоту вынужденных колебаний ω (для инерционных вибровозбудителей с асинхронным приводом или мотор-вибраторов обычно выбирается ω и определяется амплитуда A). Эффективное воздействие вибрации на смесь обеспечивается при колебании трубопро-

вода с минимальным значением коэффициента режима вибротранспортирования

$$\Gamma_{\min} = \frac{\rho_r - \rho_o}{\rho_r}, \quad (7)$$

где ρ_r , ρ_o – соответственно плотности частиц заполнителя и дисперсной среды, кг/м³.

Расчет технологических параметров трубопровода

Особенностью движения твердеющей закладочной смеси в установках вибросамотечного транспорта является наличие основного потока, в котором сохраняются вязкопластичные свойства смеси, и пристеночного слоя, отличающегося пониженной вязкостью. Расслоение смеси исключается при скорости её продольного движения 0,5–0,7 м/с – для смесей с заполнителем крупностью до 5,0 мм и 0,7–1,0 м/с – для смесей с заполнителем крупностью 5,0–40,0 мм.

Внутренний диаметр трубопровода (минимальный)

$$D_m = 24,45 \cdot V_{\text{ср}} \cdot d_{\text{ср}} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\tau_o}}, \quad (8)$$

где $V_{\text{ср}}$ – средняя скорость транспортирования, м/с; $d_{\text{ср}}$ – средний размер транспортируемого материала, мм.

Пропускная способность трубопровода (производительность установки), м³/с,

$$Q = V \frac{\pi \cdot D^2}{4}, \quad (9)$$

где D – внутренний диаметр трубопровода, м; V – скорость перемещения смеси, м/с.

Наиболее эффективное вибрационное воздействие на твердеющую смесь происходит при скорости её движения $V=1,0$ – $1,5$ м/с. Тогда диаметр трубопровода

$$D = 2 \cdot \sqrt{\frac{Q}{\pi \cdot V}} \geq 24,45 \cdot V \cdot d_{\text{ср}} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\tau_o}}. \quad (10)$$

Удельные потери давления на горизонтальном участке трубопровода, Па/м,

$$\Delta p = \frac{158,73}{D^3} + \frac{4 \cdot \tau_o'}{D \cdot \eta_l}, \quad (11)$$

$$\frac{6}{\eta} + \frac{1}{\eta_l},$$

где τ_o' – напряжение сдвига пристеночного слоя, Па; η_l – вязкость тиксотропно-разжиженного пристенного слоя, Па·с,

$$\eta_l = 0,1 \cdot \sqrt{\tau_o'}. \quad (12)$$

Дальность подачи твердеющей смеси установкой

$$L = \frac{P_c}{\Delta p}. \quad (13)$$

Расчет динамических параметров секции трубопровода

Для обеспечения эффективного воздействия вибрации на твердеющую закладочную смесь необходимо обеспечить горизонтальному участку трубопровода в поперечном направлении параметры вибраций, обеспечивающие требуемый коэффициент вибротранспортирования Γ , величина которого определена по формуле (6). Для этого участок горизонтального трубопровода разбивается на ряд секций, приводимых в движение отдельным вибровозбудителем [20]. Длина секции трубопровода l , обслуживаемой одним локально установленным вибровозбудителем, выбирается такой, чтобы поперечные колебания трубы на всем ее протяжении находились в пределах $\Gamma=0,6$ – $1,0$. Каждая секция установлена на ряд упругих опор, под воздействием вибровозбудителя труба с наполнителем (твердеющей смесью) совершает изгибные колебания в горизонтальной и вертикальной плоскости (рис. 1).

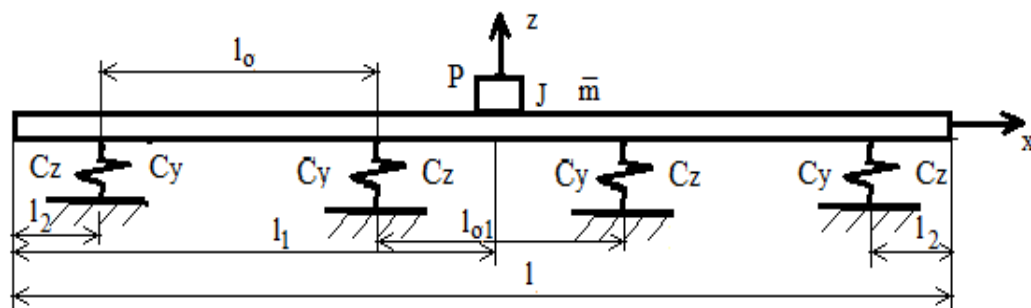


Рис. 1. Расчетная схема для определения изгибных колебаний секции горизонтального трубопровода
Fig. 1. Design diagram for determining bending vibrations of a horizontal pipeline section

Секция установлена на основании с помощью ряда упругих опор равномерно, сообразно массе элементов секции, расположенных по длине. При этом упругая опора равномерно распределена по длине секции. Рассмотрим секцию как балку со свободными концами, расположенную на упругом основании. Уравнения свободных колебаний по оси z будут иметь вид

$$EJ \frac{d^4 z}{dx^4} + C_p \cdot z = -\bar{m} \frac{d^2 z}{dt^2},$$

$$\text{или} \quad a^2 \left(\frac{d^4 z}{dx^4} + \beta^4 \cdot z \right) = - \left(\frac{d^2 z}{dt^2} \right), \quad (14)$$

где E – модуль упругости материала трубы, Па;
 J – момент инерции сечения секции, м^4 ,

$$J = \frac{\pi \cdot (D_n^4 - D^4)}{64}; \quad (15)$$

z – перемещение сечения трубы, м;
 \bar{m} – распределенная масса секции, кг/м ,

$$\bar{m} = \rho_m \frac{\pi \cdot (D^2 - d^2)}{4} + \rho_c \frac{\pi \cdot d^2}{4}, \quad (16)$$

ρ_m, ρ_c – соответственно плотности материала трубы и твердеющей закладки, кг/м^3 ;

a – «скорость сечения» при изгибных колебаниях (величина, созвучная со скоростью волны деформации при продольных колебаниях), $\text{м}^2/\text{с}$,

$$a = \sqrt{\frac{EJ}{\bar{m}}}; \quad (17)$$

β – параметр, характеризующий упругие опоры,

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{C_p}{E \cdot J}}; \quad (18)$$

C_p – погонная жесткость упругого основания,

$$C_p = \frac{n \cdot C_z}{l}, \quad (19)$$

C_z – жесткость упругой опоры;

n – число опор;

x – координата положения сечения;

t – время протекания процесса изгибных колебаний трубопровода, с.

Рассматривая нормальную форму колебаний,

$$z = Z(x) \cdot (A \sin(pt) + B \cos(pt)). \quad (20)$$

Подставляя (20) в уравнение (14), получим

$$\frac{d^4 Z(x)}{dx^4} + \beta^4 Z(x) = \frac{p^2}{a^2} Z(x). \quad (21)$$

Общее решение уравнения (21) представим в виде

$$\begin{aligned} Z(x) = & C_1 [\cos(kx) + \cosh(kx)] + \\ & + C_2 [\cos(kx) - \cosh(kx)] + \\ & + C_3 [\sin(kx) + \sinh(kx)] + \\ & + C_4 [\sin(kx) - \sinh(kx)], \end{aligned} \quad (22)$$

где коэффициенты C_i определяются из условий на концах стержня.

В результате подстановки (22) в (21) получим

$$p^2 = a^2 (k^4 + \beta^4). \quad (23)$$

Граничные условия для балки со свободными концами имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} 1) \left(\frac{d^2 z}{dx^2} \right)_{x=0} = 0; \quad 2) \left(\frac{d^3 z}{dx^3} \right)_{x=0} = 0; \\ 3) \left(\frac{d^2 z}{dx^2} \right)_{x=l} = 0; \quad 4) \left(\frac{d^3 z}{dx^3} \right)_{x=l} = 0. \end{aligned} \quad (24)$$

Подставляя (22) в (23), выясним, что для удовлетворения условий 1 и 2 в (24) нужно, чтобы

$$C_2 = C_4 = 0.$$

Тогда

$$Z(x) = C_1 [\cos(kx) + ch(kx)] + C_3 [\sin(kx) + sh(kx)].$$

Представим это выражение в виде

$$Z(x) = C_1 \left\{ \left[\cos(kx) + ch(kx) \right] + \frac{C_3}{C_1} \left[\sin(kx) + sh(kx) \right] \right\}. \quad (25)$$

Из зависимостей 3 и 4 в (24) будем иметь

$$\begin{aligned} [-\cos(kl) + ch(kl)] + \frac{C_3}{C_1} [-\sin(kl) + sh(kl)] = 0, \\ [\sin(kl) + sh(kl)] + \frac{C_3}{C_1} [-\cos(kl) + ch(kl)] = 0. \end{aligned} \quad (26)$$

Чтобы коэффициенты C_1, C_3 имели отличное от нуля значение, необходимо равенство нулю определителя системы уравнений (27), т. е. для получения нетривиального решения системы уравнений (26) необходимо приравнять к нулю определителя:

$$\begin{vmatrix} -\cos(kl) + ch(kl) & -\sin(kl) + sh(kl) \\ \sin(kl) + sh(kl) & -\cos(kl) + ch(kl) \end{vmatrix} = 0.$$

После преобразований получим частотное уравнение

$$[-\cos(kl) + ch(kl)]^2 - [sh^2(kl) - \sin^2(kl)] = 0.$$

Принимая во внимание, что

$$ch^2(kl) - sh^2(kl) = 1, \cos^2(kl) + \sin^2(kl) = 1,$$

получим

$$\cos(kl) \cdot ch(kl) = 1, \quad (27)$$

отсюда

$$k_0 l = 0, \quad k_1 l = 4,730, \quad k_2 l = 7,853, \quad k_3 l = 10,996, \\ k_4 l = 14,137, \quad k_5 l = 17,279, \quad k_6 l = 20,42, \quad k_7 l = 23,562 \dots$$

Складывая зависимости (27), для полученных значений $k_i l$ будем иметь

$$q(k_i) = \frac{C_3}{C_1} = \frac{\cos(k_i l) - ch(k_i l) - \sin(k_i l) - sh(k_i l)}{-\sin(k_i l) + sh(k_i l) - \cos(k_i l) + ch(k_i l)} = -1.$$

При изучении вынужденных колебаний примем прогиб в виде ряда

$$z(x) = \sum_{i=1,2,3,\dots} \varphi_i \cdot Z(k_i x). \quad (28)$$

Дифференциальное уравнение для φ_i получается при применении принципа виртуальных работ. В результате получим уравнение

$$\ddot{\varphi}_i + p_i^2 \cdot \varphi_i = \frac{2}{\bar{m} \cdot l} Q_i, \quad (29)$$

в котором Q_i должно быть определено из условия, что $Q_i \cdot \delta \varphi_i$ представляет виртуальную работу возмущающей силы.

Колебания с собственной частотой p_i вследствие диссипации энергии со временем затухнут, тогда уравнение, описывающее вынужденные колебания системы, будет иметь вид

$$\varphi_i = \frac{2}{\bar{m} \cdot l \cdot p_i} \int_0^t Q_i \cdot \sin[p_i \cdot (t - t_1)] dt_1. \quad (30)$$

Исследуем систему с распределенными параметрами, когда движение в каждой точке трубопровода зависит не только от времени, но и от координаты положения сечения x (от номера гармоники колебаний k_i , длины волны гармоники l_1), поэтому $Z(k_i, l_1)$ определяет форму изги-

ба. В случае, когда на расстоянии l_1 от левого края секции приложена сила

$$P = mor \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega t),$$

величина Q_i будет

$$Q_i = mor \cdot \omega^2 \cdot Z(k_i l_1) \cdot \sin(\omega t). \quad (31)$$

где mor – кинетостатический момент дебалансных грузов, кг·м; $Z(k_i l_1)$ – форма изгиба трубы.

В результате, подставляя (31) в (29), будем иметь уравнение

$$\ddot{\varphi}_i + p_i^2 \cdot \varphi_i = \frac{mor \cdot \omega^2}{\bar{m} \cdot l} Z(k_i l_1) \cdot \sin(\omega t).$$

Опуская собственные колебания, вызываемые начальными условиями, рассмотрим только вынужденные колебания, вызванные гармонической силой, тогда

$$\varphi_i = \frac{mor \cdot \omega^2}{\bar{m} \cdot l} Z(k_i l_1) \frac{1}{p_i} \int_0^t \sin(\omega t_1) \times \\ \times \sin[p_i(t - t_1)] dt_1 = \frac{mor \cdot \omega^2}{\bar{m} \cdot l} \times \\ \times Z(k_i l_1) \left\{ \frac{1}{(p_i^2 - \omega^2)} \sin(\omega t) - \frac{\omega}{p_i(p_i^2 - \omega^2)} \sin(p_i t) \right\}. \quad (32)$$

Подставляя это уравнение в ряд (28), получим зависимость для изгибных колебаний секции. Первый ряд, содержащий множитель $\sin(\omega t)$, представляет вынужденные колебания.

Свободные колебания с множителем $\sin(p_i t)$ из-за неупругих сопротивлений со временем затухнут, останутся только вынужденные. То есть для описания колебаний секции будем иметь зависимость

$$z(x) = \frac{mor \cdot \omega^2}{\bar{m} \cdot l} \sin(\omega t) \sum_{i=0,1,2,3,\dots} \frac{Z(k_i x) \cdot Z(k_i l_1)}{p_i^2 - \omega^2}. \quad (33)$$

Выражение (33) справедливо везде, кроме $\omega = p_i$. Чтобы исследовать систему и в зоне резонанса, воспользуемся принципом Вольтерры и понятием о комплексном модуле упругости, введенным Е.С. Сорокиным, для чего примем

$$E = E \cdot (1 + j \cdot \lambda L), \quad C_p = C_p \cdot (1 + j \cdot \lambda C), \quad (34)$$

где j – мнимая единица; $\lambda L = \frac{\psi L}{2 \cdot \pi}$ и $\lambda C = \frac{\psi C}{2 \cdot \pi}$ – круговые коэффициенты неупругих сопротивле-

ний, ψL и ψC – коэффициенты поглощения энергии и параметры движения секции определяются обычным способом.

Конечный результат берется как модуль комплексного числа. Выражение (28) представим в виде

$$z(x) = A(x) \cdot \sin(\omega t), \quad (35)$$

где $A(x)$ – амплитуда колебаний сечения трубы,

$$A(x) = \frac{mor \cdot \omega^2}{\bar{m} \cdot l} \sum_{i=0,1,2,3,\dots} \frac{Z(k_i x) \cdot Z(k_i l_1)}{p_i^2 - \omega^2}. \quad (36)$$

При расположении вибровозбудителя в центре колебания секции будут симметричными, при этом будут возбуждаться только колебания с нечетными гармониками. Общая картина колебаний секции достаточно большой длины (когда проявляются ее изгибные колебания) при учете семи гармоник (рис. 2). Как следует из графика, в установившемся режиме наибольшую амплитуду отклонения имеет место в середине трубы, к периферии амплитуда колебаний снижается. С учетом массы вибровозбудителя m_b амплитуда колебаний в центре секции трубы будет

$$A(l_1) = \frac{mor \cdot \omega^2}{\bar{m} \cdot l + m_b} \sum_{i=0,1,2,3,\dots} \frac{[Z(k_i l_1)]^2}{p_i^2 - \omega^2}. \quad (37)$$

При использовании площадных мотор-вибраторов их масса пропорциональна возмущающей силе, т.е.

$$m_b = \frac{k_m}{g} mor \cdot \omega^2, \quad (38)$$

где k_m – коэффициент пропорциональности; mor – кинетостатический момент мотор-вибратора; g – ускорение земного тяготения, м/с²; ω – угловая скорость мотор-вибратора рад/с.

По выбранному наибольшему коэффициенту Γ из диапазона $\Gamma=1-0,6$ и угловой скорости мотор-вибратора ω определяем максимальную амплитуду секции (в средней части):

$$A(l_1) = \frac{\Gamma \cdot g}{\omega^2}. \quad (39)$$

Используя уравнения (37)–(39), определяем кинетостатический момент мотор-вибратора:

$$mor = \frac{\Gamma \cdot g}{\omega^4} \cdot \frac{\bar{m} \cdot l}{\sum_{i=0}^n \frac{[Z(k_i l_1)]^2}{p_i^2 - \omega^2} - \frac{\Gamma \cdot k_m}{\omega^2}}. \quad (40)$$

Для исключения крутильных колебаний трубы на секцию устанавливается по два мотор-вибратора (рис. 3). Тогда определенный по выражению (40) кинетостатический момент нужно распределить на два вибровозбудителя.

Для повышения устойчивости положения трубы на амортизаторах их обычно устанавливают по два в одном узле. Длину секции, обслуживаемой одним вибровозбудителем (парой мотор-вибраторов), выбирают из условия, чтобы на всем протяжении секции интенсивность вибрации находилась в пределах $\Gamma=1-0,6$. Амплитуда бегущей волны колебаний трубы в зависимости от удаленности от источника вибрации зависит от частоты вибрации, упругомассовых и диссипативных характеристик системы трубопровода:

$$A(x) = A(l_1) \cdot \exp\left(-\delta_c \frac{|x - l_1|}{\lambda}\right), \quad (41)$$

δ_c – декремент затухания колебаний; λ – длина волны вынужденных колебаний, м.

Длина волны при изгибных колебаниях трубопровода определится как

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{E \cdot J}{\bar{m} \cdot \omega^2}}. \quad (42)$$

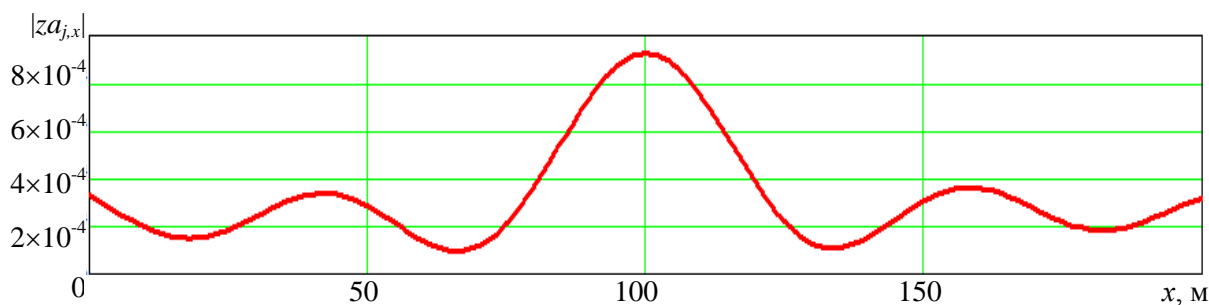


Рис. 2. Изгиб трубы по длине секции

Fig. 2. Bending of the pipe along the length of the section

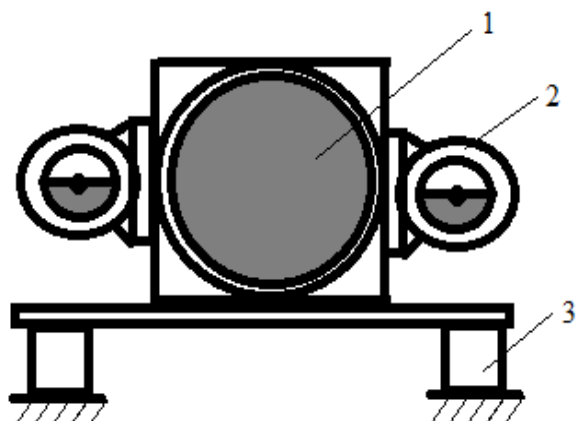


Рис. 3. Секция трубопровода 1 с вибровозбудителями 2 и амортизаторами 3

Fig. 3. Pipeline section 1 with vibration exciters 2 and shock absorbers 3

Распределение амплитуд колебаний по длине трубопровода носит экспоненциальный характер (рис. 4). Здесь же представлен и график изменения коэффициента режима колебаний $\Gamma(x)$. Как следует из графика, при $\omega=100$ рад/с режим колебаний секции длиной 200 м вполне приемлем для обеспечения тиксотропного разжижения

закладочной смеси. С увеличением частоты вибрации уменьшается длина волны (в данном случае с $\lambda=1,54$ м при $\omega=100$ рад/с до $\lambda=1,26$ м), соответственно, уменьшается и рациональная длина секции (рис. 4, б), при которой обеспечивается требуемая интенсивность вибрации. В проведенных исследованиях мы постоянно обращались к координате z , предусматривающей движение в вертикальном направлении.

Если иметь в виду, что сила тяжести трубопровода компенсируется силой упругости опорных элементов, то, принимая во внимание расположение приводов (рис. 4, а), все уравнения динамики секции трубопровода пригодны в направлении оси y , с той лишь разницей, что принимается жесткость опорных амортизаторов, работающих на сдвиг. Учитывая, что упругий амортизатор представляет собой цельный элемент из наполненной резины, можно принять

$$C_y = C_z \frac{1}{2 \cdot (1 + \mu)}, \quad (43)$$

где $\mu = 0,47-0,49$ – коэффициент Пуассона для резины.

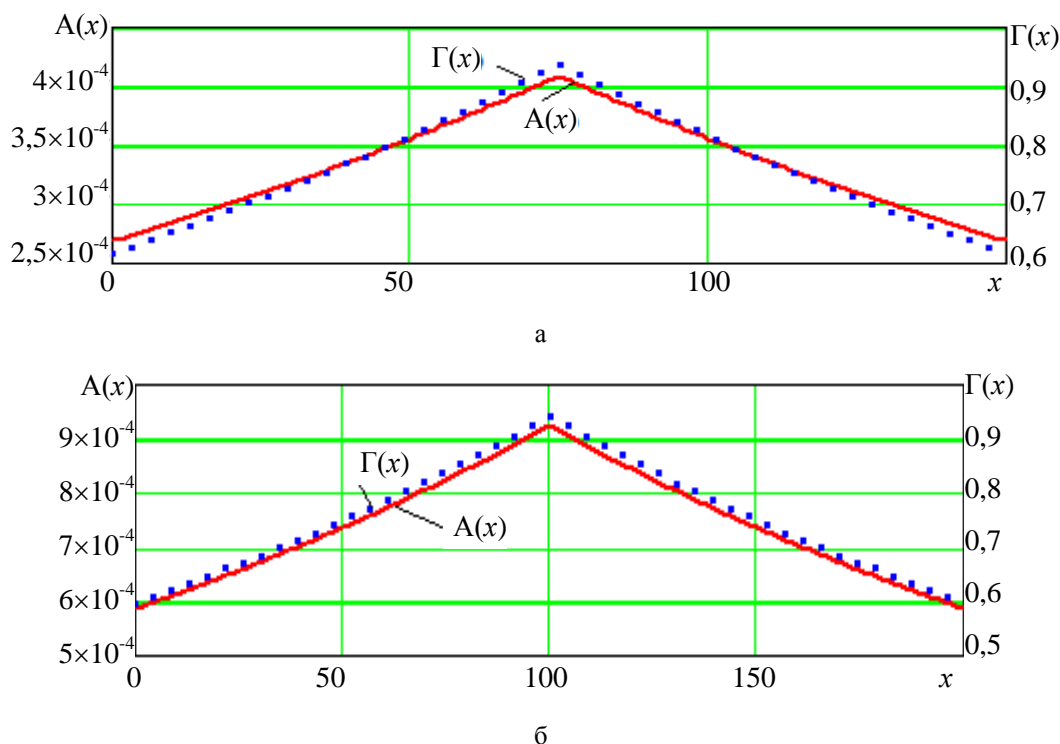


Рис. 4. Распределение амплитуд колебаний по длине секции при частоте вибратора $\omega=100$ рад/с (а); $\omega=150$ рад/с (б)
Fig. 4. Distribution of vibration amplitudes along the length of the section at a vibrator frequency: $\omega=100$ rad/s (a); $\omega = 150$ rad/s (b)

Результаты расчетов по оси y будут идентичными, так что траектория трубопровода в плоскости yoz будет эллиптической, мало отличающейся от круговой. При выборе динамических параметров вибросамотечного транспорта твердеющей смеси вначале выбирается частота колебаний вибровозбудителя ω , затем по максимальной ($\Gamma \approx 1$) и минимальной ($\Gamma \approx 0,6$) величине режима транспортирования Γ находится амплитуда колебаний трубопровода в месте установки привода (в середине секции) (выражение (39)), определяются параметры трубопровода по выражениям (15)–(18), параметры изгибных колебаний трубопровода и длину l секции согласно (41), (42). Затем определяется необходимый кинетостатический момент mor согласно (40), возмущающее усилие мотор-вибратора $P_b = mor \cdot \omega^2$ и сам мотор-вибратор.

Расчет параметров упругих опор

Суммарная жесткость опорных амортизаторов определяется исходя из силы тяжести трубопровода с технологической нагрузкой. Сила тяжести трубопровода

$$P_{тр} = g \cdot (l \cdot \bar{m} + m_b),$$

где \bar{m} определяется из выражения (19), а m_b – из каталога оборудования.

Жесткость одного амортизатора, учитывая их попарное расположение в опоре определяется по формуле

$$C_{z1} = 2 \cdot n \frac{P_{тр}}{(1,4 \div 2) \cdot A(l_1)}.$$

Учитывая, что возможен пуск мотор-вибраторов при отсутствии технологической нагрузки, следует выбирать большее значение коэффициента. Высоту упругого элемента выбирают исходя из допустимой осадки $[k_h]$ либо по величине допустимой нагрузки $[\sigma]$. Обычно выбирается (в зависимости от марки резины) $[k_h] = 0,1-0,2$. Учитывая интенсивность вибраций и возможный нагрев элемента, принимаем $[k_h] = 0,1$. В результате получим

$$h = (2,4 \div 3) [k_h] \cdot A(l_1).$$

Массивные опорные резиновые элементы изготавливают цилиндрической формы с центральным вентиляционным отверстием. Зная модуль упругости для амортизационной резины E_p , диаметр упругого элемента определяется как

$$(D-d) = \sqrt{\frac{C_{z1} \cdot h}{\pi \cdot E_p}}.$$

Далее выполняется корректировка размеров упругих элементов и длины секции, проверяется, чтобы они не выходили за рамки допустимых.

Внедрение результатов исследований

С учетом полученных зависимостей расчет установки вибросамотечного транспорта (УВТ) производили в следующем порядке: определяли частоту и минимальную амплитуду вынужденных колебаний трубопровода, диаметр трубопровода и удельные потери давления, дальность доставки, длину секции и их количество, параметры упругого элемента опоры, их количество, величину вынуждающей силы вибровозбудителя и мощность привода (мотор-вибратора). В соответствии с методикой расчета создана и внедрена в производство УВТ на АО «Целинный горно-химический комбинат», Северный Казахстан [21].

Направление дальнейших исследований

Актуальность поиска путей совершенствования закладочных работ повышается с увеличением доли подземной добычи при истощении доступных для открытой разработки запасов руд и развитии природоохранных тенденций современности [22]. Вибротранспортирование увеличивает длину доставки твердеющей смеси, что позволяет отказаться от строительства новых комплексов при разработке периферийных участков месторождений [23]. Совершенствование технологии позволяет вовлечь в производство запасы техногенного сырья: хвосты обогащения и малоактивные местные материалы после их подготовки в аппаратах-активаторах [24]. Комплекс инновационных решений позволяет увеличить качество использования недр, сохранить земную поверхность и уменьшить негативное влияние горных работ на окружающую среду [25].

Выводы

1. Установлено, что использование разработанной конструкции УВТ позволяет: снизить энергоемкость транспортирования до 0,25–0,30 кВт·ч на 1 м³ смеси; увеличить длину секции трубопровода до 150–200 м, производительность в 1,8–2,0 раза и прочность искусственного массива на 20–25%; обеспечить надежную доставку смесей, осадка стандартного конуса которых составляет 10–13 см, содержащих по массе 0,10–0,35 доли единицы диспергированных частиц и

имеющих концентрацию твердого $K = 0,80\text{--}0,85$, на расстояние, в 20 раз превышающее высоту заполнения вертикального става, и полное удаление смеси из трубопровода при расходе воды $3\text{--}5\text{ м}^3$ на одну промывку.

2. *Определено*, что рациональная концентрация твердого в твердеющей закладочной смеси составляет $0,80\text{--}0,85$ доли единицы, вибросамотечный транспорт исключает расслоение смеси в процессе ее транспортирования и позволяет повысить на $20\text{--}25\%$ прочность искусственного массива.

3. *Обосновано* рациональное соотношение длины секции и частоты вибровозбудителя при

заданных параметрах трубопровода, которое выбирают из условия, чтобы на всем протяжении секции интенсивность вибрации, коэффициент режима вибротранспортирования Γ находился в пределах $1\text{--}0,6$.

4. *Показана* эффективность воздействия эллиптических колебаний трубопровода на снижение сопротивления движению твердеющей закладочной смеси. Получено соотношение жесткостей упругих опор в горизонтальной и вертикальной плоскостях, равное $2\text{--}3$, при котором достигается эффективная траектория движения трубопровода при круговой вынуждающей силе вибровозбудителя.

Список литературы

1. Тимошенко С.П. Колебания в инженерном деле. М.: Физматгиз, 1959. 439 с.
2. Сорокин Е.С. К теории внутреннего трения при колебаниях упругих систем. М.: Госстройиздат, 1960. 132 с.
3. Горные машины для добычи руд / отв. ред. А.П. Лысов. М.: Недра, 1968. 231 с.
4. Штокман И.Г., Мухопад Н.Д. Транспорт при строительстве подземных сооружений и шахт. М.: Недра, 1970. 232 с.
5. Франчук В.П., Анциферов А.В. Использование принципа Вольтерра и комплексного модуля упругости при учете неупругих сопротивлений в колебательных системах с существенной асимметричной нелинейностью // Науковий вісник НГАУ. № 2. 2000. С. 30–32.
6. Справочник по горнорудному делу / под ред. В.А. Гребенюка, Я.С. Пыжьянова, И.Е. Ерофеева. М.: Недра, 1983. 816 с.
7. Ляшенко В.И., Рыбалко В.Я. Совершенствование трубопроводного транспорта закладочных смесей в глубокие шахты // Горный журнал. 1988. № 6. С. 50–53.
8. Добыча и переработка урановых руд / под общ. ред. А.П. Чернова. Киев: Адеф–Украина, 2001. 238 с.
9. Ляшенко В.И., Голик В.И. Совершенствование технологии и технических средств подземной разработки урановых месторождений // Горный журнал. 2007. №1. С. 11–14.
10. Юдин А. В. Оценка параметров свободных колебаний просеивающей поверхности грохота с консольно заземленными колебаниями // Изв. вузов. Горный журнал. 2016. №5. С. 52–59.
11. Ляшенко В.И., Дятчин В.З., Франчук В.П. Технические средства для добычи и переработки рудных материалов. Сообщение 2 // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 4. С. 33–41.
12. Ляшенко В.И., Франчук В.П. Повышение эффективности активации компонентов твердеющей закладочной смеси в установках вибрационного трубопроводного транспорта // Изв. вузов. Горный журнал. 2017. № 4. С. 92–100.
13. Golik V.I., Razorenov Y.I., Polukhin O.N. Metal extraction from ore beneficiation codas by means of lixiviation in a disintegrator // International Journal of Applied Engineering Research. 2015. T. 10. №17. С. 38105–38109.
14. Разработка технологии закладочных работ на основе цементно-шлакового вяжущего на Орловском руднике / Л.А. Крупник, Ю.Н. Шапошник, С.Н. Шапошник, Г.Т. Нуршайыкова, З.К. Тунгушбаева // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2017. №1. С. 84–91.
15. Golik V.I., Gabaraev O.Z., Maslennikov S.A., Khasheva Z.M., Shulgaty L.P. The provision of development conversion perspectives into underground one for russian iron ore deposits development // Journal of the Social Sciences. 2016. T. 11. №18. С. 4348–4351.
16. Закладочные смеси на основе отходов обогащения руд в системах подземной разработки месторождений Норильского промышленного района / П.С. Гузанов, А.Э. Лытнева, А.Н. Анушенков, Е.П. Волков // Горный журнал. 2015. № 6. С. 85–88.
17. Basarir H., Bin H., Fourie A., Karrech A. & Elchalakani M. An adaptive neuro fuzzy inference system to model the uniaxial compressive strength of cemented hydraulic backfill // Mining of Mineral Deposits. 2018. No. 12(2). P. 1–12. <https://doi.org/10.15407/mining12.02.001>
18. Sotskov V., Dereviahina N., & Malanchuk L. Analysis of operation parameters of partial backfilling in the context of selective coal mining // Mining of Mineral Deposits. 2019. No. 13(4). P. 129–138. <https://doi.org/10.33271/mining13.04.129>
19. Iordanov I., Novikova Yu., Simonova Yu., Yefremov O., Podkopayev Ye., & Korol A. Experimental characteristics for deformation properties of backfill mass // Mining of Mineral Deposits. 2020. No. 14(3). P. 119–127. <https://doi.org/10.33271/mining14.03.119>

20. Стовманенко А.Ю., Анушенков А.Н. Трубопроводный транспорт литых твердеющих закладочных смесей с пониженным водосодержанием // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2016. № 2. С. 99–104.
21. Каплунов Д.Р., Радченко Д.Н. Принципы проектирования и выбор технологий освоения недр, обеспечивающих устойчивое развитие подземных рудников // Горный журнал. 2017. № 11. С. 121–125.
22. Оценка влияния накопившихся пустот на безопасность доработки Артемьевского месторождения / Шапошник Ю.Н., Неверов А.А., Неверов С.А., Никольский А.М. // Физикотехнические проблемы разработки полезных ископаемых. 2017. № 3. С. 108–118.
23. Волков Е.П., Анушенков А.Н. Разработка технологии закладки горных выработок твердеющими смесями на основе хвостов обогащения // Изв. вузов. Горный журнал. 2019. № 7. С. 5–13 (In Eng.). DOI: 10.21440/0536-1028-2019-7-5-13
24. Исследование влияния активационной обработки на галитовые отходы обогащения при приготовлении закладочной смеси / Конгар-Сюрюн Ч.Б., Фараджов В.В., Тюляева Ю.С., Хайрутдинов А.М. // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 1. С. 43–57. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-1-0-43-57.
25. Ляшенко В.И., Франчук В.П. Повышение эффективности и безопасности трубопроводного транспорта твердеющих закладочных смесей в глубокие шахты // Изв. вузов. Горный журнал. 2021. № 1. С. 15–26. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-1-15-26

References

1. Timoshenko S.P. *Kolebaniya v inzhenernom dele* [Vibrations in engineering]. Moscow: Fizmatgiz, 1959, 439 p. (In Russ.)
2. Sorokin E.S. *K teorii vnutrennego treniya pri kolebaniyakh uprugikh sistem* [To the theory of internal friction under vibrations of elastic systems]. Moscow: Gosstroizdat, 1960, 132 p. (In Russ.)
3. Lysov A.P. *Gornye mashiny dlya dobychi rud* [Mining machines for ore mining]. Moscow: Nedra, 1968, 231 p. (In Russ.)
4. Shtokman I.G., Mukhopad N.D. *Transport pri stroitelstve podzemnykh sooruzhenii i shakht* [Transportation in the construction of underground structures and mines]. Moscow: Nedra, 1970, 232 p. (In Russ.)
5. Franchuk V.P., Antsiferov A.V. The use of the Volterra principle and the complex modulus of elasticity taking into account non-elastic resistances in oscillatory systems with significant asymmetric nonlinearity. *Naukovy visnik NGAU* [Vestnik of NSAU], 2000, no. 2, pp. 30–32. (In Russ.)
6. Grebenyuk V.A., Pyzhyanov Ya.S., Erofeev I.E. *Spravochnik po gornorudnomu delu* [Handbook of mining]. Moscow: Nedra, 1983, 816 p. (In Russ.)
7. Lyashenko V.I., Rybalko V.Ya. Improvement of pipeline transport of filling mixtures to deep mines. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal], 1988, no. 6, pp. 50–53. (In Russ.)
8. Chernov A.P. *Dobycha i pererabotka uranovykh rud* [Mining and processing of uranium ores]. Kiev: Adef-Ukraina, 2001, 238 p. (In Ukr.)
9. Lyashenko V.I., Golik V.I. Improving the technology and facilities for underground mining of uranium deposits. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal], 2007, no. 1, pp. 11–14. (In Russ.)
10. Yudin A.V. Estimation of free oscillation parameters of the screening surface of the screen with console-restrained oscillations. *Izv. vuzov. Gornyi zhurnal* [News of the Higher Institutions. Mining Journal], 2016, no. 5, pp. 52–59. (In Russ.)
11. Lyashenko V.I., Dyatchin V.Z., Franchuk V.P. Technical means for extraction and processing of ore materials. Report 2. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)], 2017, no. 4, pp. 33–41. (In Russ.)
12. Lyashenko V.I., Franchuk V.P. Hardening stowage mixture components activation efficiency improvement in vibration pipeline transport plants. *Izv. vuzov. Gornyi zhurnal* [News of the Higher Institutions. Mining Journal], 2017, no. 4, pp. 92–100. (In Russ.)
13. Golik V.I., Razorenov Y.I., Polukhin O.N. Metal extraction from ore beneficiation codas by means of lixiviation in a disintegrator. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2015, vol. 10, no. 17, pp. 38105–38109.
14. Krupnik L.A., Shaposhnik Yu.N., Shaposhnik S.N., Nurshaykova G.T., Tungushbaeva Z.K. Development of the stowing operation technology based on a cement-slag binder at the Oryol mine. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh* [Physicotechnical Problems of Mining Operations], 2017, no. 1, pp. 84–91. (In Russ.)
15. Golik V.I., Gabaraev O.Z., Maslennikov S.A., Khasheva Z.M., Shulgaty L.P. The provision of development conversion perspectives into underground one for Russian iron ore deposits development. *Journal of the Social Sciences*, 2016, vol. 11, no. 18, pp. 4348–4351.
16. Guzanov P.S., Lytneva A.E., Anushenkov A.N., Volkov E.P. Stowing mixtures based on ore dressing wastes in underground mining systems of deposits in the Norilsk industrial region. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal], 2015, no. 6, pp. 85–88. (In Russ.)

17. Basarir H., Bin H., Fourie A., Karrech A., Elchalakani M. An adaptive neuro fuzzy inference system to model the uniaxial compressive strength of cemented hydraulic backfill. *Mining of Mineral Deposits*, 2018, no. 12(2), pp. 1–12. <https://doi.org/10.15407/mining12.02.001>
18. Sotskov V., Dereviahina N., Malanchuk L. Analysis of operation parameters of partial backfilling in the context of selective coal mining. *Mining of Mineral Deposits*, 2019, no. 13(4), pp. 129–138. <https://doi.org/10.33271/mining13.04.129>
19. Iordanov I., Novikova Yu., Simonova Yu., Yefremov O., Podkopayev Ye., Korol A. Experimental characteristics for deformation properties of backfill mass. *Mining of Mineral Deposits*, 2020, no. 14(3), pp. 119–127. <https://doi.org/10.33271/mining14.03.119>
20. Stovmanenko A.Yu., Anushenkov A.N. Pipeline transport of cast hardening filling mixtures with low water content. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Kuzbass State Technical University], 2016, no. 2, pp. 99–104. (In Russ.)
21. Kaplunov D.R., Radchenko D.N. Principles of design and selection of subsoil development technologies ensuring sustainable development of underground mines. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal], 2017, no. 11, pp. 121–125. (In Russ.)
22. Shaposhnik Yu.N., Neverov A.A., Neverov S.A., Nikolskii A.M. Assessment of influence of voids on phase II mining safety at Artemievsk deposit. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh* [Physicotechnical Problems of Mining Operations], 2017, no. 3, pp. 108–118. (In Russ.)
23. Volkov E.P., Anushenkov A.N. Developing the technology of mine stowing with processing tailings based hardening blends. *Izv. vuzov. Gornyi zhurnal* [News of the Higher Institutions. Mining Journal], 2019, no. 7, pp. 5–13. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-7-5-13
24. Kongar-Syuryun Ch.B., Faradzhev V.V., Tyulyaeva Yu.S., Khairutdinov A.M. Effect of activating treatment of halite flotation waste in backfill mixture preparation. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin], 2021, no. 1, pp. 43–57. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-1-0-43-57
25. Lyashenko V.I., Franchuk V.P. Improving efficiency and safety of pipelines to transport solidifying filling mixtures to deep mines. *Izv. vuzov. Gornyi zhurnal* [News of the Higher Institutions. Mining Journal], 2021, no. 1, pp. 15–26. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-1-15-26

Поступила 23.11.2020; принята к публикации 08.12.2021; опубликована 12.01.2021

Submitted 23/11/2020; revised 08/12/2021; published 12/01/2021

Ляшенко Василий Иванович – кандидат технических наук, начальник научно-исследовательского отдела, старший научный сотрудник, Украинский научно-исследовательский и проектно-изыскательский институт промышленной технологии, Желтые Воды, Украина. Email: vilyashenko2017@gmail.com

Голлик Владимир Иванович – доктор технических наук, профессор кафедры «Горное дело», Северо-Кавказский государственный технологический университет, Владикавказ (РСО–Алания), Россия. Email: v.i.golik@mail.ru

Дмитрак Юрий Витальевич – доктор технических наук, профессор, ректор, Северо-Кавказский государственный технологический университет, Владикавказ (РСО–Алания), Россия. Email: dmitrak@yandex.ru

Франчук Всеволод Петрович – доктор технических наук, профессор кафедры «Инжиниринг и дизайн в машиностроении», Национальный технический университет «Днепропетровская политехника», Днепр, Украина. Email: vpfranchuk@gmail.com

Vasiliy I. Lyashenko – PhD (Eng.), Head of the Research Department, Senior Researcher, Ukrainian Research and Design Institute for Industrial Technology, Zhovti Vody, Ukraine. Email: vilyashenko2017@gmail.com

Vladimir I. Golik – DrSc (Eng.), Professor of the Mining Department, North Caucasian Mining and Metallurgical Institute (State Technological University), Vladikavkaz, Russia. Email: v.i.golik@mail.ru

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

Vsevolod P. Franchuk – DrSc (Eng.), Professor of the Department of Engineering and Design in Mechanical Engineering, Dnipro Polytechnic National Technical University, Dnipro, Ukraine. Email: vpfranchuk@gmail.com

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

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

УДК 669.213

DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-1-17-28



СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ МАЛОТОКСИЧНЫХ РАСТВОРИТЕЛЕЙ ЗОЛОТА ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ

Никитина Т.Ю., Петров Г.В.

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Актуальность: анализ современного состояния мировой золотодобычи свидетельствует о существенном изменении структуры минерально-сырьевой базы золота за счет нарастания доли вторичных и техногенных ресурсов. Применение исторически доминирующей технологии цианистого выщелачивания золота в последнее время осложняется ростом упорности перерабатываемого сырья и постоянно ужесточающимися требованиями к экологической безопасности предприятий золотодобычи. В первую очередь это относится к использованию техногенных золотосодержащих отходов горно-металлургического комплекса, переработка которых осуществляется на месте образования с использованием геотехнологий. Применение альтернативных цианиду натрия реагентов-комплекс-образователей золота позволит обеспечить прямое гидрометаллургическое вскрытие упорного разнотипного сырья без предварительного его кондиционирования, снижение безвозвратного техногенного рассеяния золота и сокращение ореолов загрязнения экосистем отходами золотодобычи, в том числе отвальными продуктами применяемой цианидной технологии. **Цель работы:** аналитический обзор современного состояния гидрометаллургии золота и обоснование применения комплексобразующих нецианидных реагентов для повышения технико-экономических показателей переработки техногенного сырья и экологической безопасности предприятий золотодобычи. **Задачи:** 1. Анализ современного состояния мировой минерально-сырьевой базы золота. 2. Характеристика основных видов техногенного золотосодержащего сырья. 3. Обоснование применения нецианидных комплексобразователей для растворения золота и их сравнительная оценка. **Результаты:** выявлены технологические особенности использования нецианидных реагентов при выщелачивании золота по отношению к различным типам техногенного сырья. **Заключение:** анализ промышленной практики цианистого выщелачивания в совокупности с данными исследовательских работ и опытом применения менее токсичных и экологически безопасных реагентов-комплексобразователей золота подтверждают принципиальную возможность эффективного прямого гидрометаллургического вскрытия рудного и техногенного сырья с использованием альтернативных цианиду растворителей.

Ключевые слова: золото, техногенное сырье, низкачественное золотосодержащее сырье, нецианидные растворители золота, выщелачивание, извлечение золота.

© Никитина Т.Ю., Петров Г.В., 2021

Для цитирования

Никитина Т.Ю., Петров Г.В. Современное состояние и технологические перспективы применения малотоксичных растворителей золота для переработки техногенного сырья // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №1. С. 17–28. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-1-17-28>



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

CURRENT STATE AND TECHNOLOGICAL PROSPECTS OF APPLYING LOW-TOXIC GOLD SOLVENTS FOR PROCESSING TECHNOGENIC RAW MATERIALS

Nikitina T.Yu., Petrov G.V.

Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

Abstract. Relevance. The analysis of the current state of global gold mining indicates a significant change in the structure of the mineral resource base of gold due to the increase in the share of secondary and technogenic resources. The use of the historically dominant technology of cyanide leaching of gold has recently been complicated by the increasing refractory of processed raw materials and the ever-tightening requirements for environmental safety of gold mining enterprises. First of all, this applies to the use of technogenic gold-containing waste from the mining and metallurgical complex, which is processed at the site of formation using geotechnology. The use of gold complexing agents alternative to sodium cyanide, will allow for the direct hydrometallurgical opening of refractory raw materials of different types without prior conditioning, reducing the irrevocable technogenic dispersion of gold and reducing zones of pollution of ecosystems by gold mining waste, including the waste products of the cyanide technology used. **Objectives:** The research is aimed at conducting an analytical review of the current state of gold hydrometallurgy and providing a rationale for applying complexing non-cyanide agents to increase technical and economic indicators of processing technogenic raw materials and environmental safety of gold mining enterprises. **Tasks:** 1. To analyze the current state of the global mineral resource base of gold. 2. To characterize main types of technogenic gold-containing raw materials. 3. To provide a rationale for applying non-cyanide complexing gold solvents and carry out a comparative assessment. **Findings:** The authors revealed technological features of using non-cyanide agents, when leaching gold, in respect of different types of technogenic raw materials. **Conclusion:** The analysis of industrial practice of cyanide leaching, the research findings and experience of applying less toxic and more environmental-friendly complexing agents of gold prove a general possibility of efficient direct hydrometallurgical opening of ore and technogenic raw materials using solvents alternative to cyanide.

Keywords: gold, technogenic raw materials, low-grade gold-containing raw materials, non-cyanide gold solvents, leaching, gold extraction.

For citation

Nikitina T.Yu., Petrov G.V. Current State and Technological Prospects of Applying Low-Toxic Gold Solvents for Processing Technogenic Raw Materials. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021, vol. 19, no. 1, pp. 17–28. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-1-17-28>

Введение

Современное состояние мирового золотодобывающего комплекса характеризуется устойчивой тенденцией ухудшения качества традиционных минеральных источников за счет вовлечения в переработку упорных руд и концентратов, а также масштабного освоения запасов разнотипного техногенного сырья (шламы гидрометаллургического производства, хвосты обогательных фабрик, золы, шлаки). Применение традиционных технологий золотодобычи, в первую очередь прямого цианирования, сопровождается заниженными показателями извлечения золота (не превышает 60%) и образованием значительного количества отвальных шламов с его высоким остаточным содержанием. Повышенный расход цианида, необходимый для поддержания рентабельно приемлемых технологических показателей, приводит к ухудшению экологических характеристик производства. Применение предварительного кондиционирования рудного и

техногенного сырья (ультратонкое измельчение, обжиг, автоклавное и бактериальное окисление) сопровождается ростом технологических схем и незавершенного производства, увеличением количества богатых по золоту полупродуктов, требующих переработки. С этих позиций для Российской Федерации, являющейся крупнейшим мировым производителем золота, представляет значительную актуальность поиск альтернативных цианиду реагентов и разработка эффективных методов гидрометаллургического вскрытия разнотипного золотосодержащего сырья [1–3].

Анализ современного состояния мировой минерально-сырьевой базы золота

Золотодобывающая отрасль РФ продолжает активно развиваться во многих областях: увеличение границ добычи и производства золота, увеличение активности золотодобытчиков на отечественных и зарубежных финансовых рынках, наращивание производственных мощностей. Однако отечественные компании, как и прежде,

недооценены и остаются на «втором плане», испытывая трудности с доступом к современному технологическому оборудованию и финансовым инструментам, что может объясняться в первую очередь внешними ограничениями по сравнению с западными предприятиями [4].

По данным Союза золотопромышленников РФ и компании «Ernst & Young» на 10 стран приходится приблизительно 70% общемировых запасов золота. Фонд золота Российской Федерации составляет около 5,3 тыс. т (9,8% от общемировых запасов), уступая лишь Австралии и ЮАР (рис. 1, 2) [5].

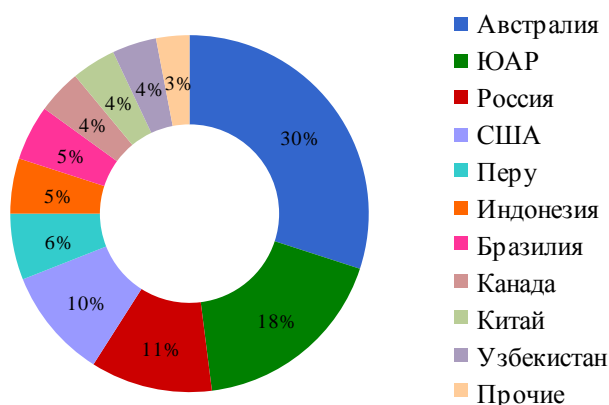


Рис. 1. Диаграмма распределения (%) 10 крупнейших стран по запасам золота на 2019 год [URL:https://zolotodb.ru/]

Fig. 1. Distribution chart (%) of the top 10 countries by gold reserves for 2019 [URL:https://zolotodb.ru/]

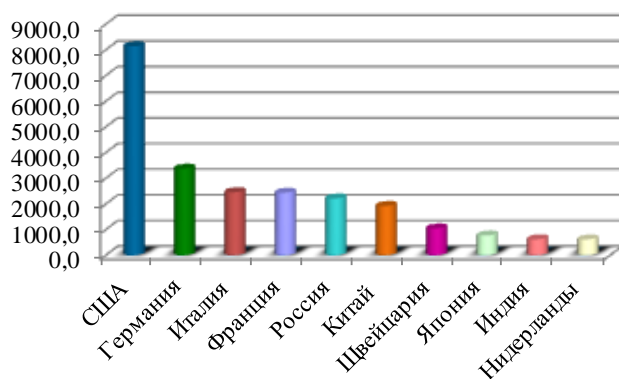


Рис. 2. Диаграмма распределения (тонн) 10 крупнейших стран по золотовалютному резерву на 2019 год [URL:https://quote.rbc.ru/]

Fig. 2. Distribution chart (t) of the 10 largest countries by gold and foreign exchange reserve for 2019 [URL:https://quote.rbc.ru/]

По данным Федерального агентства недропользования в 2019 году приращение запасов золота в недрах РФ составило около 347 т, что немного обгоняет объем добычи. Суммарный уровень запасов категорий А+В+С₁ (разведан-

ные) и С₂ (предварительно оцененные) составляет приблизительно 14,5 тыс. т.

Крупнейшим производителем золота в 2019 году является Китай (399,7 т) (рис. 3) [6]. Общий объем производства золота в России, как из минерального, так и из вторичного сырья, в течение последних 9 лет постоянно увеличивался и в 2019 году составил рекордные 368 т [7].

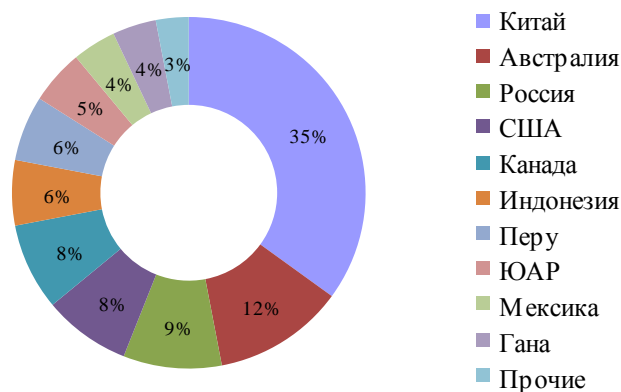


Рис. 3. Диаграмма распределения (%) 10 крупнейших стран по добыче золота на 2019 год [URL:https://zolotodb.ru/]

Fig. 3. Distribution chart (%) of the top 10 gold mining countries for 2019 [URL:https://zolotodb.ru/]

По оценке отечественного Союза золотопромышленников в ближайшие 3–5 лет РФ может занять устойчивое второе место по показателю «добыча золота» по причине роста числа небольших золотодобывающих компаний, освоения новых месторождений золотоносных и полиметаллических руд Урала, Сибири и Дальнего Востока, вовлечения в переработку запасов техногенного сырья горно-металлургического, энергетического и химического комплексов, а также прогнозов по снижению объемов производства золота в Австралии.

Характеристика основных видов техногенного золотосодержащего сырья

Доклад Минприроды России «О состоянии окружающей среды РФ» за 2018 год фиксирует, что наибольший объем отходов образуется при переработке полезных ископаемых (94,2%) от общего показателя получаемых отходов, включая лесное и сельское хозяйство, строительство, водо- и газоснабжение. Именно по категории «полезные ископаемые» отмечается существенный рост накопления отходов (с 3334,6 до 6850,5 млн т) за период 2010–2018 годы [8].

В общей структуре ресурсов и запасов золота России на долю техногенных объектов приходится около 7–12% (табл. 1).

Таблица 1. Классификация техногенных золотосодержащих ресурсов [9]
Table 1. Classification of technogenic gold-containing resources [9]

Группы	Классы	Виды	Подвиды
Экзогенные (объекты, сформированные при переработке руд, песков и пород, отделенных от массива)	Техногенные россыпи	Старательской отработки Дражной отработки Гидромеханической отработки Гидравлической отработки	Элювиальные Аллювиальные Склоновые Гетерогенные
	Хвосты обогащения коренных руд	Гравитации Флотации Цианирования Магнитной сепарации Комбинированные	Золотокварцевые Золотосульфидные Золотосодержащие медно-никелевые Железородные
	Отвалы забалансовых руд и вскрышных пород	Раздельного складирования Смешанные	Полиметаллические Медноколчеданные
	Золоотвалы		
	Продукты переработки нерудного сырья		
	Металлургические шлаки и кеки		
	Штабеля кучного выщелачивания		
Остаточные (месторождения и их части, испытавшие техногенное воздействие в горном массиве)	Оставленные целики и вскрытые блоки забалансовых руд	Открытой отработки Подземной отработки	
	Блоки подземного выщелачивания	Скважинными системами Шахтными системами	
	Сульфидные горельники		

Отходы переделов обогащения и металлургической переработки собственно золотых и полиметаллических руд выступают существенным резервом для наращивания отечественной золотодобычи. Содержание золота в накопленных отходах колеблется в зависимости от вида основного производства (полупродукты свинцовых, цинковых и медных руд, пиритные концентраты и др.), составляя в среднем 0,2–1,0 г/т. Такие отвалы рассматриваются как техногенные поверхностные месторождения, не требующие для их освоения применения энергозатратных горных работ и рудоподготовки (дробление, измельчение) перед передачей в гидрометаллургический цикл, что оказывает существенное влияние на окупаемость проектов по переработке [10,11].

Предотвращению создания интенсивных ореолов загрязнения экосистем отходами золотодобычи, в том числе отвальными продуктами применяемой цианидной технологии, в настоящее время уделяется большое внимание за рубежом (Канаде, США, Индонезии, других странах). Россия не исключение, в техногенное загрязнение вовлечены уникальные горные территории Полярного и Южного Урала, Западной и Восточной Сибири, Якутии и Дальнего Востока, Хакасии и Горного Алтая, где природные экосистемы чрезвычайно ра-

нимы и трудно восстанавливаемы. Одним из технологических вариантов решения проблемы является замена цианида на более экологически приемлемые растворители золота [12].

Обоснование применения нецианидных комплексообразователей для растворения золота и их сравнительная оценка

Цианистый процесс, характеризующийся высокими технологическими показателями, является в настоящее время доминирующим при выщелачивании золота из первичного рудного сырья. Однако его применение сопряжено с определенными трудностями, связанными с возрастающей долей упорных форм золота (эмульсионное, капсулированное и др.), наличием природных сорбентов, необходимостью применения предварительных операций кондиционирования руд, токсичностью и сложностью регенерации цианида, его высоким расходом (до 0,3–0,6 кг/т руды) [13,14].

При эксплуатации золотодобывающих производств образуются промышленные стоки сложного состава, содержащие токсичные компоненты. В результате реагирования простых водорастворимых цианидов с компонентами твердой и жидкой фаз пульпы образуются про-

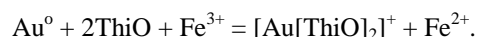
стые нерастворимые в воде и комплексные нерастворимые цианиды железа, цинка, никеля и т.п. Синильная кислота образуется при гидролизе солей или их взаимодействии с кислотами. Длительная устойчивость цианид-иона в условиях последующего выветривания хвостов выщелачивания приводит к его переносу на значительные расстояния с грунтовыми водами, ухудшая состояние окружающей среды. В качестве примера можно привести выявленную высокую фитотоксичность отходов цианирования колчеданных руд Белоключевского месторождения (п. Урск, Кемеровская обл.), являющегося типичным для территории золотодобычи в Сибирском регионе [15–18].

В значительной мере все эти проблемы сохраняются и даже усугубляются при освоении техногенных месторождений, в первую очередь при использовании современных геотехнологий. При реализации кучного цианистого выщелачивания, применяемого на месте залегания золото-содержащих горнопромышленных отходов, вопросы минимизации воздействия цианида на экосистему не решены в полной мере до настоящего времени [19].

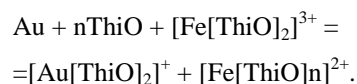
Сегодня известно до 40 видов нецианидных выщелачивающих реагентов золота. В нашей статье мы рассмотрим те альтернативные растворители золота, которые имеют перспективы применения в промышленном масштабе. В первую очередь необходимо выделить тиосульфаты натрия и аммония, тиокарбамид (тиомочевина), галоиды (хлор, бром, йод) и органические соединения (гуматы и аминокислоты). Применять альтернативные цианиду источники растворения золота необходимо, основываясь не только на экологических требованиях, но и на экономической целесообразности использования определенных реактивов для отличающихся по своему фазовому и химическому составу типов сырья.

Еще с советской эпохи уделялось значимое внимание исследованию применения тиокарбамида (или тиомочевины $\text{CS}(\text{NH}_2)_2$, сокращенно ThiO), как альтернативного реагента для выщелачивания золота. Метод тиомочевинного выщелачивания был предложен основоположником современной гидрометаллургии благородных металлов И.Н. Плаксиным [20]. Исключительный плюс тиомочевинного выщелачивания – это селективность процесса. В процессе тиомочевинного выщелачивания в незначительной степени образуются нерастворимые соединения меди, железа, цинка, мышьяка, свинца, в отличие от цианидного процесса [21].

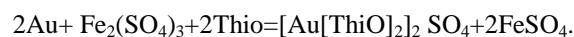
В качестве окислителя при тиомочевинном выщелачивании чаще всего используется сернокислый раствор сульфата трехвалентного железа ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) [22]:



Процесс осуществляется в кислой среде, что вызвано необходимостью сохранения тиокарбамидного комплекса золота, который устойчив при $\text{pH} < 4$. Окисляющая роль иона Fe^{3+} связана с образованием комплекса $[\text{Fe}(\text{ThiO})_2]^{3+}$ [23]:



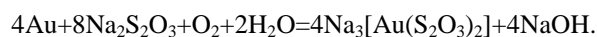
Общая химическая реакция образования комплексного тиокарбамида золота может быть представлена [24]:



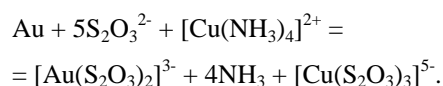
Процесс выщелачивания золота тиокарбамидным растворителем наиболее эффективен для переработки медистых руд, богатых по золоту концентратов, цинковых кеков и шлиховых продуктов обогащения россыпей. Например, на Сарылахской обогатительной фабрике (Республика Саха (Якутия)), институтом «Иргиредмет» разработана и апробирована в полупромышленных масштабах на базе опытного завода института «ВНИИцветмет» тиокарбамидная технология переработки золотосурьмяных концентратов (25–28 г/т Au) с электролитическим извлечением металла из растворов. В одной из исследовательских работ показано, что в процессе тиокарбамидного выщелачивания полиметаллического сырья сульфиды цветных металлов выступают катализаторами растворения золота [25].

Известно, что тиосульфатное выщелачивание применялось при добыче серебра за 30 лет до появления цианистой технологии (Богемия, 1858).

В кислой тиосульфатной среде растворение золота можно представить в виде реакции:



Растворение золота в аммиачно-тиосульфатной среде соответствует реакции [26]



К настоящему времени детально разработаны основные теоретические аспекты аммиачно-тиосульфатного выщелачивания. Выявлено, что для нормальной скорости растворения золота в растворе должны находиться тиосульфат, катализатор (медь (II)) и аммиак. Добавление аммиа-

ка стабилизирует катализатор меди (II) и уменьшает переход в раствор железа, карбонатов и силикатов. Изменение концентрации аммиака влияет на устойчивость комплексов меди и величину редокс-потенциала $\text{Cu}^{2+}/\text{Cu}^+$, который в значительной степени определяет кинетику взаимодействия тиосульфата с медью (II) и, соответственно, скорость растворения золота. Редокс-потенциал системы поддерживается в диапазоне 150–200 мВ (отн. вод. эл.). Установлено оптимальное соотношение реагентов, при котором обеспечивается наибольшая скорость растворения золота при агитационном процессе: 0,2М тиосульфата, 0,4М NH_4OH и 5М меди (II). Для эффективного осуществления кучного выщелачивания золота требуются более высокие концентрации: 0,4М тиосульфата, 0,6М NH_4OH и 10 М меди (II) [27].

Для извлечения золота и регенерации тиосульфатных растворов используются следующие методы: жидкостная экстракция (трибутилфосфатами или аминами), сорбция на сильноосновных анионообменных смолах, электролиз, осаждение (порошками металлов, борогидридом и пероксидом водорода).

Применительно к переработке реальных сырьевых объектов известны примеры по тиосульфатному выщелачиванию упорных золотосодержащих руд со значительным содержанием марганца, меди, цинка, свинца и природного углерода. Крупные испытания были проведены в Мексике применительно к медьсодержащей руде. Аммиачно-тиосульфатное выщелачивание с предварительным кондиционированием сырья опробовали на углеродистых рудах с высоким содержанием сульфидов. В нашей стране тиосульфатная технология нашла применение на Хаканджинском руднике (территория Охотского района Хабаровского края).

Во второй половине XIX века одновременно с цианистым процессом в гидрометаллургическом цикле производства золота начало применяться хлорное выщелачивание золотосодержащих руд и концентратов [28]. На ранних этапах появления метода хлорного выщелачивания он включал предварительный обжиг руды, хлорирование в деревянных чанах с выщелачиванием хлорного золота и последующим осаждением его из растворов. Хлор получали на месте из смеси пероксида марганца, серной кислоты и хлорида натрия.

Следует отметить, что растворение золота в присутствии хлора подразделяют на два типа: хлорное и хлоридное.

Хлорное выщелачивание – это гидрохлори-

рование золота с участием Cl_2 и HOCl . В этом случае Cl_2 (газ) выступает окислителем, образующим хлорноватистую кислоту (HOCl) и лиганд – хлорид-ион. Конечным продуктом окисления золота под действием хлора и хлорноватистой кислоты в кислой среде ($\text{pH} < 2$) выступают комплексные анионы $[\text{AuCl}_4]^-$.

Выделяют следующие преимущества гидрохлорирования в сопоставлении с цианистым процессом:

1) концентрация хлора в водных растворах выше, чем у кислорода, что обуславливает более высокую скорость процесса;

2) при растворении золота происходит разложение сульфидных минералов и вскрытие мелкодисперсного золота, что исключает необходимость предварительного кондиционирования руд;

3) в раствор совместно с золотом извлекаются металлы платиновой группы;

4) гидрохлорирование ориентировано на переработку ряда руд и концентратов, которые упорны к цианированию: медистых, марганцовистых, мышьяковистых и углеродистых [29, с. 3–9, 19–22, 39–50, 116–127, 207–210].

В настоящее время гидрохлорирование применяется на аффинажных заводах и в первичной металлургии золота на предприятиях «CARLIN» (США) – на переделе подготовки углеродистых руд к процессу цианирования, «Empire Gold & Silver» (республика Фиджи) – для выщелачивания теллуристой руды, цинковых осадков, гравиконцентратов, а также в ЮАР и Австралии – для обезвреживания цианидных стоков.

Хлоридное выщелачивание – это растворение золота без участия Cl_2 и его производных. Процесс протекает в системе $\text{CuCl}_2 + \text{NaCl}$ (250–300 г/дм³) при 85–95°C. При хлоридном выщелачивании воздух или кислород применяются в качестве окислителя для осаждения железа в виде оксида или гидроксида при pH 1,5–2,5. Для выделения золота из растворов при хлоридном выщелачивании применяют сорбцию на активированных углях и ионообменные способы, а также осаждение с помощью NaHS .

Выделяют следующие преимущества хлоридного выщелачивания при переработке упорных концентратов:

1) отсутствие образования токсичных газообразных и жидких веществ;

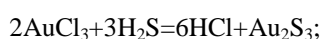
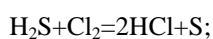
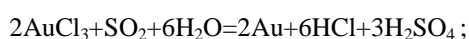
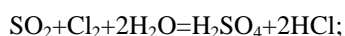
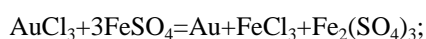
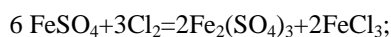
2) одностадийный процесс, легко совмещаемый с угольной сорбцией;

3) применяется для переработки отвалов как старого, так и нового происхождения. Например, пилотные испытания хлоридного выщелачивания были проведены в 2004 году на отвалах переработки полиметаллической Cu-Pb-Zn-руды острова Тасмания завода «Hellyer Gold Mines».

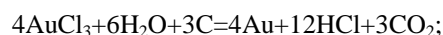
Известен хлоридный способ «Hydrosorreg» упорных к цианированию золотосодержащих концентратов, содержащих халькопирит (CuFeS_2), арсенопирит (FeAsS) и пирит (FeS_2). Отличительной чертой применяемого хлоридного выщелачивания выступает последовательность растворения меди и золота. На первоначальном этапе медьзолотосодержащий концентрат подвергается выщелачиванию хлоридом меди (II) в присутствии NaCl (250–300 г/л) в реакторах с агитационным перемешиванием при 85–95°C. Цветные металлы (Cu, Zn, Pb, Ni) и серебро переходят в раствор. Для окисления железа в форме гидроксида и осаждения серы из пульпы в раствор подается кислород или воздух. Остаток выщелачивания содержит гетит и элементарную серу. Золото выщелачивается из твердого остатка в виде золотохлоридного комплекса, для чего на втором этапе выщелачивания подают газообразный хлор (40–60 г/л Cl_2) при температуре 90–100°C. Растворенное золото сорбируют на активированных углях. Медьсодержащий раствор очищается от ионов Cu^{2+} для рециркуляции в процессе выщелачивания; далее – цементацией от серебра и осаждением от тяжелых цветных металлов. Из очищенного раствора осаждается гидратированный оксид меди (I) для последующего восстановления его водородом до металла. Главной отличительной чертой в методе «Hydrosorreg» в отличие от цианирования является осаждение золота в виде металла [30, 31].

В качестве альтернативных методов выделения золота из хлорсодержащих растворов могут рассматриваться [32]:

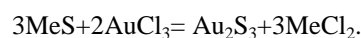
1) нейтрализация избытка хлора восстановителями (сернокислым закисным железом, сернистым газом, сероводородом) с последующим осаждением золота:



2) осаждение древесным углем:



3) осаждение сульфидами тяжелых металлов (MeS , где S – Fe, Cu, Pb):



Наряду с методами переработки золотосодержащего сырья, основанными на применении хлора, известен способ его фторидной обработки. Фторсодержащие реагенты (KBrF_4 , BF_3) не проявляют селективность по отношению к золоту, и поэтому их промышленное использование ориентировано, прежде всего, на разрушение минералов, удерживающих золото. Одним из примеров является переработка техногенных отходов со средним содержанием 16–18 г/т Au (максимально до 65 г/т) по бифторидной технологии с использованием гидрофторида аммония (NH_4HF_2) в Приморском крае (Криченский рудно-россыпной узел). Данная технология основана на различных физико-химических свойствах образующихся фторметаллатов аммония. Золото устойчиво к гидрофториду аммония и в процессе первичного выщелачивания не переходит в раствор, формируя вместе с ильменитом, гематитом, магнетитом и кварцем нерастворимый остаток. Дальнейшая переработка кека заключается в его повторном фторировании гидрофторидом аммония и отделении твердого продукта фильтрацией. Нерастворимый остаток подвергается магнитной сепарации с выделением немагнитной фракции, в которой аккумулируется до 90% золота (12–19 кг/т Au) при более чем 200-кратном обогащении по сравнению с исходным сырьем. Благодаря химическому методу вскрытия гидрофторидом аммония золотосодержащих отходов проводится не только их обогащение по золоту, а также комплексная переработка с получением товарных продуктов, например гексафтортитаната [33].

Сравнительная таблица позволяет обобщенно представить технологические особенности применения нецианидных растворителей золота в сопоставлении с цианидным выщелачиванием, их достоинства и недостатки при переработке разнотипного золотосодержащего сырья. Широкий выбор способов перевода золота в раствор с использованием окислителей и комплексообразователей предполагает возможность более обоснованного подхода к созданию технологии переработки разнотипного золотосодержащего сырья, особенно обладающего высокой степенью упорности (табл. 2).

Таблица 2. Особенности применения нецианидных растворителей золота при переработке рудного и техногенного сырья

Table 2. Features of applying non-cyanide gold solvents, when processing ore and technogenic raw materials

Наименование растворителя золота	Область pH процесса	Средняя степень растворения золота Au, %	Типы перерабатываемого золотосодержащего сырья	Недостатки растворителя в процессе выщелачивания золота	Главные отличия и достоинства нецианидных растворителей от цианида
Цианид	10,5–11	73	Любые типы руд, за исключением упорных к цианированию	Высокая токсичность реагента Повышенные требования к упаковке и транспортировке	–
Хлор-реагент	2,0–4,0	68	Хвосты амальгамации Гравитационные концентраты	При обработке с повышенным содержанием сульфидной серы значительно увеличивается расход Требуются коррозионноустойчивые материалы для изготовления оборудования	Скорость растворения золота выше в 13 раз по сравнению с цианированием с кислородом и в 43 раза с воздухом
Тиосульфат	9,4–9,5	37	Упорные золотосодержащие руды со значительным содержанием марганца, меди, цинка, свинца и природного углерода	Окисление и диспропорционирование в водных растворах, которые приводят к образованию сульфитов, сульфатов и полиитионатов	Тиосульфатные соединения дешевле, так как их производство возможно на месте золотодобывающего предприятия Низкое содержание примесных металлов в тиосульфатных растворах дает возможность применять их для более широкого спектра упорных руд Меньшее влияние на окружающую среду, что связано с использованием биоразлагаемых и безвредных катионов K^+ , Na^+ , Ca^{2+} и NH_4 в составе тиосульфатных солей
Тиомочевина	1,5–2,5	60	Углеродсодержащие глинистые руды Мышьяк-содержащие золотоносные руды	Тиомочевина дороже цианида натрия на 25% В окислительных условиях тиомочевина разлагается Осложнения при сорбции золота из тиомочевинных растворов активированным углем	Скорость процесса выше примерно в 10 раз Она менее подвержена воздействию со стороны ионов-примесей Меньше удельный расход и коррозионная активность реагента Растворение сульфидов меди в 6–8 раз ниже, чем при цианировании

Учитывая особенности переработки золотосодержащего техногенного сырья, прежде всего с использованием геотехнологий, по нашему мнению, представляет повышенный интерес применение хлорсодержащих реагентов. В Санкт-Петербургском горном университете выполнен значительный комплекс исследований, посвященных различным аспектам промышленного освоения складированных запасов золотоплатиносодержащих хвостов обогащения хромитовых руд. Суммарное содержание благородных ме-

таллов в хвостах обогащения хромитов находится на уровне бедных хвостов обогащения золотодобывающих фабрик (до 0,3–1 г/т). Применение сульфатно-хлоридного выщелачивания в присутствии газообразного хлора обеспечивает извлечение до 70% благородных металлов в продукционные растворы. Их дальнейшее извлечение из раствора осуществляется на анионите Purolite S 985 с получением богатого коллективного концентрата, удовлетворяющего требованиям аффинажа [34].

Заключение

При переработке техногенных месторождений золота в отличие от природных золотосодержащих объектов необходимо учитывать, что, несмотря на их значительные преимущества (известное место локализации, отсутствие необходимости предварительных стадий горной разработки и рудоподготовки), применение традиционных технологий, основанных на цианистом выщелачивании, не всегда оправданно. Упорный характер продуктов переработки первичного сырья, обусловленный низким содержанием золота, наличием его трудновскрываемых форм, природных сорбентов и широкого спектра макрокомпонентов, препятствует достижению высоких показателей извлечения золота в цианистый раствор при стандартных параметрах процесса. Повышение эффективности цианистого выщелачивания может быть достигнуто только при введении предварительного кондиционирования сырья и существенно более высоком расходе цианида, оказывающего негативное влияние на окружающую экосистему. Заинтересованность в замене

цианидного выщелачивания золота на альтернативные способы отмечается во всем мире. Усиливаются нормативные требования на применение и транспортировку этого смертельно опасного для человека и окружающей среды реагента. Такие страны, как Германия, Венгрия, Чехия, Словакия, США (штат Монтана) и Аргентина (некоторые провинциальные города), запретили использование цианида при добыче золота. Исследования и разномасштабная (полу- и промышленные испытания, производство) практика использования нецианидных комплексообразующих растворителей свидетельствуют о возможности их целевого применения для переработки техногенного золотосодержащего сырья в соответствии с его химико-минералогическим составом, географическим расположением и геологическими особенностями залегания. Учитывая, что по физико-механическим свойствам техногенное сырье хорошо подготовлено для применения геотехнологических методов отработки, целесообразно рассмотрение их применения в вариантах скважинного, подземного и кучного нецианидного выщелачивания.

Список литературы

1. Проблемы и перспективы методов гидрометаллургической переработки бедных сульфидных руд и техногенных отходов в северных регионах / В.А. Маслобоев, Д.В. Макаров, А.В. Светлов и др. // Труды Колыского научного центра РАН. 2018. Т 9. С. 58–64.
2. Булаев А.Г., Бодуэн А.Я., Украинцев И.В. Биоокисление упорного золотосодержащего концентрата руды месторождения Бестобе // Обогащение руд. 2019. №6. С. 8–13.
3. Saburbayeva L.Yu., Boduen A.Ya., Yu P.S., Ukraintsev I.V. Study of pressure oxidation and bacterial leaching efficiency as a method of refractory gold concentrate breakdown. (2019) IMPC 2018 - 29th International Mineral Processing Congress, pp. 2911–2921.
4. Добыча золота: оборудование, технологии... // Золотодобыча [Электронный ресурс]. URL: <https://zolotodb.ru> (дата обращения: 02.09.2020).
5. Goldminingunion.ru [Электронный ресурс]. URL: <http://goldminingunion.ru> (дата обращения: 02.09.2020).
6. Производство золота в странах мира // Золотодобыча [Электронный ресурс]. URL: <https://zolotodb.ru/article/11330/page=all> (дата обращения: 10.09.2020).
7. Котировки акций, курсы валют, новости, компании: РБК Инвестиции... [Электронный ресурс]. URL: <https://quote.rbc.ru> (дата обращения: 05.09.2020).
8. Отходы производства и потребления. Минприроды России [Электронный ресурс]. URL: <http://gosdoklad-ecology.ru/2018/obrashchenie-s-otkhodami-proizvodstva-i-potrebleniya/otkhody-proizvodstva-i-potrebleniya> (дата обращения: 20.09.2020).
9. Актуальные вопросы оценки и освоения техногенных месторождений золота [Электронный ресурс]. URL: https://zolteh.ru/geology/aktualnye_voprosy_otsenki_i_osvoeniya_tekhnogennykh_mestorozhdeniy_zolota/ (дата обращения: 20.02.2021).
10. ГРК «Быстринское» - Норникель. URL: <https://www.nornickel.ru/careers/bystrinskoye/#location> (дата обращения: 20.09.2020).
11. ГОК «Перевальный» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.amur-gold.ru/proizvodstvo/gok-perevalnyy> (дата обращения: 20.09.2020).
12. Вартамонова В.С., Бортникова С.Б., Оплеухин А.А. Фитотоксичность лежалых отходов цианирования золотосодержащей руды на территории накопленного экологического ущерба // Вестник Пермского университета. Сер. Биология. 2020. Вып. 1. С. 33–40.
13. Макаров А.А., Салов В.М. Анализ способов извлечения золота из медистых золотосодержащих руд // Вестник ИрГТУ. 2012. №10 (69). С. 185–188.
14. Ronald Eisler, Stanley N. Wiemeyer. Cyanide hazards to plants and animals from gold mining and related water issues. J. Rev Environ Contam Toxicol. Vol. 184 (2010), pp. 21–54.

15. Myagkaya I.N., Lazareva E.V., Gustaytis M.A., Zhmodik S.M. Gold and silver in a system of sulfide tailing. Part 1 Migration in water flow. *Journal of Geochemical Exploration*, 2016, Vol.160, pp.16–30.
16. Myagkaya I.N., Lazareva E.V., Gustaytis M.A., Zhmodik S.M. Gold and silver in a system of sulfide tailing. Part 2: Reprecipitation on natural peat. *Journal of Geochemical Exploration*, 2016, Vol.165, pp.8–22.
17. Загрязнение ртутью окружающей среды после эксплуатации Ново-Урского золоторудного месторождения (Кемеровская область) / М.А. Густайтис, И.Н. Мягкая, Б.Л. Щербов и др. // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле». 2016. Т. 18. – С. 14–24.
18. Федосеев И.В. К вопросу о нейтрализации цианистых соединений при проведении средозащитных мероприятий при извлечении тонковкрапленного самородного золота из коренных пород / И.В. Федосеев, М.Ш. Баркан // Записки Горного института. 2016. Т. 219. С. 472–476.
19. Цианирование и экология // Золотодобыча [Электронный ресурс]. URL: <https://zolotodb.ru/article/10460> (дата обращения: 30.09.2020).
20. Меретуков М.А., Орлов А.М. Металлургия благородных металлов. Зарубежный опыт. М.: Металлургия, 1991. 416 с.
21. Выщелачивание золота с применением альтернативных растворителей / А.Е. Воробьев, В.М. Досаев, Е.В. Чекушина и др. // Естественные и технические науки. 2015. № 6. С. 456–461.
22. Лодейщиков В.В., Панченко А.Ф., Хмельникацкая О.Д. Тиокарбамидное выщелачивание золотых и серебряных руд. *Гидрометаллургия золота*. М.: Наука, 1980. С. 26–35.
23. Самихов Ш.Р., Зинченко З.А., Бобомуродов О.М. Изучение условий и разработка технологии тиомочевинного выщелачивания золота и серебра из руды месторождения Чоре // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. 2013. Т. 56. №4. С. 318–324.
24. Радомская В.И., Лосева О.В., Радомский С.М. Применение тиомочевины для концентрирования золота из вторичного сырья // Вестник ДВО РАН. 2004. №1. С. 80–86.
25. Радомская В.И., Радомский С.М., Павлова Л.М. Условие применения технологии тиокарбамидного выщелачивания // Научно-технический журнал «Георесурсы». 2013. №5 (55). С. 22–27.
26. Самихов Ш.Р., Зинченко З.А. Исследования процесса тиосульфатного выщелачивания золотых мышьяксодержащих руд месторождения Чоре // Доклады Академии Наук Республики Таджикистан. 2014. Т. 57. №2. С. 145–150.
27. D. Feng, Van Deventer J.S.J. Leaching behaviour of sulphides in ammoniacal thiosulphate systems. *J. Hydrometallurgy*. Vol. 63. No. 2 (2002), pp.189–200.
28. Гидрохлорирование золотосодержащих руд, история [Электронный ресурс]. URL: <https://zolotodb.ru/article/10819> (дата обращения: 05.10.2020).
29. Захаров Б.А., Меретуков М.А. Золото: упорные руды. М.: Издательский дом «Руда и металлы», 2013. 452 с.
30. Техника и технология извлечения золота из руд за рубежом / Н.А. Василкова, И.А. Жучков, К.Д. Игнатова, В.В. Лодейщиков, А.Ф. Панченко, И.С. Стахеев, О.А. Шубина. М.: Металлургия, 1973. 288 с.
31. R. Ahtiainen, M. Lundström. Cyanide-free gold leaching in exceptionally mild chloride solutions. *Journal of Cleaner Production*, 234 (2019), pp. 9–17.
32. Плаксин И.Н. Металлургия благородных металлов. М.: Металлургиздат, 1958. С. 323–326.
33. Переработка техногенного золотосодержащего сырья / М.А. Медков, Г.Ф. Крысенко, Д.Г. Гэпов и др. // Вестник ДВО РАН. 2010. №5. С. 75–78.
34. Зотова И.Е. Перспективы применения сульфатно-хлоридного выщелачивания платинометаллических техногенных отходов горнопромышленного комплекса / И.Е. Зотова, Г.В. Петров, С.Б. Фокина, Е.В. Сизякова // Естественные и технические науки. 2019. №12. С. 350–354.

References

1. Masloboev V.A., Makarov D.V., Svetlov A.V., Fokina N.V., Yanishevskaya E.S., Goryachev A.A. Problems and prospects of hydrometallurgical processing methods for poor sulfide ores and technogenic waste in the northern regions. *Trudy Kolskogo nauchnogo centra RAN* [Transactions of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences], 2018, vol. 9, pp. 58–64. (In Russ.)
2. Bulaev A.G., Baudouin A.Ya., Ukraintsev I.V. Biooxidation of the refractory gold-containing concentrate of ore of the Bestobe deposit. *Obogashchenie rud* [Ore Beneficiation], 2019, no 6, pp 8–13. (In Russ.)
3. Saburbayeva L.Yu. Boduen A.Ya. Yu P.S., Ukraintsev I.V. Study of pressure oxidation and bacterial leaching efficiency as a method of refractory gold concentrate breakdown. (2019) IMPC 2018 - 29th International Mineral Processing Congress, pp. 2911–2921.
4. Gold Mining - Gold Mining: Equipment, technology... Available at: <https://zolotodb.ru> (Accessed on September 2, 2020).
5. Goldminingunion.ru. Available at: <http://goldminingunion.ru> (Accessed on September 2, 2020).
6. Gold Production in the World. Gold Mining. Available at: <https://zolotodb.ru/article/11330/page=all> (Accessed on September 10, 2020).

7. Quotations of shares, exchange rates, news, companies: RBC Investments. Available at: <https://quote.rbc.ru> (Accessed on September 5, 2020).
8. Production and consumption waste. Ministry of Natural Resources of Russia. Available at: <http://gosdoklad-ecology.ru/2018/obrashchenie-s-othodami-proizvodstva-i-potrebleniya/othody-proizvodstva-i-potrebleniya> (Accessed on September 20, 2020).
9. Current issues of assessment and development of technogenic gold deposits. Available at: https://zolteh.ru/geology/aktualnye_voprosy_otsenki_i_osvoeniya_tekhnogennykh_mestorozhdeniy_zolota/ (Accessed on February 20, 2021).
10. Bystrinskoye Group of Companies – Norilsk Nickel. Available at: <https://www.nornickel.ru/careers/bystrinskoye/#location> (Accessed on September 20, 2020).
11. Mining and Processing Plant Perevalny. Available at: <http://www.amur-gold.ru/proizvodstvo/gok-perevalnyy> (Accessed on September 20, 2020).
12. Vartamonova V.S., Bortnikova S.B., Opleukhin A.A. Phytotoxicity of stale waste of cyanidation of gold-containing ore on the territory of accumulated environmental damage. *Vestnik Permskogo universiteta. Seriya: Biologiya* [Bulletin of Perm University. Series: Biology], 2020, no. 1, pp. 33–40. (In Russ.)
13. Makarov A.A., Salov V.M. Analysis of methods for extracting gold from copper gold-bearing ores. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2012, no.10 (69), pp. 185–188. (In Russ.)
14. Ronald Eisler, Stanley N. Wiemeyer. Cyanide hazards to plants and animals from gold mining and related water issues. *J. Rev Environ Contam Toxicol*. Vol. 184 (2010), pp. 21–54.
15. Myagkaya I.N., Lazareva E.V., Gustaytis M.A., Zhmodik S.M. Gold and silver in a system of sulfide tailing. Part 1 Migration in water flow. *Journal of Geochemical Exploration*, 2016, Vol.160, pp.16–30.
16. Myagkaya I.N., Lazareva E.V., Gustaytis M.A., Zhmodik S.M. Gold and silver in a system of sulfide tailing. Part 2: Reprecipitation on natural peat. *Journal of Geochemical Exploration*, 2016, Vol.165, pp.8–22.
17. Gustaitis M.A., Myagkaya I.N., Shcherbov B.L., Lazareva E.V. Mercury contamination of environment after the operation of the Novo-Ursk gold ore deposit (the Kemerovo region). *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Nauki o Zemle»* [The Bulletin of Irkutsk State University. Series “Earth Sciences”], 2016, vol.18, pp. 14–24. (In Russ.)
18. Fedoseev I.V., Barkan M.Sh. On the issue of neutralization of cyanide compounds during environmental protection measures in the extraction of fine-grained native gold from bedrock. *Zapiski Gornogo instituta* [Journal of Mining Institute], 2016, vol. 219, pp. 472–476. (In Russ.)
19. Cyanidation and ecology. Gold mining. Available at: <https://zolotodb.ru/article/10460> (Accessed on September 30, 2020). (In Russ.)
20. Meretukov M.A., Orlov A.M. *Metallurgiya blagorodnykh metallov. Zarubezhnyy opyt* [Metallurgy of noble metals. Foreign practices]. Moscow: Metallurgy, 1991, 416 p. (In Russ.)
21. Vorobyov A.E., Dosaev V.M., Chekushina E. V., Shchelkin A.A., Chekushina T.V. Leaching of gold using alternative solvents. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki* [Journal of Natural and Technical Sciences], 2015, no. 6, pp. 456–461. (In Russ.)
22. Lodeishchikov V.V., Panchenko A.F., Khmelnikatskaya O.D. *Tiokarbamidnoe vyshchelachivanie zolotykh i serebryanykh rud. Gidrometallurgiya zolota* [Thiocarbamide leaching of gold and silver ores. Hydrometallurgy of gold]. Moscow: Science, 1980, pp. 26–35. (In Russ.)
23. Samikhov Sh.R., Zinchenko Z.A., Bobomurodov O.M. Study of conditions and development of technology for thiourea leaching of gold and silver from the Chore deposit ore. *Doklady Akademii nauk Respubliki Tadjikistan* [Reports of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan], 2013, vol. 56, no. 4, pp. 318–324. (In Russ.)
24. Radomskaya V.I., Loseva O.V., Radomsky S.M. The use of thiourea for concentrating gold from secondary raw materials. *Vestnik Dalnevostochnogo otdeleniya Rossiyskoy akademii nauk* [Vestnik of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences], 2004, no. 1, pp. 80–86. (In Russ.)
25. Radomskaya V.I., Radomsky S.M., Pavlova L.M. Application condition of thiocarbamide leaching technology. *Nauchno-tekhnicheskii zhurnal «Georesursy»* [Georesources. Scientific and technical journal], 2013, no. 5 (55), pp. 22–27. (In Russ.)
26. Samikhov Sh.R., Zinchenko Z.A. Research on the process of thiosulfate leaching of gold arsenic-containing ores of the Chore deposit. *Doklady Akademii nauk Respubliki Tadjikistan* [Reports of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan], 2014, vol. 57, no. 2, pp. 145–150. (In Russ.)
27. D. Feng, Van Deventer J.S.J. Leaching behaviour of sulphides in ammoniacal thiosulphate systems. *J. Hydrometallurgy*. Vol.63, no. 2, (2002), pp. 189–200.
28. Hydrochlorination of gold-bearing ores: history. Available at: <https://zolotodb.ru/article/10819> (Accessed on October 5, 2020). (In Russ.)
29. Zakharov B.A., Meretukov M.A. *Zoloto: upornye rudy* [Gold: refractory ore]. Moscow: Ore & Metals Publishing House, 2013, 452 p. (In Russ.)

30. Vasilkova N.A., Zhuchkov I.A., Ignatieva K.D., Lodeishchikov V.V., Panchenko A.F., Stakheev I.S., Shubina O.A. *Tekhnika i tekhnologiya izvlecheniya zolota iz rud za rubezhom* [Machinery and technology of gold extraction from ores abroad]. Moscow: Metallurgy, 1973, 288 p. (In Russ.)
31. R. Ahtiainen, M. Lundström. Cyanide-free gold leaching in exceptionally mild chloride solutions. *Journal of Cleaner Production*, 234 (2019), pp. 9–17.
32. Plaksin I.N. *Metallurgiya blagorodnykh metallov* [Metallurgy of noble metals]. Moscow: Metallurgical publishing, 1958, pp. 323–326. (In Russ.)
33. Medkov M.A., Krysenko G.F., Gepov D.G., Yudakov A.A. Processing of technogenic gold-bearing raw materials. *Vestnik Dalnevostochnogo otdeleniya Rossiyskoy akademii nauk* [Vestnik of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences], 2010, no. 5, pp. 75–78. (In Russ.)
34. Zotova I.E., Petrov G.V., Fokina S.B., Sizyakova E.V. Prospects for the use of sulfate-chloride leaching of platinum-metal technogenic waste of the mining complex. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki* [Journal of Natural and Technical Sciences], 2019, no. 12, pp. 350–354. (In Russ.)

Поступила 29.01.2020; принята к публикации 09.03.2021; опубликована 25.03.2021
Submitted 29/01/2020; revised 09/03/2021; published 25/03/2021

Никитина Татьяна Юрьевна – аспирант кафедры металлургии,
Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия.
Email: nikatatka@yandex.ru. ORCID 0000-0003-1544-2314

Петров Георгий Валентинович – доктор технических наук, доцент профессор кафедры металлургии,
Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия.
Email: pet-roffg@yandex.ru. ORCID 0000-0003-2382-5235

Tatyana Yu. Nikitina – postgraduate student of the Department of Metallurgy,
Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia.
Email: nikatatka@yandex.ru. ORCID 0000-0003-1544-2314

Georgiy V. Petrov – DrSc (Eng.), Associate Professor, Professor at the Department of Metallurgy,
Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia.
Email: petroffg@yandex.ru. ORCID 0000-0003-2382-5235



ТЕРМОДИНАМИКА И КИНЕТИКА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ В ПОСТОЯННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Аркулис М.Б., Дубский Г.А., Долгушин Д.М., Мишенева Н.И.

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

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы): применение силуминов широко распространено в различных отраслях промышленности: в судо- и авиастроении, строительстве, оружейном производстве, при изготовлении бытовых и сантехнических изделий. В связи с чем ведутся активные исследования процесса переплавки силуминов с целью получения заданных физико-технических свойств. Особенно актуальным является исследование влияния внешних воздействий (ультразвуковых волн, магнитного поля, электрического поля, механических вибраций) на физические свойства слитка. **Цель работы:** установить параметры внешних полей, влияющие на процесс кристаллизации расплава. **Используемые методы:** теоретическая оценка влияния постоянного магнитного поля с индукцией $B \leq 1$ Тл на некоторые физико-технические параметры кристаллизующегося расплава; экспериментальное исследование, направленное на выявление влияния магнитных полей на кинетику и термодинамику, а также тепломассоперенос процесса кристаллизации расплавов силуминов. **Новизна:** в настоящее время отсутствуют физические и физико-математические модели процессов взаимодействия магнитных полей и внутренних параметров, лежащих в основе кинетики и термодинамики кристаллизации, а также тепломассопереноса расплавов силуминов. Нами показана возможность установления функциональной связи характеристик магнитного поля и внутренних параметров, лежащих в основе кинетики кристаллизации расплава. **Результат:** установлено и экспериментально подтверждено, что постоянное магнитное поле на кинетику и термодинамику кристаллизации расплава парамагнитного силумина существенного воздействия не оказывает. **Практическая значимость:** проведенные исследования служат предпосылкой к установлению основ взаимодействия магнитных полей с расплавом металла при его кристаллизации и дальнейшей разработке способов формирования заданного состава и микроструктуры слитка.

Ключевые слова: потенциал Гиббса, температура фазового равновесия, температура переохлаждения, магнитная энергия намагничивания, скрытая теплота фазового перехода.

© Аркулис М.Б., Дубский Г.А., Долгушин Д.М., Мишенева Н.И., 2021

Для цитирования

Термодинамика и кинетика кристаллизации алюминиевых сплавов в постоянном магнитном поле / Аркулис М.Б., Дубский Г.А., Долгушин Д.М., Мишенева Н.И. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №1. С. 29–34. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-1-29-34>



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

THERMODYNAMICS AND KINETICS OF CRYSTALLIZATION OF ALUMINUM ALLOYS IN A CONSTANT MAGNETIC FIELD

Arkulis M.B., Dubskii G.A., Dolgushin D.M., Misheneva N.I.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance): Silumins are widely applied in various industries: shipbuilding and aircraft engineering, construction, weapons industry, and to manufacture household goods and sanitaryware products. Therefore, researchers actively study the process of remelting silumins to get the specified physical and technical properties. It is especially relevant to study external actions (ultrasonic waves, magnetic field, electric field, mechanical vibrations) on the physical properties of ingots. **Objectives:** To determine the parameters of external fields influencing the process of melt crystallization. **Methods Applied:** A theoretical assessment of the effect of a constant magnetic field with induction B of < 1 T on some physical and technical parameters of a crystallizing melt; the experimental study aimed at determining the influence of magnetic fields on kinetics and thermodynamics, and heat and mass transfer of the process of crystallizing molten silumins. **Originality:** Now, there are no physical and physical-mathematical models of the interaction between magnetic fields and internal parameters underlying kinetics and thermodynamics of crystallization, as well as heat and mass transfer of silumin melts. We showed the possibility of determining a functional relationship between the magnetic field characteristics and the internal parameters underlying kinetics of melt crystallization. **Findings:** It is determined and experimentally proved that a constant magnetic field does not significantly influence kinetics and thermodynamics of crystallization of molten paramagnetic silumin. **Practical Relevance:** The conducted research serves as a prerequisite for determining the basis for the interaction between magnetic fields and molten metal during its crystallization, and for further development of methods used to set a specified composition and microstructure of ingots.

Keywords: the Gibbs potential, phase equilibrium temperature, supercooling temperature, magnetic energy of magnetization, latent heat of the phase transition.

For citation

Arkulis M.B., Dubskii G.A., Dolgushin D.M., Misheneva N.I. Thermodynamics and Kinetics of Crystallization of Aluminum Alloys in a Constant Magnetic Field. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021, vol. 19, no. 1, pp. 29–34. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-1-29-34>

Введение

Современное промышленное производство предъявляет повышенные требования к техническим характеристикам и физическим свойствам литых материалов, в частности силуминов. Широко распространены сплавы на основе алюминия с кремнием, легированные железом, медью, цинком, магнием, титаном, марганцем и литием. Содержание добавок может быть различным и колеблется в пределах от 4 до 22%. Каждый элемент в сплаве оказывает существенное влияние на его свойства. Широкое применение силуминов обусловлено его физико-механическими свойствами. Силумин является коррозионно-стойким материалом, что позволяет сравнивать его с нержавеющей сталью. Однако, в отличие от нержавеющей стали, силумины – легкий и в то же время прочный материал. Кроме того, силумин обладает хорошей пластичностью, что позволяет широко применять его в литейном производстве. Все перечисленные особенности силуминов обуславливают их широкую область применения: авиастроение, судостроение, автомобильная промышленность, оружейное производство, сан-

технические изделия, бытовые изделия. В связи с чем во всем мире ведутся активные исследования, направленные на получение материалов с заданной микроструктурой и физико-механическими свойствами.

В первую очередь используются способы создания материалов с разным химическим составом. В работе [9] показано влияние легирования и условий кристаллизации на температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) α сплавов алюминия с кремнием и медью, показана возможность создания легких сплавов с контролируемым тепловым расширением.

Также для модификации свойств силуминов используется поверхностное легирование различными элементами. В [11] показано, что в результате многоциклового легирования силумина марки АК12 титаном в поверхностном слое толщиной 30 мкм формируется субмикронанокристаллическая многофазная структура, характеризующаяся высокой износостойкостью, превосходящей износостойкость литого силумина более чем в 14 раз.

Особо интересным является влияние внешних физических полей на расплав силумина при

его кристаллизации. Так, в работе [8] исследуется влияние ультразвуковых волн, магнитного поля, электрического поля, механических вибраций на уменьшение времени зарождения, рост кристаллов и усиление теплопередачи. А в [10] рассматривается литье с кристаллизацией под давлением, позволяющее получать плотные отливки из всех групп литейных алюминиевых сплавов.

Таким образом, вариация в химическом составе материала и влияние внешних полей на расплав позволяет получать материалы с различными физико-техническими свойствами. Формирование слитка с заданной структурой и равномерно распределенными по объему ликвициями примесей возможно при активации процессов тепломассопереноса в жидкой фазе кристаллизующегося металла [4, 5].

В данной работе объектом исследования является силумин АК12М2Мг и рассматриваются теоретические оценки влияния постоянного магнитного поля с индукцией $B \leq 1$ Тл на некоторые термодинамические и кинетические параметры кристаллизующегося расплава, характеризующие линейную скорость кристаллизации и скорость зарождения центров кристаллизации.

Теоретические и экспериментальные результаты исследования и их обсуждение

Для описания термодинамического состояния жидкой и кристаллической фаз исследуемых металлов будем использовать термодинамический потенциал Гиббса:

$$G = U - TS - IH, \quad (1)$$

где U – энтальпия, Дж; T – абсолютная температура, К; S – энтропия фаз, Дж/К; I – намагниченность, А/м; H – напряженность магнитного поля, А/м.

Тогда для кристаллической фазы

$$G_{\text{кр}} = U_{\text{кр}} - TS_{\text{кр}} - I_{\text{кр}} H, \quad (2)$$

для жидкой фазы

$$G_{\text{ж}} = U_{\text{ж}} - TS_{\text{ж}} - I_{\text{ж}} H. \quad (3)$$

Изменение потенциала Гиббса при фазовом переходе жидкость-кристалл будет

$$\Delta G = \Delta U - T\Delta S - \Delta IH, \quad (4)$$

где $\Delta U = U_{\text{ж}} - U_{\text{кр}}$ – изменение энтальпии, Дж; $\Delta S = S_{\text{ж}} - S_{\text{кр}}$ – изменение энтропии за счет температуры и намагничивания парамагнетика,

Дж/К; $\delta W_{\text{немех}} = H\Delta I$ – работа магнитного поля по намагничиванию парамагнетика (силумина), Дж.

При температуре фазового равновесия T_s изменения потенциала Гиббса $\Delta G = 0$. Изменение ΔS_i при T_s будет равно нулю, так как магнитная восприимчивость жидкого и кристаллического парамагнитного силумина в T_s одна и та же.

Таким образом, при $T = T_s$ получим

$$\Delta U_{\text{кр}} - T_s \Delta S_T - H\Delta I = 0. \quad (5)$$

Из (5) следует, что

$$\Delta S_T = \frac{1}{T_s} (q_s - H\Delta I), \quad (6)$$

где $H\Delta I = q_H$ – теплота магнетика при изменении его намагниченности, Дж.

Для любой температуры T

$$\begin{aligned} \Delta G &= \Delta U - T \frac{1}{T_s} (q_s - q_H) - H\Delta I = \\ &= \left(1 - \frac{T}{T_s}\right) (q_s - q_H) = \frac{(q_s - q_H) \Delta T}{T_s}, \end{aligned} \quad (7)$$

где q_s – скрытая теплота фазового перехода жидкость-кристалл в отсутствие магнитного поля, Дж; ΔT – температура переохлаждения, К.

Радиус кристаллического зародыша с учетом (6) будет

$$r_k = \frac{2\sigma}{\Delta G} \cdot \frac{\mu}{\rho} = \frac{2\sigma\mu T_s}{\rho(q_s - q_H)\Delta T}, \quad (8)$$

где σ – поверхностная энергия на границе кристалл-жидкость, Дж/м²; ρ – плотность закристаллизованного металла, кг/м³; $\Delta T = T_s - T_{\text{кр}}$ – температура переохлаждения расплава, К.

Работа образования кристаллического зародыша

$$A_{\text{кр}} = 32 \left(\frac{\mu}{\rho}\right)^2 \sigma^3 \frac{T_{\text{кр}}^2}{(q_s - q_H) \Delta T^2}, \quad (9)$$

где $T_{\text{кр}} = T_s - \Delta T$ – температура кристаллизации, К.

Как видно из формулы (9), при кристаллизации силумина (парамагнетика) в магнитном поле напряженностью H работа образования зародышей увеличивается, а значит, уменьшается вероятность зарождения центров кристаллизации [3], так как

$$w = Be^{-\frac{A_{\text{кр}}}{kT}}, \quad (10)$$

где B – постоянная величина, определяемая свойствами парамагнетика, Дж; k – постоянная Больцмана, Дж/К.

Для оценки вклада q_H в q_s необходимо подсчитать энергию намагничивания исследуемого силумина, в магнитном поле $B = 0,16$ Тл.

Энергия намагничивания с учетом прецессии магнитных моментов электронов проводимости, определяющих парамагнетизм Паули, будет

$$w_m^{\text{пол}} = \frac{1}{8\pi} B^2 - \frac{1}{2} \vec{I} \vec{B} = \frac{1}{8\pi} \vec{B} (B - 4\pi I) = \frac{1}{8\pi} \vec{B} \vec{H} = \frac{1}{8\pi} \frac{1}{\mu\mu_0} B^2 \left(\text{в СИ } w_m^{\text{пол}} = \frac{B^2}{2\mu\mu_0} \right). \quad (11)$$

Из (11) получим:

$$w_m^{\text{пол}} = \frac{0,16^2}{2 \cdot 12,56 \cdot 10^{-7}} = \frac{2,56 \cdot 10^{-2}}{25,12 \cdot 10^{-7}} \approx 10^4 \text{ Дж/м}^3;$$

$$q_H = w_m^{\text{пол}} \cdot V_{\text{обр}} \cdot m_{\text{обр}}^{-1} = \frac{10^4 \cdot 2,24 \cdot 10^{-5}}{62,7 \cdot 10^{-3}} \approx 3,6 \text{ Дж/кг}. \quad (12)$$

Но для силумина $q_s \approx 300$ кДж/кг. Таким образом, получаем, что $q_H \ll q_s$. Это неравенство говорит о том, что магнитное поле (в нашем случае) оказывает несущественное влияние на термическое и калорическое состояние силумина (АК12М2Мг).

Исходя из проведенной оценки, можно утверждать, что:

1) температура фазового равновесия TS при действии постоянного магнитного поля не изменяется (при $B \leq 1$ Тл), так как

$$T_s = T_{s0} \frac{q_s - q_{\text{кр}}}{q_s},$$

где T_{s0} – температура равновесия фаз в отсутствии магнитного поля, К;

2) не изменяется температура переохлаждения $\Delta T = T_s - T_{\text{кр}}$, К;

3) скрытая теплота фазового перехода не меняется, так как

$$q_s - q_H = q_s \left(1 - \frac{q_H}{q_s} \right) \approx q_s,$$

где $\frac{q_H}{q_s} \ll 1$.

Учитывая результаты проделанной работы, можно утверждать, что постоянное магнитное

поле на термодинамические и кинетические процессы кристаллизации металлического парамагнетика, а именно силумина, не оказывает существенного влияния.

Но это не значит, что постоянное магнитное поле вовсе бесполезно при кристаллизации расплава.

При наложении магнитного поля на жидкий парамагнетик число электронов проводимости в нем со спинами, ориентированными по полю \vec{B} , будет больше, чем против поля [4], на величину

$$\frac{N_{\uparrow}}{N_{\downarrow}} \approx e^{\frac{\mu_B B}{kT}},$$

где μ_B – магнетон Бора, Дж/Тл.

Это должно изменить s -, p -состояния электронов, а значит, их энергию обменного взаимодействия, дающей вклад в энергию связи при формировании структуры кристалла.

Предлагаются вниманию результаты экспериментального исследования влияния постоянного магнитного поля с индукцией $B \leq 1$ Тл на процесс кристаллизации расплава алюминиевого сплава АК12М2Мг. Исследование проводилось на экспериментальной установке, разработанной и построенной на кафедре физики ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», описанной в работе [1].

Плавление и охлаждение образцов производилось в алундовом тигле цилиндрической формы высотой 200 мм и диаметром 20 мм. Измерение температуры производилось с помощью специально выполненного термопарного термометра, который помещался внутрь расплава. Расплав сплава специальным механическим устройством перемещался в объем управляемого кристаллизатора. Температура расплава в процессе охлаждения фиксировалась с помощью двухкоординатного самописца ПДС-021. Полученные таким образом температурно-временные зависимости охлаждения расплава АК12М2Мг в магнитном поле и без него представлены на рисунке.

При кристаллизации исследуемого расплава градиент температуры между стенкой тигля и стенкой кристаллизатора поддерживался постоянным и равным 15°C/мм. Магнитное поле было направлено перпендикулярно оси цилиндрического тигля. Точность измерения температуры составляла 0,2%.

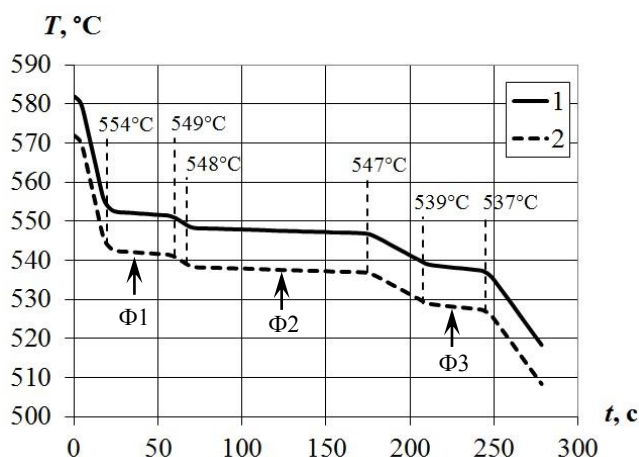


Рис. Температурно-временные зависимости охлаждения расплава АК12М2Мг: 1 – кривая охлаждения без магнитного поля; 2 – кривая охлаждения в магнитном поле с индукцией $B = 0,2$ Тл (Кривая 2 для наглядности сдвинута по температуре относительно кривой 1 вниз на величину $\Delta T = 10^\circ\text{C}$); $\Phi 1$, $\Phi 2$, $\Phi 3$ – фазы сплава

Fig. Cooling curves of molten AK12M2Mg: 1 is a cooling curve without a magnetic field; 2 is a cooling curve in a magnetic field with induction $B = 0.2$ T. For clarity, curve 2 is shifted down in temperature relative to curve 1 by value $\Delta T = 10^\circ\text{C}$; $\Phi 1$, $\Phi 2$, $\Phi 3$ are alloy phases

Сравнение представленных на рисунке зависимостей позволяет сделать следующие выводы:

- 1) данный сплав содержит три фазы;
- 2) температурные интервалы кристаллизации фаз $\Phi 1$, $\Phi 2$, $\Phi 3$ без магнитного поля и с ним не изменяются;
- 3) время кристаллизации фаз в магнитном поле и без него в пределах точности эксперимента остается одним и тем же;

4) согласно выводу 3 линейная скорость кристаллизации фаз с магнитным полем и без него одна и та же.

Объяснение данных фактов следует из теоретических выводов, приведенных выше. Кроме этого, нами было показано [2, 3], что линейная скорость роста кристалла равна

$$v_{\text{л}} = \frac{\lambda_{\text{эф}}}{q_s \rho} \frac{dT}{dr}, \quad (13)$$

где $\lambda_{\text{эф}}$ – эффективная теплопроводность, Вт/(м·К); q_s – скрытая теплота фазового перехода расплав-кристалл, Дж; ρ – плотность закристаллизованного сплава, кг/м³; $\frac{dT}{dr}$ – градиент температуры между стенками тигля и кристаллизатора, К/м.

Поскольку кристаллизация сплава проходит при постоянной температуре, то $\lambda_{\text{эф}}$, ρ и $\frac{dT}{dr}$ остаются постоянными, а q_s не зависит от величины внешнего магнитного поля. Поэтому, как следует из (12), линейная скорость кристаллизации без магнитного поля и с ним остается одной и той же, что и наблюдается в эксперименте.

Постоянство времен кристаллизации фаз $\Phi 1$, $\Phi 2$, $\Phi 3$ в магнитном поле и без него обусловлено тем, что вклад энергии намагничивания q_H электронов проводимости, находящихся вблизи уровня Ферми, много меньше скрытой энергии фазового перехода q_s при кристаллизации. Поэтому энергия намагничивания не может изменить термодинамическое и калорическое состояние на границе расплав-кристалл.

Список литературы

1. Воздействие импульсного магнитного поля на расплав парамагнитного металла при кристаллизации / Долгушин Д.М., Дубский Г.А., Нефедьев А.А., Риве В.В., Долгушина О.В., Кайпер А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №3. С. 57–66. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-57-66>
2. Поверхностное омеднение стальной проволоки / Вдовин К.Н., Дубский Г.А., Нефедьев А.А., Деревянко Д.В. // Металлы. 2016. №2. С. 92–98.
3. Дубский Г.А., Егорова Л.Г. Методика определения линейной скорости роста кристалла при кристаллизации алюминия в магнитном поле // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. 2017. Т. 5. №2. С. 19–24.
4. Лычев А.П., Черемисин А.И. Влияние магнитного поля на линейную скорость роста кристаллов // Электронная обработка материалов. 1981. № 2. С. 55–57
5. Мартынов О.В., Голиков С.С. Влияние внешнего магнитного поля на кристаллизацию стального слитка // Разливка стали в изложницы. 1984. 370 с.
6. Ивановский В.И., Черникова Л.А. Физика магнитных явлений: Семинары: учеб. пособие для физ. спец. ун-тов / под ред. Е.И. Кондорского. М.: Изд-во МГУ, 1981. 288 с.
7. Румер Ю.Б., Рывкин М.Ш. Термодинамика, статистическая физика и кинетика: учеб. пособие для физ. спец. вузов. 2-е изд., испр. и доп. М.: Наука, 1977. 552 с.
8. Wu Y., Zhang X., Xu X., Lin X., Liu L. A review on the effect of external fields on solidification, melting and heat transfer enhancement of phase change materials // Journal of Energy Storage. 2020. V. 31. P. 101567.
9. Попова М.В., Малюх М.А., Лаврова Н.Б. Совместное влияние легирования и условий кристаллизации на технологичность и тепловое расширение литых алюминиевых сплавов // Актуальные проблемы в машиностроении. 2017. Т. 4. № 1. С. 112–118.
10. Кристаллизация под давлением доэвтектических и заэвтектических силуминов / Батышев К.А., Батышев А.И., Семенов К.Г., Демьянов Е.Д., Юсипов Р.Ф. // Заготовительные производства в машиностроении.

2018. Т. 16. № 11. С. 491–494.

11. Многоцикловое поверхностное легирование силумина титаном / Иванов Ю.Ф., Клопотов А.А., Ереско С.П., Петрикова Е.А., Лопатин И.В. // Решетневские чтения: материалы XXIII Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева. В 2-х ч. / под ред. Ю.Ю. Логинова. 2019. С. 526–528.

References

1. Dolgushin D.M., Dubsky G.A., Nefedev A.A., Rive V.V., Dolgushina O.V., Kayper A. Effect of a pulsed magnetic field on paramagnetic melt during crystallization. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2018, vol. 16, no. 3, pp. 57–66. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-57-66>
2. Vdovin K.N., Dubsky G.A., Nefedev A.A., Derevyanko D.V. Surface copper plating of steel wire. *Metally* [Metals], 2016, no. 2, pp. 92–98. (In Russ.)
3. Dubsky G.A., Egorova L.G. Methodology for determining the linear crystal growth rate in crystallization of aluminum in a magnetic field. *Matematicheskoe i programmnnoe obespechenie sistem v promyshlennoi i sotsialnoi sferakh* [Software of Systems in the Industrial and Social Fields], 2017, vol. 5, no. 2, pp. 19–24. (In Russ.)
4. Lychev A.P., Cheremishin A.I. Influence of the magnetic field on the linear growth rate of crystals. *Elektronnaya obrabotka materialov* [Surface Engineering and Applied Electrochemistry], 1981, no. 2, pp. 55–57. (In Russ.)
5. Martynov O.V., Golikov S.S. Influence of an external magnetic field on the crystallization of a steel ingot. *Razlivka stali v izlozhnitsy* [Ingot casting], 1984, 370 p. (In Russ.)
6. Ivanovskii V.I., Chernikova L.A., edited by Kondorsky E.I. *Fizika magnitnykh yavlenii: seminar* [Physics of magnetic phenomena: seminars]. Moscow: MGU, 1981, 288 p. (In Russ.)
7. Rumer Yu.B., Rytvin M. Sh. *Termodinamika, statisticheskaya fizika i kinetika* [Thermodynamics, statistical physics and kinetics]. Moscow: Nauka, 1977, 552 p. (In Russ.)
8. Wu Y., Zhang X., Xu X., Lin X., Liu L. A review on the effect of external fields on solidification, melting and heat transfer enhancement of phase change materials. *Journal of Energy Storage*. 2020, no. 31, p. 101567.
9. Popova M.V., Malyukh M.A., Lavrova N.B. The combined effect of alloying and crystallization conditions on manufacturability and thermal expansion of cast aluminum alloys. *Aktualnye problemy v mashinostroenii* [Actual Problems in Machine Building], 2017, vol. 4, no. 1, pp. 112–118. (In Russ.)
10. Batyshev K.A., Batyshev A.I., Semenov K.G., Demyanov E.D., Yusipov R.F. Die crystallization of hypoeutectic and hypereutectic silumins. *Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroenii* [Blank production in mechanical engineering], 2018, vol. 16, no. 11, pp. 491–494. (In Russ.)
11. Ivanov Yu.F., Klopotov A.A., Eresko S.P., Petrikova E.A., Lopatin I.V. Multi-cycle surface alloying of silumin with titanium. *Reshetnevskie chteniya. Materialy XXIII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii posvyashchennoi pamyati generalnogo konstruktora raketno-kosmicheskikh sistem akademika M.F. Reshetneva* [Reshetnev readings. Proceedings of the 23rd International Scientific and Practical Conference dedicated to the memory of Academician M.F. Reshetnev, the General Designer of Rocket and Space Systems]. Edited by Yu.Yu. Loginov. 2019, pp. 526–528. (In Russ.)

Поступила 09.02.2021; принята к публикации 24.02.2021; опубликована 25.03.2021

Submitted 09/02/2021; revised 24/02/2021; published 25/03/2021

Аркулис Михаил Борисович – кандидат педагогических наук, доцент, заведующий кафедрой физики, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: arkulis78@mail.ru. ORCID 0000-0003-3006-9968

Дубский Геннадий Алексеевич – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.

Долгушин Денис Михайлович – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: denisdolgushin@mail.ru. ORCID 0000-0002-2907-2417

Мишенева Надежда Игоревна – аспирант, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: misheneva_n@mail.ru. ORCID 0000-0001-5461-8058

Mikhail B. Arkulis – PhD (Pedagogy), Associate Professor, Head of the Physics Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: arkulis78@mail.ru. ORCID 0000-0003-3006-9968

Gennady A. Dubskii – PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Denis M. Dolgushin – PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: denisdolgushin@mail.ru. ORCID 0000-0002-2907-2417

Nadezhda I. Misheneva – postgraduate student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: misheneva_n@mail.ru. ORCID 0000-0001-5461-8058

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

MATERIALS SCIENCE AND HEAT TREATMENT OF METALS

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

УДК 669.017

DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-1-35-41



ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИХ НИКЕЛЬ-МОЛИБДЕНОВЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ДЕТАЛЕЙ НЕФТЕПРОМЫСЛОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Кулемина А.А., Ковенский И.М.

Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

Аннотация. Постановка задачи: работа направлена на решение одной из наиболее актуальных задач в области материаловедения – защите от коррозии нефтяного оборудования путем применения электролитических покрытий. Для защиты от коррозии традиционно используются такие металлы, как хром, никель, цинк, кадмий. Однако получение защитного слоя не всегда является исчерпывающим решением. Наиболее перспективным представляется применение никель-молибденовых электролитических сплавов, послуживших основным предметом исследования. **Используемые методы:** в работе использовались современные методы изучения структуры и свойств материалов. Электроосаждение покрытий проводилось в лабораторных условиях из сернокислого электролита. Коррозионная стойкость определялась гравиметрическим методом в среде попутнодобываемых вод нефтяных месторождений. Структуру покрытий изучали с помощью просвечивающего электронного микроскопа Philips CM-12 и растрового микроскопа JEOL JSM-6510 A. **Новизна:** впервые для электролитических сплавов никель-молибден были проведены испытания на коррозионную стойкость в условиях, приближенных к эксплуатационным. Установлена степень влияния легирования никеля и температуры отжига на скорость коррозии покрытий. **Практическая значимость:** полученные результаты позволяют сделать вывод об использовании электролитических покрытий сплавами никеля с молибденом вместо токсичных покрытий хромом. **Результат:** в данной работе представлены результаты исследования структуры и свойств никель-молибденовых электролитических покрытий для защиты деталей нефтепромыслового оборудования от коррозии. Приведены режимы получения и термической обработки электролитических покрытий, методики их исследования. Оценена возможность эксплуатации электролитических сплавов в условиях нефтяных месторождений. Установлено, что отжиг после электроосаждения покрытий не оказывает отрицательного влияния на прочность сцепления покрытий с основой, а в ряде случаев улучшает адгезию.

Ключевые слова: электролитические покрытия, термическая обработка, структура, свойства покрытий, эксплуатационные свойства, коррозионная стойкость.

© Кулемина А.А., Ковенский И.М., 2021

Для цитирования

Кулемина А.А., Ковенский И.М. Применение электролитических никель-молибденовых покрытий для защиты деталей нефтепромыслового оборудования // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №1. С. 35–41. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-1-35-41>



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

ELECTROLYTIC NICKEL-MOLYBDENUM COATINGS APPLIED TO PROTECT PARTS OF OILFIELD EQUIPMENT

Kulemina A.A., Kovenskiy I.M.

The Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

Abstract. Problem Statement: Research is aimed at solving one of the most pressing problems in the field of materials science – protection against corrosion of oil equipment by using electrolytic coatings. To protect against corrosion, it is conventional to use metals, such as chromium, nickel, zinc, and cadmium. However, a protective layer is not always a comprehensive solution. The most promising is to use nickel-molybdenum electrolytic alloys, which served as a main subject of this research. **Methods Applied:** To carry out the research, we used modern methods of studying the structure and properties of materials. Electrodeposition of coatings was carried out in laboratory conditions from sulfuric acid electrolyte. Corrosion resistance was determined by a gravimetric method in produced water of oil fields. The coating structure was studied with Philips CM-12, a transmission electron microscope, and JEOL JSM-6510 A, a scanning microscope. **Originality:** For the first time for nickel-molybdenum electrolytic alloys we carried out the tests for corrosion resistance under conditions close to operational ones. We determined how nickel alloying and annealing temperature influence the corrosion rate of coatings. **Practical Relevance:** The obtained results allow us to make a conclusion about the use of electrolytic coatings with nickel-molybdenum alloys instead of toxic coatings with chromium. **Result:** This research paper presents the results of the studies on the structure and properties of nickel-molybdenum electrolytic coatings used for protection of oil field equipment parts against corrosion. The research contains the modes of production and thermal treatment of electrolytic coatings, and research methods. The authors assessed a potential operation of electrolytic alloys in oil fields. It has been found that annealing after electroplating of coatings does not adversely affect the adhesion of coatings to the substrate, and in some cases it improves the adhesion.

Keywords: electrolytic coatings, heat treatment, structure, coating properties, operational properties, resistance to corrosion.

For citation

Kulemina A.A., Kovenskiy I.M. Electrolytic Nickel-Molybdenum Coatings Applied to Protect Parts of Oilfield Equipment. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021, vol. 19, no. 1, pp. 35–41. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-1-35-41>

Введение

В нефтегазовой отрасли к одной из наиболее актуальных задач в области материаловедения относится защита от коррозии и в первую очередь путем применения электролитических покрытий. Для защиты от коррозии традиционно используются такие металлы, как хром, никель, цинк, кадмий. Однако получение защитного слоя не всегда является исчерпывающим решением. Зачастую коррозионные повреждения сочетаются с гидроабразивным износом. В этом случае к материалу покрытия дополнительно предъявляются требования по твердости и износостойкости, и на первое место выходят покрытия хромом. Однако применение хромовых покрытий имеет существенное ограничение из-за токсичности, так как под воздействием хлора малотоксичный трехвалентный хром переходит в более токсичный шестивалентный и возникает необходимость его замены. Наиболее перспективным представляется применение никель-молибденовых электролитических сплавов, о чем свидетельствует ряд работ отечественных и зарубежных авторов [1–4, 6].

Материалы и методика исследований

В настоящей работе рассматриваются электролитические покрытия сплавами никеля с различной концентрацией молибдена. Электроосаждение сплавов никель-молибден проводилось из сернокислого электролита никеля и молибдата натрия с добавлением хлорид-ионов и цитрата натрия в качестве комплексообразователя. Испытания покрытий проводили непосредственно после электроосаждения и после отжига при различных температурах. Для определения фазового состава получаемых покрытий применяли рентгеноструктурный анализ на рентгеновском дифрактометре ДРОН-7. Микроструктуру покрытий изучали с помощью просвечивающего электронного микроскопа Philips CM-12 и растрового электронного микроскопа JEOL JSM-6510A. Оценка микротвердости проводилась с использованием микротвердомера ПМТ-3М по методу восстановленного отпечатка при длительности испытаний 15 с и нагрузке 50 г. Внутренние напряжения определяли методом голографической интерферометрии. Коррозионную стойкость покрытий определяли гравиметриче-

ским методом в водоземulsionных средах попутнодобываемых вод нефтяных месторождений Западной и Восточной Сибири, а также в контрольных средах.

Полученные результаты и их обсуждение

В результате проведенных исследований было установлено, что сплавы никель-молибден, которые осаждали при плотностях тока 7–10 А/дм² и температуре электролита 40°C при концентрации до 18% молибдена, были однофазными и представляли собой твердый раствор молибдена в никеле. С увеличением концентрации молибдена до 25% на дифрактограмме (рис. 1) наблюдается уширение пика и его размытость, в то время как на классической диаграмме состояния такой сплав становится двухфазным и содержит помимо твердого раствора интерметаллид MoNi₄. При электроосаждении сплавов в условиях далеких от термодинамического равновесия данный сплав представляет собой пересыщенный твердый раствор молибдена в никеле. Увеличение концентрации сплава до 30% приводит к его аморфизации, и на дифрактограмме сплава отсутствуют рефлексы, которые свидетельствовали бы о его кристаллическом строении.

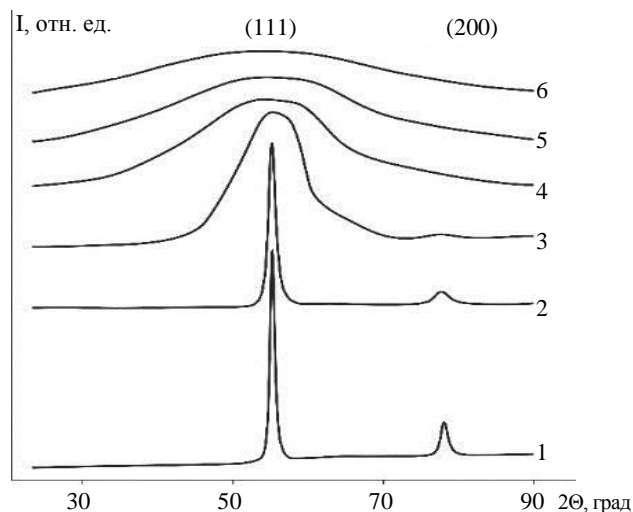


Рис. 1. Фрагменты дифрактограмм сплавов Ni-Mo: 1 – 100% Ni; 2 – Ni-5%Mo; 3 – Ni-12,5% Mo; 4 – Ni-18%Mo; 5 – Ni-25%Mo; 6 – Ni-30%Mo

Fig. 1. Fragments of Ni-Mo alloy diffractograms: 1 is 100% Ni; 2 is Ni-5%Mo; 3 is Ni-12,5% Mo; 4 is Ni-18%Mo; 5 is Ni-25%Mo; 6 is Ni-30%Mo

Микроструктура никеля и сплавов никель-молибден представлена на рис. 2. Микроструктура чистого никеля имеет субзерненное строение. При увеличении концентрации молибдена в сплавах наблюдается диспергирование структуры.

Для оценки эксплуатационных характеристик сплавов никель-молибден была изучена морфология поверхности (рис. 3).

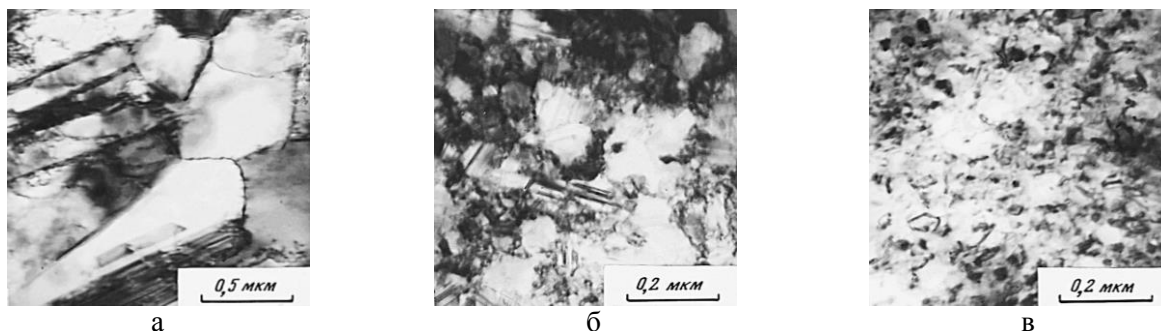


Рис. 2. Микроструктура: а – никеля; б – сплава никель – 12,5% молибдена; в – сплава никель – 25% молибдена

Fig. 2. Microstructure: a is nickel; б is nickel-12.5% molybdenum alloy; в is nickel-25% molybdenum alloy

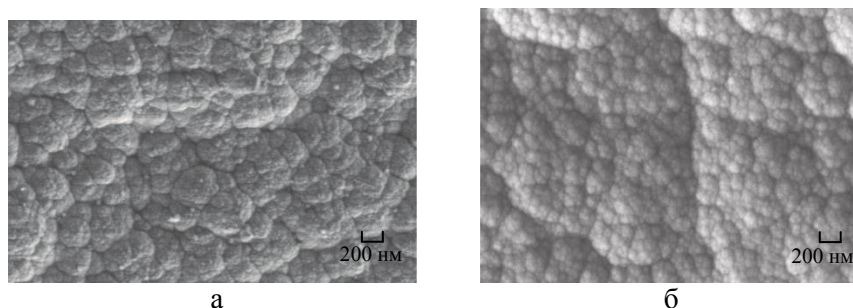


Рис. 3. Морфология поверхности электролитических сплавов никель-молибден: а – содержание молибдена 12,5%; б – содержание молибдена 25%

Fig. 3. Morphology of the surface of nickel-molybdenum electrolytic alloys: а is molybdenum content of 12.5%; б is molybdenum content of 25%

Установлено, что сплавы никеля с молибденом представляют собой плотные осадки без выраженных дефектов. В то же время электроосаждение сплавов при высоких плотностях тока ($\geq 8,5$ А/дм²) сопровождается значительными внутренними напряжениями, которые могут приводить к растрескиванию, увеличению пористости и уменьшению защитной способности получаемых покрытий, а также к отслаиванию их от основы. Релаксация внутренних напряжений достигается отжигом, температура которого ограничена развитием вторичной пористости в структуре сплава (400–450°C). На **рис. 4** представлена зависимость внутренних напряжений покрытий сплавами никель-молибден от содержания легирующего элемента непосредственно после электроосаждения и после отжига при 400°C.

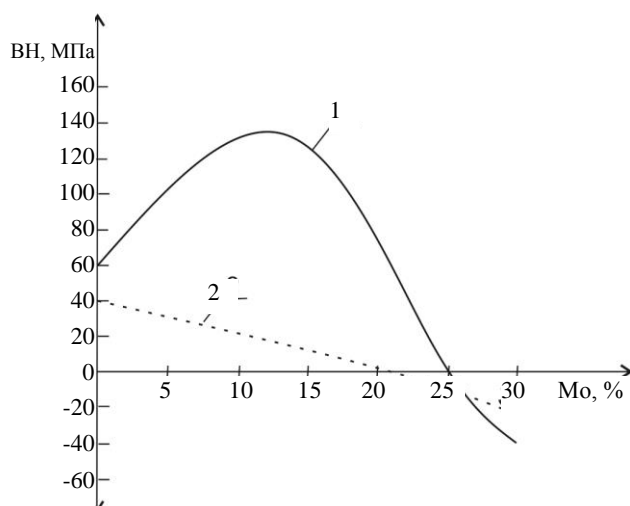


Рис. 4. Зависимость внутренних напряжений покрытий сплавами Ni-Mo от содержания молибдена: 1 – после электроосаждения; 2 – после отжига 400°C

Fig. 4. Dependence of internal stresses of coatings with Ni-Mo alloys on molybdenum content: 1 is after electrodeposition; 2 is after annealing at 400°C

В сплавах с содержанием молибдена до 12,5% наблюдается рост внутренних напряжений растяжения, которые объясняются образованием пересыщенных твердых растворов. Как было показано в [10], дальнейшее увеличение концентрации молибдена в сплаве приводит к образованию аморфной структуры и к изменению знака внутренних напряжений. Можно по-

лагать, что внутренние напряжения сжатия возникают вследствие наличия в аморфной структуре сплавов свободного объема. Определенную роль в формировании внутренних напряжений сжатия играют также субмикроструктуры, заполненные водородом, и адсорбированные частицы оксидно-гидроксидных соединений. При отжиге (200–250°C) аморфных осадков в результате структурной релаксации уровень напряжений резко снижается.

За морфологическую единицу структуры принято кристаллическое зерно, поскольку особенности его строения отражают всю информацию об электрохимических и термодинамических условиях процесса осаждения покрытий. Диспергирование структуры приводит к изменению микротвердости электролитических сплавов. На **рис. 5** показано изменение микротвердости ($H\mu$) и дисперсности (d) сплавов никель-молибден в зависимости от степени легирования.

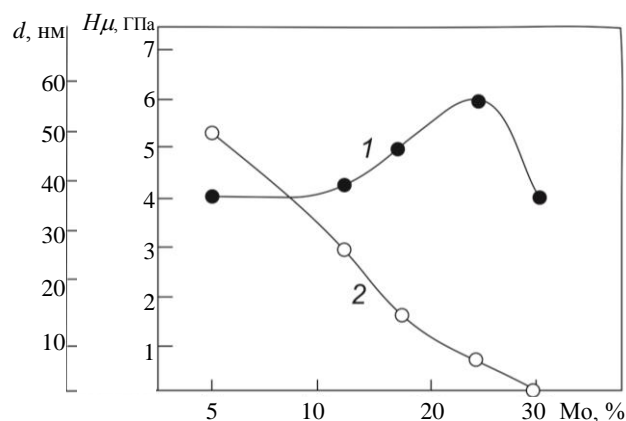


Рис. 5. Зависимость микротвердости и дисперсности сплавов никель-молибден от содержания легирующего элемента: 1 – микротвердость; 2 – дисперсность

Fig. 5. Dependence of microhardness and dispersion of nickel-molybdenum alloys on the alloying element content: 1 is microhardness; 2 is dispersion

Полученные нами данные согласуются с результатами других исследователей [2].

Коррозионную стойкость сплавов определяли в средах попутнодобываемых вод нефтяных месторождений Западной и Восточной Сибири. Составы сред приведены в **таблице**.

Таблица. Химический состав попутнодобываемых вод нефтяных месторождений
Table. Chemical composition of associated waters of oil fields

Среда	pH	Содержание ионов, мг/л							Суммарная минерализация	
		Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ +K ⁺	Fe _{общ}	мг/л	мг-экв/л
1	8,03	5751	3416	5,6	72	7,8	4918,92	0,08	14171	419,1
2	7	4468	549	8	276	12	2725	0	8038	258,8
3	4,26	188150	28,06	170	42000	8640	57244,7	1,32	296234	10413,8

Также использовались контрольные среды, состоящие из 3%-го раствора NaCl (pH 7) и 3%-го раствора NaCl с добавлением CH₃COOH (pH 4,97).

Результаты исследований приведены на рис. 6, 7.

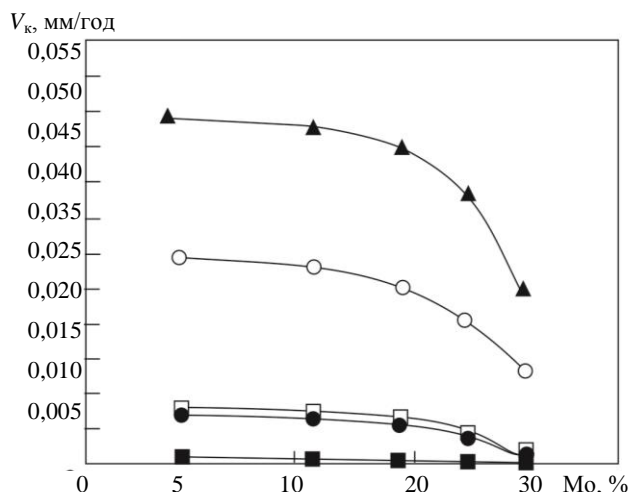


Рис. 6. Влияние содержания молибдена в сплаве на скорость коррозии V_k : ■ – 3% NaCl + CH₃COOH (pH 4,97); ○ – 3 % NaCl (pH 7); ▲ – Месторождение 1 (pH 8,03); □ – Месторождение 2 (pH 7); ● – Месторождение 3 (pH 4,26)

Fig. 6. Effect of the molybdenum content in the alloy on the corrosion rate V_k : ■ 3% NaCl + CH₃COOH (pH 4.97); ○ 3 % NaCl (pH 7); ▲ Field 1 (pH 8.03); □ Field 2 (pH 7); ● Field 3 (pH 4.26)

Снижение скорости коррозии при повышении концентрации молибдена обусловлено большей устойчивостью молибдена в кислых средах, к тому же увеличение концентрации легирующего элемента до 30% сопровождается аморфизацией покрытий и снижением активных центров коррозии.

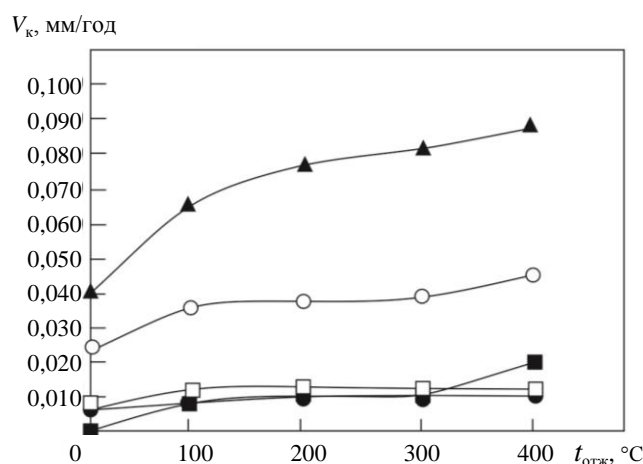


Рис. 7. Влияние температуры отжига на скорость коррозии сплава никель-25% молибдена:

■ – 3% NaCl + CH₃COOH (pH 4,97);
○ – 3 % NaCl (pH 7);
▲ – Месторождение 1 (pH 8,03);
□ – Месторождение 2 (pH 7);
● – Месторождение 3 (pH 4,26)

Fig. 7. Effect of annealing temperature on the corrosion rate of nickel-25% molybdenum alloy:
■ 3% NaCl + CH₃COOH (pH 4.97);
○ 3 % NaCl (pH 7); ▲ Field 1 (pH 8.03);
□ Field 2 (pH 7); ● Field 3 (pH 4.26)

Возрастание скорости коррозии после отжига при температуре 400°C объясняется прохождением начальных стадий рекристаллизации в покрытиях и повышением числа активных центров коррозии.

Необходимо отметить, что отжиг после электроосаждения не оказывает отрицательного влияния на прочность сцепления покрытий с подложкой.

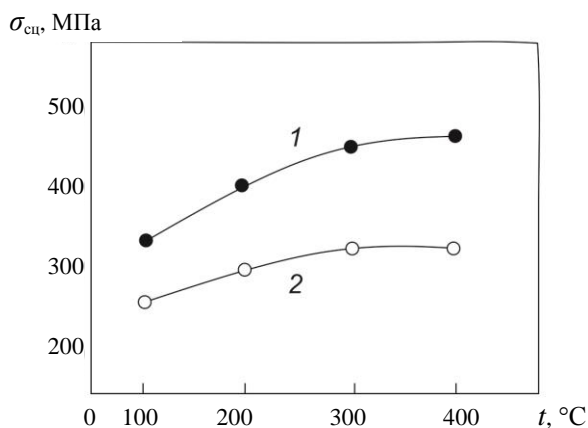


Рис. 8. Прочность сцепления покрытий сплавами никель-молибден от температуры отжига:

1 – сплав Ni-25%Mo; 2 – сплав Ni-30%Mo

Fig. 8. Adhesion of coatings with nickel-molybdenum alloys depending on annealing temperature:

1 is Ni-25%Mo alloy, 2 is Ni-30% Mo alloy

Оценка адгезии по методу отрыва конического штифта [5] показала, что в ряде случаев отжиг способствует улучшению адгезии, которое объяс-

няется ростом концентрации вакансий и эффектом так называемого «вакансионного насоса» [12].

Заключение

Проведя анализ полученных результатов исследования структуры и свойств электролитических никель-молибденовых сплавов, можно сделать следующие выводы:

Для получения работоспособных защитных покрытий рекомендуется получать покрытия с концентрацией 25–30% Мо и проводить отжиг для снятия напряжений при температуре, не превышающей 200–250°C. Полученные данные свидетельствуют, что структура никель-молибденовых сплавов, формируемая в процессе осаждения и при отжиге, весьма разнообразна, и её восприимчивость к влиянию природно-климатической среды различных регионов на коррозионную стойкость покрытий может существенно отличаться. Это обстоятельство необходимо учитывать при оптимизации технологических параметров электроосаждения и термообработки покрытий в зависимости от конкретных условий эксплуатации.

Список литературы

1. Electrochemical deposition and characterization of Ni-Mo alloy powders/ M.G. Pavlović [etc.] // Processing and Application of Ceramics. 2007. 1 [1–2]. Pp. 11–17.
2. Electrodeposition and Characterization of Nanocrystalline Ni-Mo Catalysts for Hydrogen Production/ J. Halim [etc.] // Hindawi Publishing Corporation //Journal of Nanomaterials. 2012, Article ID 845673, 9 p. doi:10.1155/2012/845673
3. Influence of molybdenum on the mechanical properties, electrochemical corrosion and wear behavior of electrodeposited Ni-Mo alloy / Nitin P. Wasekar [etc.] // Surface & Coatings Technology. 2019. 370. Pp. 298–310.
4. Allahyarzadeh M.H., Roozbehani B., Ashrafi A. Electrodeposition of high Mo content amorphous/nanocrystalline Ni-Mo alloys using 1-ethyl-3-methyl-imidazolium chloride ionic liquid as an additive // Electrochimica Acta. 2011. 56. Pp.10210–10216.
5. Плеханов И.Ф. Расчет и конструирование устройств для нанесения гальванических покрытий. М.: Машиностроение, 1988. 224 с.
6. Электролитическое легирование железа и никеля молибденом / В.В. Поветкин и др. // Металлы. 1997. № 4. С. 41–43.
7. Kulemina A.A., Kovenskiy I.M., Michiy S.S. Influence of annealing on corrosion properties of electroplated coatings // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. 511. Pp. 012015. doi:10.1088/1757-899X/511/1/012015.
8. Kulemina, A. A., Kovenskiy I. M. Influence of the Conditions for Obtaining Coatings on the Structure and Properties // Materials Today: Proceedings. 2019. 11. Pp. 311–316.
9. Study of Ni-Mo electrodeposition in direct and pulse-reverse current / Yu.M. Stryuchkova [etc.] // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 857. Issue 1. Pp. 012046.
10. Формирование структуры никель-молибденовых сплавов при электроосаждении и отжиге / И.М. Ковенский [и др.] // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2015. №2. С. 97–100.
11. Бокштейн Б.С. Диффузия в металлах. М.: Металлургия. 1978. 248 с.
12. Влияние условий получения покрытий на структуру и свойства электроосажденного никеля и сплавов на его основе / А.А. Кулемина и др. // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2018. № 3. С. 123–127.

References

1. M.G. Pavlović et al. Electrochemical deposition and characterization of Ni-Mo alloy powders. Processing and Application of Ceramics, 2007, 1 [1–2], 11–17.
2. J. Halim et al. Electrodeposition and characterization of nanocrystalline Ni-Mo catalysts for hydrogen production. Hindawi Publishing Corporation, Journal of Nanomaterials. 2012, Article ID 845673, doi:10.1155/2012/845673

3. Nitin P. Wasekar et al. Influence of molybdenum on the mechanical properties, electrochemical corrosion and wear behavior of electrodeposited Ni-Mo alloy. *Surface & Coatings Technology*, 2019, 370, 298–310.
4. Allahyarzadeh M.H., Roozbehani B., Ashrafi A. Electrodeposition of high Mo content amorphous/nanocrystalline Ni-Mo alloys using 1-ethyl-3-methyl-imidazolium chloride ionic liquid as an additive. *Electrochimica Acta*, 2011, 56, 10210–10216.
5. Plekhanov I.F. *Raschet i konstruirovaniye ustroystv dlya naneseniya galvanicheskikh pokrytiy* [Calculation and design of devices for electrodeposited coatings]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1988, 224 p. (In Russ.)
6. Povetkin V.V. et al. Electrochemical alloying of iron and nickel with molybdenum. *Metally* [Metals], 1997, no. 4, pp. 41–43. (In Russ.)
7. Kulemina A.A., Kovenskiy I.M., Michiy S.S. Influence of annealing on corrosion properties of electroplated coatings. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2019, 511, pp.12–15 doi:10.1088/1757-899X/511/1/012015.
8. Kulemina A.A., Kovenskiy I.M. Influence of the conditions for obtaining coatings on the structure and properties. *Materials Today: Proceedings*, 2019, 11, pp. 311–316.
9. Stryuchkova Yu.M. et al. Study of Ni-Mo electrodeposition in direct and pulse-reverse current. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, vol. 857, issue 1, 012046.
10. Kovenskiy I.M. et al. Forming the structure of nickel-molybdenum alloys during electrodeposition and annealing. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Neft i gaz* [Oil and Gas Studies], 2015, no. 2, pp. 97–100. (In Russ.)
11. Bokshtein B.S. *Diffuziya v metallakh* [Diffusion in metals]. Moscow: Metallurgy, 1978, 248 p. (In Russ.)
12. Kulemina A.A. et al. Effect of conditions of producing coatings on the structure and properties of electrodeposited nickel and nickel-based alloys. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Neft i gaz* [Oil and Gas Studies], 2018, no. 3, pp. 123–127. (In Russ.)

Поступила 13.02.2021; принята к публикации 19.02.2021; опубликована 25.03.2021
Submitted 13/02/2021; revised 19/02/2021; published 25/03/2021

Кулемина Алёна Александровна – старший преподаватель,
Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия.
Email: kulemina.aaa@tyuiu.ru, ORCID 0000-0003-2076-166X

Ковенский Илья Моисеевич – доктор технических наук, профессор,
Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия.
Email: kovenskijim@tyuiu.ru, ORCID 0000-0003-3241-8084

Alena A. Kulemina – Senior Lecturer,
The Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia.
Email: kulemina.aaa@tyuiu.ru, ORCID 0000-0003-2076-166X

Ilya M. Kovenskiy – DrSc (Eng.), Professor,
The Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia.
Email: kovenskijim@tyuiu.ru, ORCID 0000-0003-3241-8084

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

УДК 621.791.011

DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-1-42-47



ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Шекшеев М.А., Ширяева Е.Н.

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

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы): статья посвящена проблемам формирования структур наплавленного металла низкоуглеродистых сталей. Повышение работоспособности сварных соединений обуславливает необходимость применения технологических решений и приемов, которые улучшают структуру наплавленного металла и обеспечивают высокий уровень механических свойств. В работе проводится сравнительный анализ применения стационарных и импульсных режимов механизированной дуговой сварки и применения нано- и ультрадисперсных инокуляторов монокарбида вольфрама WC для управления структурообразованием наплавленного металла шва. **Используемые методы:** исследуемые образцы были получены способами дуговой сварки с последующим изготовлением шлифов для микроисследований. Для исследования структуры наплавленных образцов применялась световая металлография и измерение твердости по методу Виккерса. Анализ микроструктуры выполнялся с помощью световых микроскопов Meiji Techno и Микромед-Мет с применением системы компьютерного анализа изображений Thixomet Pro. Твердость наплавленного металла измеряли по методу Виккерса с помощью прибора HV-1000. **Новизна:** получены новые данные по сравнению эффективности применения стационарных и импульсных режимов механизированной дуговой сварки и применения нано- и ультрадисперсных частиц инокулятора монокарбида вольфрама WC для управления структурообразованием наплавленного металла шва. **Результат:** получены варианты структур металла при различных вариантах технологического воздействия на расплав сварочной ванны. Из анализа результатов металлографических исследований можно заключить, что наилучший вариант формирования структуры наплавленного металла достигается путем введения в расплав сварочной ванны инокулирующих нано- и ультрадисперсных частиц монокарбида вольфрама. **Практическая значимость:** полученные в результате исследований данные могут быть применены при проектировании технологических процессов сварки и наплавки низкоуглеродистых, низколегированных сталей, а также при разработке новых функциональных сварочных материалов.

Ключевые слова: сварка, наплавка, покрытый электрод, сварочная проволока, структура металла, твердость, нанопорошок, инокулирование, модифицирование.

Работа выполнена в рамках государственной поддержки молодых российских ученых – гранта Президента РФ (№ МК-3849.2021.4)

© Шекшеев М.А., Ширяева Е.Н., 2021

Для цитирования

Шекшеев М.А., Ширяева Е.Н. Формирование структуры наплавленного металла низкоуглеродистой стали при различных технологических воздействиях // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №1. С. 42–47. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-1-42-47>



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

FORMING THE STRUCTURE OF DEPOSITED METAL OF LOW-CARBON STEEL UNDER VARIOUS TYPES OF TREATMENT

Sheksheev M.A., Shiryayeva E.N.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance): The paper is devoted to the problems of forming the structures of deposited metal of low-carbon steels. Improving the performance of welded joints contributes to the use of technological solutions and techniques that improve the structure of deposited metal and provide a high level of mechanical properties. The paper presents a comparative analysis of stationary and pulse modes of mechanized arc welding and nano- and ultra-dispersed inoculators of tungsten monocarbide WC to control the structure formation of deposited weld metal. **Methods Applied:** The samples under study were manufactured by arc welding methods followed by the production of metallographic samples for microanalysis. Light metallography and Vickers hardness measurement were used to study the structure of the deposited samples. The microstructure was analyzed using Meiji Techno and Micromed-Met light microscopes using the Thixomet Pro computer image analysis system. Hardness of the deposited metal was measured using the Vickers method on an HV-1000 hardness tester. **Originality:** New data were obtained to compare efficiency of stationary and pulse modes of mechanized arc welding and nano- and ultra-dispersed inoculators of tungsten monocarbide WC for controlling the structure formation of deposited weld metal. **Findings:** The authors got options of the metal structures under various types of treatment of the molten bath. Having analyzed metallographic studies, we may conclude that the best option of forming the structure of deposited metal is achieved by adding to the molten bath inoculating nano- and ultra-dispersed particles of tungsten monocarbide. **Practical Relevance:** The data obtained as a result of the research may be applied in the design of technological processes of welding and surfacing of low-carbon, low-alloy steels, as well as in the development of new functional welding materials.

Keywords: welding, surfacing, coated electrode, welding wire, metal structure, hardness, nanopowder, inoculation, modification.

The research was carried out as part of the state support of young Russian researchers – the grant of the President of the Russian Federation (No. MK-3849.2021.4).

For citation

Sheksheev M.A., Shiryayeva E.N. Forming the Structure of Deposited Metal of Low-Carbon Steel Under Various Types of Treatment. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021, vol. 19, no. 1, pp. 42–47. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-1-42-47>

Введение

Применение новых высокопрочных материалов при изготовлении металлоконструкций [1–4] обусловило необходимость применения прогрессивных технологий для их сварки и наплавки [5–7].

Работоспособность металла сварных соединений определяется их структурой и комплексом механических свойств, сформировавшихся в условиях термических циклов сварки [8–10].

Существуют различные технологические приемы, которые позволяют управлять структурообразованием металла сварочной ванны как в момент ее кристаллизации, так и спустя какое-то время после завершения этого процесса [11,12].

Одним из таких способов является применение импульсных режимов, когда в процессе сварки с определенной частотой через электрод, помимо постоянного тока, подается импульсный ток, который влияет на формирование и отделение капли расплавленного металла с торца элект-

рода. Однако такой способ возможно реализовать только при применении сварки в среде защитных газов.

Другим вариантом управления формированием структуры металла шва является применение функциональных сварочных материалов с особыми свойствами. В частности, применение штучных электродов для ручной дуговой сварки с покрытием, содержащим в себе нано- и ультрадисперсные тугоплавкие компоненты, позволяет влиять на образование первичной структуры металла шва [13,14].

К сварным соединениям низкоуглеродистых и низколегированных сталей предъявляют повышенные требования к параметрам их качества. Поэтому целью настоящей работы являются сравнительные исследования влияния нано- и ультрадисперсных тугоплавких компонентов и стационарного и импульсного режимов сварки на структуру и механические свойства металла сварных соединений низкоуглеродистой стали.

Материалы и методы исследования

Тестовые образцы наплавленного металла получали путем сварки фрагментов проката из стали 20 размерами 330×100×10 мм со стандартной V-образной разделкой.

Механизированную сварку осуществляли в смеси защитных газов (72% Ar + 18% CO₂) сварочной омедненной проволокой марки Св-08Г2С диаметром 1,2 мм. Для сварки образцов использовали аппарат фирмы EWM Phoenix 500 pulse. Сварку осуществляли на стационарных и импульсных режимах с током до 200 А обратной полярности.

Ручную дуговую сварку осуществляли электродами с экспериментальным покрытием основного типа и стержнем из стали Св-08А диаметром 3,0 мм. В одном варианте покрытие содержало нано- и ультрадисперсные частицы монокрибида вольфрама WC (**рис. 1**) в количестве 0,4% от массы сухой смеси покрытия. В другом варианте покрытие электродов частиц WC не содержало. В качестве источника питания сварки применяли аппарат инверторного типа фирмы EWM Pico 230. Сварку осуществляли на токе до 130 А обратной полярности.

Анализ микроструктуры выполнялся на поперечных травленных образцах сварных соединений с помощью световых микроскопов Meiji Techno и Микромед-Мет с применением системы компьютерного анализа изображений Thixomet Pro.

Твердость наплавленного металла измеряли по методу Виккерса с помощью прибора HV-1000. Производили не менее трех измерений при нагрузке на индентор 0,3 кгс.

Полученные результаты и их обсуждение

Металлографический анализ образцов, полученных механизированной сваркой на стационарных режимах, показал, что металл шва имеет литую структуру с характерными столбчатыми образованиями. Крупные столбчатые кристаллиты окружены оторочкой периферийного феррита с прорастающими из нее вглубь кристалла игольчатыми образованиями видманштеттового феррита (**рис. 2**). Периферийный феррит образует непрерывную матрицу, которая как бы опоясывает кристаллы.

Структура образцов, выполненных на импульсных режимах сварки, также имеет столбчатое строение, однако в строении периферийного феррита наблюдается раздробленность на отдельные фрагменты (**рис. 3**). Наблюдается скупченность образований избыточного и видманштеттового феррита. Игольчатые образования прорастают практически на всю глубину кристаллитов.

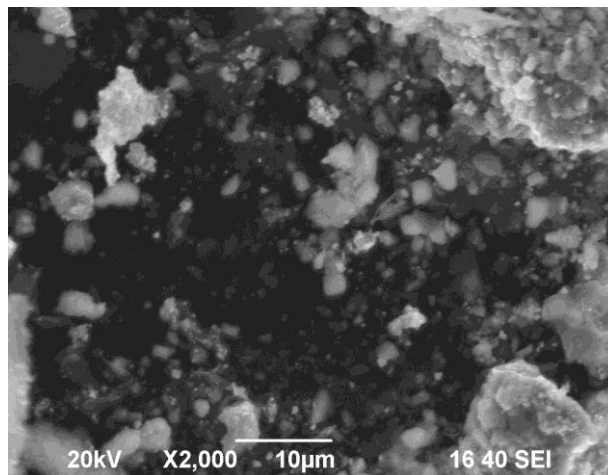


Рис. 1. Порошок монокрибида вольфрама WC (размер частиц до 50 нм), ×2000

Fig. 1. Powder of tungsten monocarbide WC (the particle size is up to 50 nm), ×2000



Рис. 2. Структура металла шва, выполненная проволокой Св-08Г2С на стационарных режимах, ×100

Fig. 2. The structure of the weld metal made with Sv-08G2S wire in stationary modes, ×100

Твердость наплавленного металла обоих образцов находится в диапазоне 221–238 единиц HV.

Анализ образцов, полученных ручной дуговой сваркой покрытыми электродами, не содержащими инокулирующих компонентов, показал, что металл шва имеет крупнокристаллическую структуру с твердостью 218–232 единиц HV (**рис. 4**). Данный тип структуры типичен для швов, выполненных электродами, предназначенными для сварки низкоуглеродистых, низколегированных сталей. Наблюдаются образования периферийного феррита, выпавшего по границам первичных зерен (кристаллов) с незначительными включениями видманштеттового феррита.



Рис. 3. Структура металла шва, выполненная проволокой Св-08Г2С на импульсных режимах, $\times 100$

Fig. 3. The structure of the weld metal made with Sv-08G2S wire in pulse modes, $\times 100$

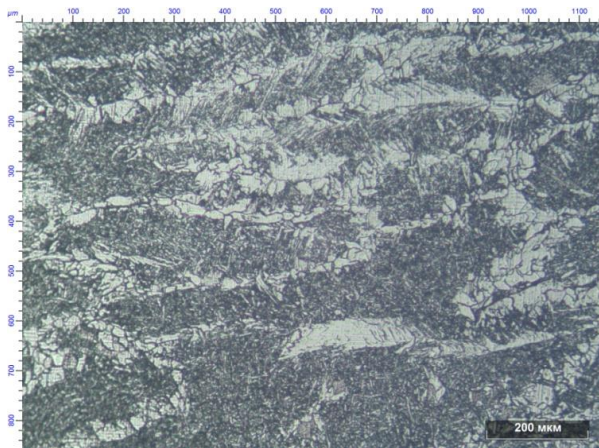


Рис. 4. Структура металла шва, выполненного экспериментальными электродами, не содержащими частиц WC, $\times 100$

Fig. 4. The structure of the weld metal made with experimental electrodes that do not contain WC particles, $\times 100$

Металл шва, полученный электродами, содержащими в своем покрытии нано- и ультрадисперсные частицы WC, имеет четко выраженную ячеистую структуру с твердостью 230–242 единиц HV (рис. 5). Кристаллиты имеют глобулярную морфологию и окружены сеткой периферийного феррита, образующего непрерывную матрицу. В сравнении с металлом, не подвергшимся инокулированию частицами WC, кристаллиты в рассматриваемом образце имеют более равновесное состояние и заметно меньший размер.

Проанализировав результаты металлографических исследований, можно заключить, что наилучший вариант формирования структуры наплавленного металла достигается путем введения в расплав сварочной ванны инокулирующих нано- и ультрадисперсных компонентов, в частности монокарбида вольфрама.

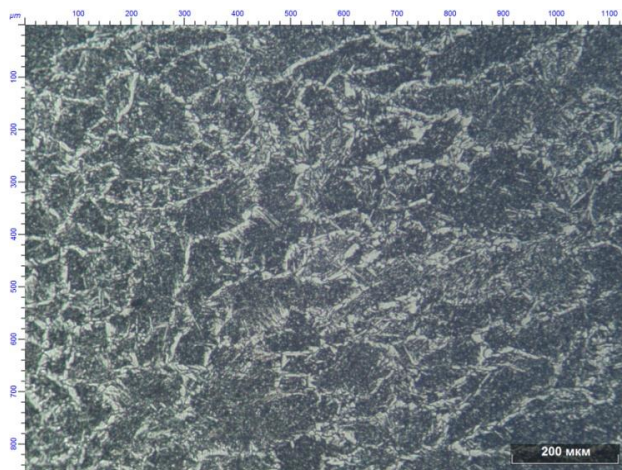


Рис. 5. Структура металла шва, выполненного экспериментальными электродами, содержащими частицы WC, $\times 100$

Fig. 5. Structure of the weld metal made with experimental electrodes containing WC particles, $\times 100$

При импульсном воздействии тока морфология кристаллитов не изменяется, но при этом происходит дробление границ этих кристаллов (периферийного феррита) на фрагменты неправильной формы, которые во многом формируют объем структуры наплавленного металла.

При введении в металл сварочной ванны частиц-инокуляторов последние выступают в качестве искусственных центров кристаллизации и стимулируют процесс образования кристаллов не только от границ оплавленного металла, но и непосредственно в объеме расплава. Тем самым достигается эффект объемной кристаллизации с образованием более равновесной структуры.

Заключение

Таким образом, на основе результатов проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Структура металла, наплавленного проволокой Св-08Г2С на стационарных режимах, характеризуется наличием столбчатых кристаллитов, окруженных оторочкой периферийного феррита с прорастающими из нее вглубь кристаллов игольчатыми образованиями видманштеттовой структуры. Твердость металла составляет 221–238 единиц HV.

2. Металл, наплавленный проволокой Св-08Г2С на импульсных режимах, имеет столбчатую структуру, при этом сетка периферийного феррита раздроблена на фрагменты. Наблюдается скученность образований избыточного и видманштеттового феррита. Твердость

металла составляет 227–234 единиц HV.

3. Сварной шов, полученный экспериментальными электродами, не содержащими инокулирующих компонентов, имеет крупнокристаллическую структуру, типичную для швов низкоуглеродистых сталей. Твердость металла составляет 218–232 единиц HV.

4. Металл шва, полученный электродами, содержащими в своем покрытии нано- и ультра-

дисперсные частицы WC, имеет ячеистую структуру. Кристаллиты глобулярной морфологии окружены сеткой периферийного феррита, образующего непрерывную матрицу. Твердость металла составляет 230–242 единиц HV.

5. Наилучший вариант формирования структуры наплавленного металла достигается путем введения в расплав сварочной ванны инокулирующих нано- и ультрадисперсных компонентов.

Список литературы

1. Назначение и область применения ультрахладостойкого наноструктурированного листового проката / П.П. Полецков, К. Хакимуллин, Д.Г. Набатчиков и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т. 15, № 2. С. 85–88.
2. Анализ мирового уровня разработок в области производства горячекатаного высокопрочного хладостойкого листового проката с пределом текучести ≥ 600 Н/мм² / П.П. Полецков, А.С. Кузнецова, Д.Ю. Алексеев и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т. 18. № 4. С. 32–38.
3. Исследование структуры и свойства сварных соединений арматурного проката класса прочности А500С / М.А. Шекшеев, С.В. Михайлицын, А.Б. Сычков и др. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2019. Т. 62. № 12. С. 925–929.
4. Особенности структурообразования и формирования свойств сварных соединений из арматурных сталей классов прочности А500С и В500С / М.А. Шекшеев, А.Б. Сычков, С.В. Михайлицын и др. // Черные металлы. 2021. №2. С. 28–33.
5. Разработка технологии механизированной сварки в среде защитных газов сталей типа 15Х5М / А.А. Халимов, А.Г. Халимов, А.С. Надришин и др. // Нефтегазовое дело. 2016. Т. 14. № 2. С. 179–187.
6. Структура и твердость наплавленных на низкоуглеродистую сталь износостойких покрытий при низкочастотной модуляции тока / Ю.Н. Сараев, В.П. Безбородов, М.В. Перовская и др. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2020. Т. 63. № 6. С. 469–473.
7. Сараев Ю.Н. Совершенствование технологий сварки и наплавки на основе методов адаптивного импульсного управления энергетическими параметрами режима для производства и ремонта конструкций ответственного назначения в условиях низких климатических температур // Тяжелое машиностроение. 2018. № 7–8. С. 14–22.
8. Воздействие на факторы образования холодных трещин сварного соединения стали 10Г2ФБЮ посредством регулирования погонной энергии / А.Г. Алрухайми, М.А. Иванов, А.К. Тиньгаев и др. // Сварочное производство. 2020. № 2. С. 3–11.
9. Повышение механических характеристик сварных соединений из стали класса прочности К65 / М.В. Шахматов, Д.С. Яковлев, А.Н. Маковецкий и др. // Сварка и диагностика. 2015. № 5. С. 52–55.
10. Шахматов М.В., Яковлев Д.С. Моделирование тепловых процессов при многодуговой сварке // Сварка и диагностика. 2015. № 2. С. 49–53.
11. Исследование влияния рода тока и алгоритма его модуляции на эксплуатационные показатели сварных соединений / Ю.Н. Сараев, А.Г. Лунев, А.С. Киселев и др. // Сварочное производство. 2019. № 3. С. 3–8.
12. Сараев Ю.Н. Анализ направлений совершенствования технологических процессов сварки и наплавки на основе методов управляемого высокоэнергетического воздействия на характеристики тепломассопереноса при импульсно-дуговых технологиях сварки и наплавки // Евразийское Научное Объединение. 2017. Т. 1. № 11 (33). С. 47–50.
13. Исследование влияния ультрадисперсных частиц монокристалла вольфрама на структуру наплавленного металла / М.А. Шекшеев, С.В. Михайлицын, А.Б. Сычков и др. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер.: Металлургия. 2018. Т. 18. № 4. С. 128–136.
14. Разработка сварочных электродов с композитным наномодифицирующим покрытием / М.А. Шекшеев, С.В. Михайлицын, А.Б. Сычков и др. // Заготовительные производства в машиностроении. 2019. Т. 17. № 6. С. 252–254.

References

1. Poletskov P.P., Khakimullin K., Nabatchikov D.G. et al. Purpose and scope of application of ultra-cold-resistant nanostructured steel sheets. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2017, vol. 15, no. 2, pp. 85–88. (In Russ.)

2. Poletskov P.P., Kuznetsova A.S., Alekseev D.Yu. et al. Analysis of world development in the production of hot-rolled high-strength cold-resistant steel sheets with a yield strength of $\geq 600 \text{ N/mm}^2$. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2020, vol. 18, no. 4, pp. 32–38. (In Russ.)
3. Sheksheev M.A., Mikhailitsyn S.V., Sychkov A.B. et al. Study on the structure and properties of welded joints of reinforced rolled products of strength class A500C. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya* [Izvestiya. Ferrous Metallurgy], 2019, vol. 62, no. 12, pp. 925–929. (In Russ.)
4. Sheksheev M.A., Sychkov A.B., Mikhailitsyn S.V. et al. Features of structure formation and formation of properties of welded joints made of reinforcing steels of strength classes A500C and B500C. *Chernye metally* [Ferrous Metals], 2021, no. 2, pp. 28–33. (In Russ.)
5. Khalimov A.A., Khalimov A.G., Nadrshin A.S. et al. Development of the technology of mechanized protective gas shielded welding of steels of the 15Kh5M type. *Neftegazovoe delo* [Oil and Gas Business], 2016, vol. 14, no. 2, pp. 179–187. (In Russ.)
6. Saraev Yu.N., Bezborodov V.P., Perovskaya M.V. et al. The structure and hardness of wear-resistant coatings deposited on low-carbon steel under low-frequency current modulation. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya* [Izvestiya. Ferrous Metallurgy], 2020, vol. 63, no. 6, pp. 469–473. (In Russ.)
7. Saraev Yu.N. Improvement of welding and surfacing technologies based on the methods of adaptive pulse control of the energy parameters of the mode for the production and repair of critical structures at low climatic temperatures. *Tyazheloe mashinostroenie* [Heavy Engineering], 2018, no. 7–8, pp. 14–22. (In Russ.)
8. Alrukhaimi A.G., Ivanov M.A., Tingaev A.K. et al. Influence on factors of formation of cold cracks of a welded joint of 10G2FBYu steel grade by regulating heat input. *Svarochnoe proizvodstvo* [Welding Production], 2020, no. 2, pp. 3–11. (In Russ.)
9. Shakhmatov M.V., Yakovlev D.S., Makovetsky A.N. et al. Improving the mechanical characteristics of welded joints made of steel of strength class K65. *Svarka i diagnostika* [Welding and Diagnostics], 2015, no. 5, pp. 52–55. (In Russ.)
10. Shakhmatov M.V., Yakovlev D.S. Modeling of thermal processes in multi-arc welding. *Svarka i diagnostika* [Welding and Diagnostics], 2015, no. 2, pp. 49–53. (In Russ.)
11. Saraev Yu.N., Lunev A.G., Kiselev A.S. et al. Study on the influence of the type of current and its modulation algorithm on performance of welded joints. *Svarochnoe proizvodstvo* [Welding Production], 2019, no. 3, pp. 3–8. (In Russ.)
12. Saraev Yu.N. Analysis of areas for improving the technological processes of welding and surfacing based on the methods of controlled high-energy influence on the characteristics of heat and mass transfer in pulse-arc welding and surfacing technologies. *Evraziyskoe Nauchnoe Obединenie* [Eurasian Scientific Association], 2017, vol. 1, no. 11, pp. 47–50. (In Russ.)
13. Sheksheev M.A., Mikhailitsyn S.V., Sychkov A.B. et al. Study on the effect of ultrafine particles of tungsten monocarbide on the structure of deposited metal. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Metallurgiya* [South Ural State University Bulletin. Series: Metallurgy], 2018, vol. 18, no. 4, pp. 128–136. (In Russ.)
14. Sheksheev M.A., Mikhailitsyn S.V., Sychkov A.B., et al. Development of welding electrodes with a composite nanomodifying coating. *Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroenii* [Blank Production in Mechanical Engineering], 2019, vol. 17, no. 6, pp. 252–254. (In Russ.)

Поступила 24.02.2021; принята к публикации 15.03.2021; опубликована 25.03.2021
Submitted 24/02/2021; revised 15/03/2021; published 25/03/2021

Шекшеев Максим Александрович – кандидат технических наук, доцент,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: shecsheev@yandex.ru. ORCID 0000-0003-4790-2821

Ширяева Елена Николаевна – аспирант,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: e.shyryaeva@mail.ru. ORCID 0000-0001-5143-3285

Maxim A. Sheksheev – PhD (Eng.), Associate Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia
Email: shecsheev@yandex.ru. ORCID 0000-0003-4790-2821

Elena N. Shiryayeva – PhD student,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia
Email: e.shyryaeva@mail.ru. ORCID 0000-0001-5143-3285

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

УДК 620.184/.186

DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-1-48-59



ВЛИЯНИЕ ИСХОДНОЙ ЛИТОЙ СТРУКТУРЫ НА КАЧЕСТВО ГОРЯЧЕКАТАНОГО ПРОКАТА ДОЭВТЕКТОИДНОЙ СТАЛИ

Хлыбов А.А., Ворожева Е.Л.

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

Аннотация. Началом научного изучения строения литого металла принято считать первые металлографические работы русского металлурга и металловеда, учёного Д.К. Чернова. Дмитрий Константинович Чернов в мельчайших деталях исследовал процесс зарождения и роста кристаллов при затвердевании жидкого металла, дал схему структурных зон стального слитка, развил теорию последовательной кристаллизации, всесторонне изучил дефекты литой стали [1], изложил результаты своих исследований и необходимость изучения внутреннего качества литого металла в историческом сообщении «Исследования, относящиеся до структуры литых болванок», адресованному в адрес императорского Русского технического общества 2 декабря 1878 года. Современная техническая литература по металлургической науке содержит большое количество разрозненных научных исследований в области качества непрерывнолитой стальной заготовки и эволюции литого металла в ходе горячей прокатки. Имеются отечественные, иностранные книги, учебники, а также многочисленные сборники трудов конференций и статьи с исследованиями структурной и химической неоднородности непрерывнолитой углеродистой стали. В данной статье собрана и представлена целостная информация о влиянии металлургической наследственности на структуру и механические свойства доэвтектоидной стали при последующей горячей прокатке. Приведены данные о развитии макроскопических, металлографических, инструментальных методов изучения химической и структурной неоднородности непрерывнолитой стали. Сопоставлены классические и современные методы исследования.

Ключевые слова: макроструктура, сляб, сегрегация, микроструктура, доэвтектоидная сталь, прокат.

© Хлыбов А.А., Ворожева Е.Л., 2021

Для цитирования

Хлыбов А.А., Ворожева Е.Л. Влияние исходной литой структуры на качество горячекатаного проката доэвтектоидной стали // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №1. С. 48–59. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-1-48-59>



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

INFLUENCE OF THE INITIAL CAST STRUCTURE ON THE QUALITY OF HOT ROLLED HYPOEUTECTOID STEEL

Khlybov A.A., Vorozheva E.L.

Alekseev Nizny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The first metallographic studies of D.K. Chernov, the Russian metallurgist, metal scientist, are considered to be the beginning of the scientific study on the structure of cast metal. Dmitry K. Chernov in meticulous detail studied the process of crystal formation and growth within the solidification of liquid metal, gave a diagram of the structural zones of steel ingots, and developed the theory of successive crystallization, comprehensively studied the defects of cast steel [1], and outlined the results of his research and the necessity of studying the internal quality of cast metal in the historical message "Studies related to the structure of cast ingots" addressed to the Imperial Russian Technical Society on December 2, 1878. The modern technical literature on metallurgical science contains a lot of different scientific studies in the field of the quality of continuously cast steel billets and the evolution of cast metal during hot rolling. There are domestic and foreign books and textbooks, as well as numerous collections of conference proceedings and papers containing studies on the structural and chemical heterogeneity of continuously cast carbon steel. This paper presents comprehensive information about the influence of metallurgical heredity on the structure and mechanical properties of hypoeutectoid steel during subsequent hot rolling. The presented data show the development of macroscopic, metallographic, and instrumental methods for studying the chemical and structural heterogeneity of continuously cast steel. Classical and modern research methods are compared.

Keywords: macrostructure, slab, segregation, microstructure, hypoeutectoid steel, rolled products.

For citation

Khlybov A.A., Vorozheva E.L. Influence of the Initial Cast Structure on the Quality of Hot Rolled Hypoeutectoid Steel. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021, vol. 19, no. 1, pp. 48–59. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-1-48-59>

Введение

Создание технологии непрерывной разливки металлов и оборудования для ее реализации явилось одним из наиболее крупных достижений промышленности в XX веке и оказало существенное влияние на развитие металлургии и машиностроения, существенно изменила структуру сталеплавильного и прокатного производства, способствуя развитию средств контроля и автоматизации [2, 3, 49] и активному исследованию микроструктуры непрерывнолитых заготовок.

По мере развития и распространения непрерывной разливки стали разработаны методы изучения в промышленных условиях внутреннего качества литых заготовок, такие как: метод снятия серных отпечатков по Бауману и травление макротемплетов в кислотах. Недостатком метода снятия серных отпечатков по Бауману является чувствительность при пониженном содержании серы. Для сталей с содержанием серы менее 0,006% он не может быть использован для оценки внутреннего строения металла. Поэтому для выявления макроструктуры в сталях с пониженным содержанием серы применяют методы, основанные на использовании для травления различных реактивов [7]. В

прошлом столетии преимущественным способом массового контроля осевой химической неоднородности сляба являлся отраслевой стандарт 14-4-73 со схематическими шкалами и описанием дефектов. ОСТ 14-4-73 отменён в соответствии с программой национальной стандартизации на 2017 год. До настоящего времени выявление макроструктуры в заводских лабораториях выполняют травлением в кислотах по методам, указанным в действующем ГОСТ 10243-75 «Метод испытаний и оценки макроструктуры». Наиболее распространённым реактивом для выявления литой структуры углеродистых сталей является травление темплетов от непрерывнолитых слябов в водном растворе соляной кислоты, разогретом до температур 60–80°C. Интересно заметить, что Д.К. Чернов считал выявление литой структуры травлением в кислотах не основным способом изучения литого металла и писал в своих трудах «Сталелитейное дело»: «Растворение стали в кислотах может предоставить отдалённый, косвенный способ определения кристаллической массы» [1].

Известно, что при кристаллизации непрерывнолитого сляба формируется химическая неоднородность или сегрегация как в результате дендритной ликвации в микрообъемах, так и при зо-

нальной ликвации в макрообъемах. Затвердевание приводит к макроскопическому и микроскопическому разделению химических элементов между исходной жидкостью и растущими твердыми кристаллами, создавая неоднородность в распределении химических элементов, которая наследуется в полностью затвердевших литых изделиях. Ликвационные явления, обусловленные развитием вынужденных и естественных конвективных потоков, усиленными механическим воздействием на оболочку заготовки, обогащают остаточный расплав примесями [7]. Разделение или сегрегация химических элементов на макроскопическом уровне происходит на осевой линии непрерывнолитых заготовок. Зональные сегрегации, сосредоточенные в центре сляба, образуют известную осевую химическую неоднородность сляба, трансформирующуюся при прокатке в ликвационную полосу штрипса [4, 6, 8]. Кристаллизация расплава в ходе разлива, в свою очередь, в определенной мере влияет на общую чистоту, определяет химическую неоднородность, вязкость, сопротивление сероводородному растрескиванию (НКС), центральную пористость (возможное последующее осевое расслоение), качество поверхности проката [9]. Дефекты, возникающие при кристаллизации или неисправимы, или требуют очень больших затрат на их устранение на последующих металлургических переделах [7].

Помимо химической неоднородности после кристаллизации в слябе формируется структурная неоднородность, связанная как с ликвационными процессами, так и с теплофизическими условиями затвердевания, определёнными тепловой работой кристаллизатора и зоной вторичного охлаждения [6].

Цель работы заключается в изучении параметров непрерывнолитой структуры и их влиянии на микроструктуру и свойства горячекатаного проката.

Влияние исходного литого строения на микроструктуру и механические свойства горячекатаного проката

Как правило, считается, что для углеродистых сталей подогрев травильного раствора является обязательной операцией, обеспечивающей надёжное выявление макроструктуры в литых заготовках. В немецком стандарте SEP 1611 (1-е издание, 1-я редакция, октябрь 2018) «Оценка осевой ликвации непрерывнолитых слябов» описан метод травления растворами пероксодисульфата аммония при комнатной температуре.

С целью оценки применимости альтернативного метода травления, исключающего операцию подогрева реактива, была отобрана проба от непрерывнолитого сляба доэвтектоидной низколегированной стали. Проба в сечении подготовлена тонким фрезерованием и протравлена погружением в водный раствор пероксодисульфата аммония при комнатной температуре. После 10-минутной выдержки на контрольном сечении литого металла выявилась макроструктура. Эксперимент показал, что травление при комнатной температуре в водном растворе пероксодисульфата аммония полностью обеспечивает выявление дендритной структуры, не уступающего по качеству «горячему травлению». На **рис. 1** приведена макроструктура непрерывнолитого сляба, выявленная в двух различных реактивах. В сечении различается поверхностная быстроохлаждённая зона из мелких равноосных кристаллов, промежуточная зона столбчатых дендритов и центральная зона равноосных кристаллов. Выявленные внутренние дефекты макроструктуры являются сопоставимыми с оценкой дефектов после «горячего» травления. В осевой зоне макроструктуры присутствует осевая химическая неоднородность и осевая пористость.



а



б

Рис. 1. Макроструктура в поперечном сечении непрерывнолитого сляба: а – травление при температуре 70–80°C в водном растворе соляной кислоты; б – травление при комнатной температуре в водном растворе пероксодисульфата аммония

Fig. 1. Macrostructure in the transverse section of a continuously cast slab: a is etching at 70–80°C in an aqueous solution of hydrochloric acid, б is etching at room temperature in an aqueous solution of ammonium peroxodisulfate

В низкоуглеродистых сталях дендриты, которые образуются в самом начале затвердевания, состоят из δ -феррита, который впоследствии превращается в аустенит, а затем в феррит и перлит [26]. Для исследования микроструктуры сляба доэвтектоидной низколегированной стали изготовлен металлографический шлиф и протравлен в нитале. Ферритно-перлитная смесь в микроструктуре непрерывнолитой заготовки доэвтектоидной стали представляет собой грубоиглочатое строение видманштеттовой ориентировки и крупные глобулярные зёрна (рис. 2).

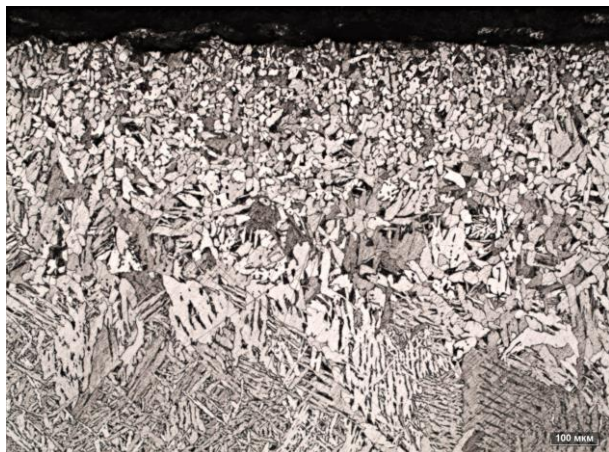


Рис. 2. Микроструктура в сечении у поверхности непрерывнолитого сляба

Fig. 2. Microstructure in a cross section along the surface of a continuously cast slab

В макроструктуре непрерывнолитой заготовки, выявленной травлением в растворах, принято считать, что обогащение или обеднение осевой зоны заготовки ликвирующими примесями является по степени травимости плоскости темплета. В зависимости от условий кристаллизации дефект может иметь вид точек, локальных пятен повышенной или пониженной травимости. При большей травимости происходит потемнение осевой зоны (положительная сегрегация элементов), при меньшей – осевая зона светлее, чем основной металл (отрицательная сегрегация элементов). Результатом оценки макроструктуры является балл внутреннего дефекта, присвоенный в соответствии с описанием и визуальным сравнением со шкалами нормативного документа. Стандартные шкалы не в полной мере отражают сегрегацию элементов в стали, так как её микроструктурное проявление может быть неявным или совсем отсутствовать [13]. К тому же для изучения химической структуры сляба метод визуального сравнения со шкалами не является универсальным и эффективным, отсутствуют

количественные и качественные характеристики химических элементов. Авторы, стремящиеся в своих публикациях изучить химическую и структурную неоднородность литого металла, не ограничиваются визуальным сравнением со шкалами, в своих исследованиях используют коммерческие программные продукты [4, 8, 14, 17, 19, 23] и различные инструментальные методы, к которым преимущественно относится количественный химический анализ [15, 19, 23], количественная металлография для измерения дисперсности литой структуры с применением оптической микроскопии [8], микрорентгено-спектральный метод для измерения содержания элементов в междендритных пространствах и по месту различных структур.

Часто для анализа полученной выборки результатов спектрального анализа по сечению слябов, оценки химической неоднородности и выявления наиболее ликвирующих элементов исследователи [7, 16–18] используют параметр, называемый коэффициентом сегрегации либо степенью зональной химической неоднородности.

С целью получения количественных и качественных параметров химической неоднородности непрерывнолитого сляба доэвтектоидной низколегированной стали выполнено измерение содержания химических элементов удобным методом атомно-эмиссионного спектрального анализа. Химический состав измеряли в $\frac{1}{4}$ толщины со стороны широких граней. В середине толщины химический состав исследовали послойно с шагом 1 мм. Результат рассчитывали как среднее значение по трём-четырёх параллельным замерам в одной плоскости. Всего выполнено не менее 18 измерений основных легирующих и примесных элементов по толщине каждого темплета. Оценку сегрегации выполнили с применением параметра: коэффициент сегрегации, рассчитанный как отношение содержания элемента в слябе к его плавочному содержанию в ковшевой пробе. В слябе со слабо выраженной осевой зоной, оценённой по стандартным шкалам как 0,5 балла, коэффициенты сегрегации основных элементов и примесных элементов – близкие к единице. В слябе с химической неоднородностью в виде сплошной полосы и тёмных точек, оценённой в 3,5 балла, коэффициент сегрегации серы в середине толщины сляба достигает 1,6 (рис. 3). Визуальная оценка химической неоднородности и коэффициент сегрегации химических элементов явились сопоставимыми параметрами.

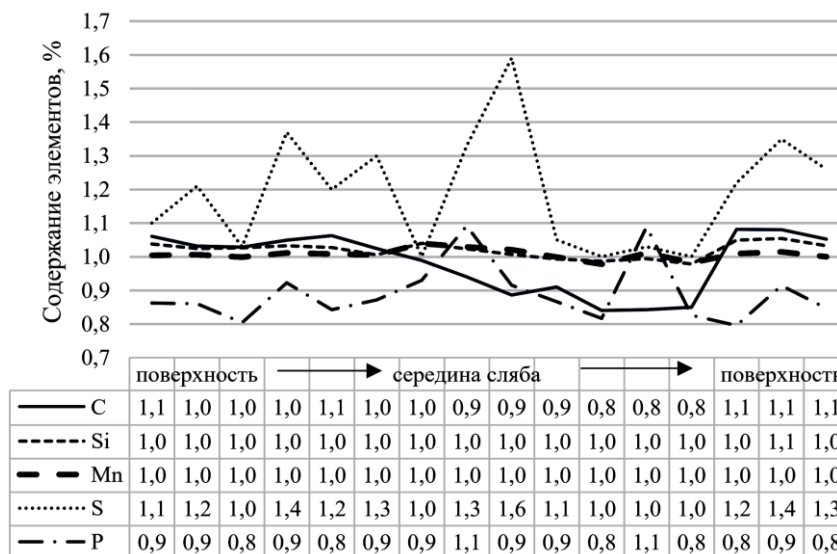


Рис. 3. Коэффициенты сегрегации K_c (отношение содержания элемента в слябе к его плавочному содержанию в ковшевой пробе)

Fig. 3. Segregation coefficients K_c (the ratio of the element content in the slab to its melting content in the ladle sample)

Согласно [10] при недостаточной проработке структуры в процессе горячей пластической деформации при последующей прокатке происходит наследование структурой листа осевой рыхлости и химической неоднородности литого металла, что может служить причиной снижения работы удара и относительного сужения в направлении толщины листа.

С целью наблюдения наследования осевой зоны макроструктурой проката от непрерывно-литого сляба низкоуглеродистой стали, подвергнутого горячей обработкой давлением с относительной степенью обжатия ~90%, сечение проката подготовлено холодной механической обработкой и протравлено в водном растворе соляной кислоты при температуре 70°C. После травления в макроструктуре проката выявились осевые линии повышенной травимости, характеризующие остаточную осевую ликвационную неоднородность (рис. 4).



Рис. 4. Вид наследуемой осевой зоны в прокатанном металле

Fig. 4. The inherited form of the axial zone in rolled metal

От проката изготовлены образцы и выполнено испытание на ударный изгиб падающим грузом при комнатной температуре по ГОСТ 30456-97. Изучение излома испытанного образца показало

присутствие расслоения в середине толщины проката по остаточной ликвационной неоднородности. На рис. 5 показан излом с расслоением в середине.

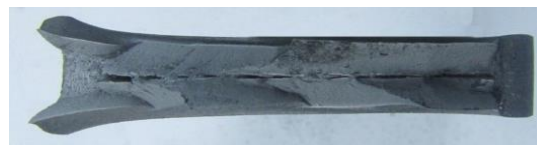


Рис. 5. Излом образца, испытанного на ударный изгиб падающим грузом

Fig. 5. Fracture of a DWTT sample

В литературе описан способ снижения осевой неоднородности в литой структуре в процессе нагрева перед горячей прокаткой. Автор работы [30] с целью формирования однородной мелкозернистой структуры непрерывнолитой заготовки и снижения его центральной сегрегационной неоднородности использует перекристаллизованный отжиг литой заготовки. Режим перекристаллизационного отжига сляба низколегированной стали заключался в нагреве до 930°C и выдержке 3,5 часа, охлаждение с печью до температуры 500°C. Однако полного устранения негативных факторов достичь не удалось, поскольку воздействие оказывалось на уже сформировавшуюся литую структуру.

Металлургическая наследственность оказывает влияние на структурообразование на протяжении всего технологического цикла не только в середине толщины проката. При анализе

термокинетических диаграмм распада аустенита в конструкционных сталях согласно [20] необходимо учитывать влияние исходной литой структуры заготовки на конечную структуру после термической обработки, даже в небольших по размерам образцах стали диаметром 4–6 мм, в которых скорость охлаждения в разных микрообъемах должна различаться незначительно, структура продуктов распада неоднородная, причинами этого различия могут быть химическая неоднородность в объеме «бывших» первичных дендритов. Микроликвация является следствием неравновесной кристаллизации сплавов в реальных условиях формирования непрерывнолитой заготовки и характеризует химическую неоднородность по сечению кристалла, зерна. Состав затвердевшего дендрита неоднородный, сердцевина является самой чистой, так как она затвердевает первая. Затвердевание приводит к возрастающему обогащению междендритного слоя. Концентрация растворённого вещества в дендрите увеличивается от сердцевин к его периферии и традиционно называется дендритной ликвацией либо микроликвацией [5]. Марганец, который, присутствует в качестве легирующего элемента, является склонным к ликвации и играет важную роль в химической сегрегации. В работе [13] использовали метод микрорентгеноспектрального анализа образцов, вырезанных из сляба, определяли содержание основных легирующих и примесных элементов в междендритном пространстве и в осях дендритов. Первичную сегрегацию элементов рассчитывали как отношение концентрации элемента в междендритном пространстве и в первичной оси дендрита.

С целью исследования распределения содержания марганца в осях и межосных промежутках дендритов в литой структуре низкоуглеродистой низколегированной стали был отобран образец от промышленного сляба доэвтектоидной стали с содержанием Mn 1,29%. Содержание Mn в осях дендритов и междендритном пространстве исследовали с помощью микрорентгеноспектрального анализа на электронном микроскопе. На **рис. 6** показана карта распределения содержания марганца. Наибольшее значение содержания марганца 3,0% наблюдается в межосных промежутках. В осях дендритов содержание Mn уменьшается до значения 0,9%.

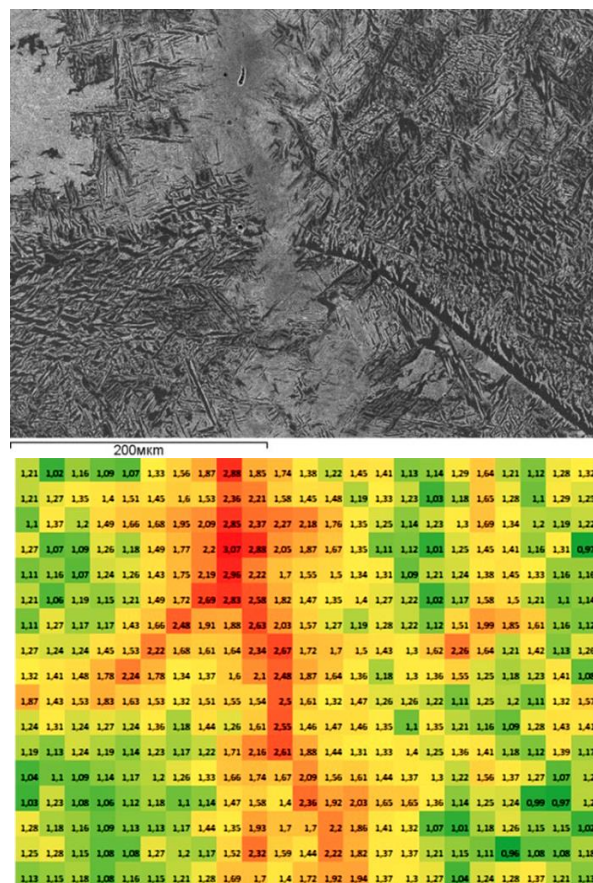


Рис. 6. Распределение содержания Mn в осях и межосных промежутках дендритов
Fig. 6. Distribution of Mn content in the axes and inter-axial spaces of dendrites

Как правило, наследуемая ликвация в горячекатаном прокате проявляется в формировании структурной неоднородности с областями повышенной твердости. Марганец принадлежит к легирующим элементам, расширяющим γ -область, в низкоуглеродистых сталях с содержанием марганца более 1,5% при охлаждении с температуры конца прокатки фазовые превращения смещаются в промежуточную область либо в мартенситную [25]. Особенности диффузионных процессов в марганцевых сталях таковы, что при определённых составах в структуре стали могут одновременно присутствовать перлит, структуры промежуточной области, мартенсит и аустенит [25]. Снижение температуры Ar_3 в областях с высоким содержанием Mn по сравнению с областями с низким содержанием Mn приводит к возникновению сегрегации во время фазового превращения при охлаждении: феррит сначала зарождается в участках с высокой температурой Ar_3 , углерод выталкивается из почти чистого ферритного железа в аустенит, тем самым обогащая его [27].

С целью исследования совместного влияния микросегрегаций и температурно-деформационного воздействия на формирование конечной структуры изготовлены и исследованы металлографические шлифы по толщине горячекатаного проката. На **рис. 7** показана в продольном сечении проката структурная неоднородность, воспроизведённая по наследственному признаку. В структуре металла с основным содержанием Mn 1,3% присутствуют феррит, перлит и локальные участки бейнита, образованные в зонах, обогащённых марганцем до 2,88%. Выполнено измерение микротвёрдости характерных структурных составляющих. Колебания микротвёрдости по толщине проката составляют от 250 HV0,1 до 512 HV0,1.

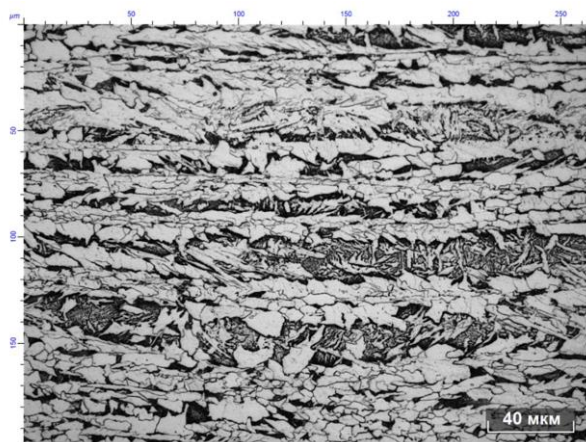


Рис. 7. Вид микроструктуры по толщине горячекатаного проката с бейнитными участками, обогащёнными марганцем
Fig. 7. Type of microstructure along thickness of hot rolled products with bainitic areas, enriched with manganese

Исследования влияния структурного состояния литой заготовки на свойства горячекатаного листа низколегированной стали [30] показывают, что структурная неоднородность проката, обусловленная наследованием несовершенств литой структуры, приводит к слоистому характеру разрушения и неблагоприятно сказывается на механических свойствах. Наличие зон ликвационной неоднородности, имеющих повышенную твёрдость, низкие пластичность и сопротивление разрыву, послужило причиной возникновения расслоений при испытаниях падающим грузом и испытаниях по определению критического раскрытия в вершине трещины. Раскрытие слоёв в изломе образца происходит за счёт проскока хрупкой трещины в ликвационной прослойке [30]. Вид образцов со слоистым изломом, испы-

танных падающим грузом на ударный изгиб, приведён на **рис. 8**.



Рис. 8. Слоистый излом в образцах стали, испытанной на ударный изгиб падающим грузом
Fig. 8. Laminated fracture in DWTT samples

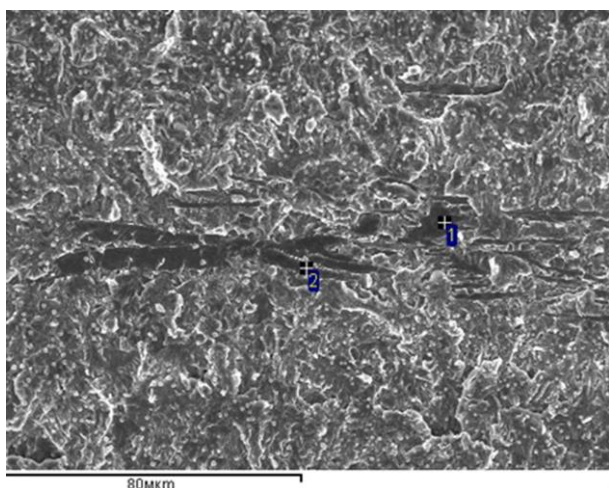
В некоторых исследованиях [11] отмечается, что ликвация проявляется не только в формировании структурной неоднородности повышенной твердости, но и в формировании микротрещин в осевой зоне. Исследования коррозионностойких сталей [12] показывают, что основной проблемой при испытании на стойкость к водородному растрескиванию (НРС) является сегрегационная неоднородность и образование коррозионных трещин в области осевой ликвации. С целью исследования влияния осевой химической неоднородности в прокатанной стали на водородное растрескивание (НРС) выполнили испытание в соответствии с требованиями стандарта NACE TM0284-2011. Образцы от горячекатаного проката выдерживали в растворе (5% NaCl + + 0,5% CH₃COOH). Водородные трещины в испытанных образцах присутствовали в середине толщины проката по полосам химической неоднородности (**рис. 9**).



Рис. 9. Вид водородной трещины в осевой зоне по полосам химической неоднородности
Fig. 9. The hydrogen crack in the axial zone along the bands of chemical inhomogeneity

Известно, что марганец обладает повышенным сродством к сере, что приводит к образова-

нию сульфидов MnS в ликвационных полосах, провоцирующих снижение ударной вязкости на образцах, вырезанных в поперечном направлении относительно прокатки. В источнике [24] авторы пишут, что сульфидные включения MnS в деформированной структуре являются реперными точками, позволяющими однозначно идентифицировать междендритное пространство, образованное при «захлопывании» дендритной ячейки в конце затвердевания. Исследования с применением микрорентгеноспектрального анализа образцов НИС от горячекатаного проката низкоуглеродистой стали подтвердили присутствие сульфидов марганца на поверхности водородной трещины. На **рис. 10** приведены результаты исследования неметаллических включений на поверхности коррозионной трещины, обнаруженной в осевой зоне по полосам химической неоднородности.



Спектр	S	Cr	Mn	Fe	Cu	Nb
1	14.11	0.99	19.10	65.80		
2	15.30	0.77	22.43	49.89	0.29	11.33

Рис. 10. Результаты микрорентгеноспектрального анализа включений на поверхности водородной трещины в осевой зоне по полосам химической неоднородности

Fig. 10. X-ray microanalysis of inclusions on the surface of a hydrogen crack in the axial zone by bands of chemical inhomogeneity

Одним из основных последствий микросегрегации примесей и легирующих элементов в стали является образование различных полосчатых структур при прокатке стали. Неоднородность, вызванная дендритной ликвацией, наследуется в полосчатой структуре листового проката и оказывает негативное влияние на работу разрушения прокатанной стали. В зависимости от скорости охлаждения проката чаще всего

встречаются типы структурных полос: ф/б, ф/м, п/б, п/м, б/м, где «ф» – феррит, «п» – перлит, «б» и «м» – соответственно относятся к бейниту и мартенситу. Большой объем исследований по полосчатым сталям в настоящее время дает неопровержимые доказательства того, что полосчатость в микроструктуре горячекатаного проката является результатом микросегрегации одного или нескольких легирующих элементов в стали.

В ходе деформации дендритные области с низкой концентрацией легирующих элементов, так же как и междендритные области с высокой концентрацией легирующих элементов, растягиваются в строчки параллельно направлению течения деформации. Исследования влияния полосчатости на механические свойства показали значительную анизотропию ударных свойств. Полосчатые стали неизменно содержат некоторую степень удлиненных включений, обычно сульфидов, в наследуемых прокатом из междендритных пространств, что может способствовать снижению поперечных ударных свойств [21, 23]. Также волокнистая структура может способствовать ухудшению прочности и вязкости в поперечном направлении плоскости проката [25]. На **рис. 11** продемонстрирована ферритно-перлитная полосчатость в структуре.

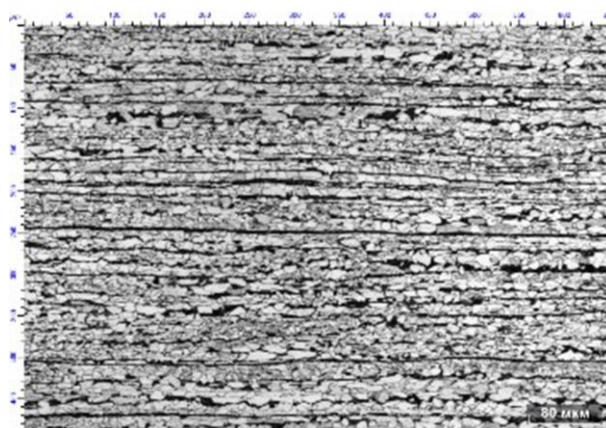


Рис. 11. Полосчатость в ферритно-перлитной стали
Fig. 11. Banding in ferrite-pearlite steel

В работе [28] исследованиями установлено, что наиболее приемлемым вариантом ликвидации нежелательной структурной неоднородности при металлопеределе являются технологии тепловой обработки стали (горячая пластическая деформация и предварительная термическая обработка) путём рационального сочетания температурно-временных и скоростных параметров процесса на стадии аустенизации, этапе охлаждения до Ac1 – (20–40)°C и стадии диффузионного γ - α превращения переохлаждённого аустенита. Для исключения

негативного влияния центральной пористости и ликвационных полосок на показатели физико-механических свойств стали автор [28] рекомендует выполнять горячую пластическую деформацию сплава со степенью более 87,5% (коэффициент вытяжки при прокатке от 8 крат и более). В работе [29] устранение полосчатости в низкоуглеродистых сталях достигнуто в случаях охлаждения стали от температуры аустенизации до температуры минимальной устойчивости аустенита со скоростью более 23°C/мин.

Заключение

Обзор технической литературы и экспериментальные данные позволяют сделать заключение о значительном влиянии параметров макро- и микростроения литой стали на формирование микроструктуры и свойств при горячей прокатке стали. На примере исследований литой доэвтектоидной стали наблюдается сопоставимость коэффициентов сегрегации химических элементов с различной степенью выраженности осевой хи-

мической неоднородности в макроструктуре, выявленной травлением. С увеличением балла химической неоднородности наблюдается увеличение коэффициента сегрегации примесного элемента S. Изучено распределение содержания марганца в осях и межосных промежутках дендритов. Содержание марганца значительно увеличивается в межосных промежутках. При изучении макроструктуры горячекатаного проката выявлены осевые линии повышенной травимости, характеризующие остаточную осевую ликвационную неоднородность. На примере микроструктуры горячекатаного проката доэвтектоидной стали установлено присутствие локальных структур повышенной твёрдости по местам микросегрегаций и образование расслоений в ликвационных прослойках в образцах при испытаниях на ударный изгиб. Испытания на водородное растрескивание горячекатаного проката показали, что наследуемая в прокате осевая химическая неоднородность может являться одной из причин появления коррозионных трещин.

Список литературы

1. Чернов Д.К. Избранные труды по металлургии и материаловедению / сост. канд. техн. наук А.С. Федоров; под ред. акад. В.Д. Садовского. М.: Наука, 1983. 447 с.
2. Фейлер С.В., Емельянова Е.Е. Непрерывная разливка стали: от идеи к промышленной реализации // История науки и техники и университетское образование: сб. материалов науч.-практ. конф. аспирантов, магистрантов и студентов УрФУ и МИСиС, 2010. С. 44–49. ISBN 978-5-87623-381-3
3. Емельянов К.И. Системный анализ неравновесной кристаллизации углеродистых и низколегированных сталей для прогнозирования их структурной и химической микронеоднородности: дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2014. 178 с.
4. George Krauss. Solidification, Segregation, and Banding in Carbon and Alloy Steels. The 2003 Howe Memorial Lecture Published with permission of the Iron & Steel Society. Metallurgical and materials transactions. Vol. 34B, December 2003, pp.781–792.
5. A. Ghosh. Segregation in cast products. Department of Materials and Metallurgical Engineering. Sadhana, Indian Institute of Technology, Kanpur 208 016, India. Vol. 26, Parts 1 & 2, February–April 2001, pp. 5–24. e-mail: ahin@iitk.ac.in
6. Завалищин А.Н., Кожевников Е.В. Влияние технологии непрерывной разливки на структуру низколегированной стали на различных этапах производства // Металлург. 2017. Вып. 12. С. 13–18.
7. Центральная сегрегационная неоднородность в непрерывнолитых заготовках и толстолистовом прокате / А.П. Белый, О.Б. Исаев, Ю.И. Матросов, А.О. Носоченко. М.: Металлургиздат, 2005. 136 с.
8. Казаков А.А., Пахомова О.В., Казакова Е.И. Исследование литой структуры промышленного сляба ферритно-перлитной стали // Черные металлы. 2012. Вып. 11. С. 9–14
9. Эфрон Л.И. Металловедение в «большой» металлургии. Трубные стали. М.: Металлургиздат, 2012. 696 с.
10. Структурная неоднородность и методы её снижения для повышения качества конструкционных сталей / Малахов Н.В., Мотовилина Г.Д., Хлусова Е.И., Казаков А.А. // Вопросы материаловедения. 2009. Вып. 3. С. 52–64.
11. Исследование дефектов горячекатаного листа из трубной стали и причин их образования / Шабурова Н.А., Киштыкова М.С., Гольдштейн В.Я., Рушиц С.В., Пластинин Б.Г. // Вестник ЮУрГУ. Сер. Металлургия. 2018. Т. 18. № 4. С. 82–86. DOI: 10.14529/met180409
12. Развитие технологий производства стали, проката и труб на Выксунской производственной площадке: сб. тр. / под общ. ред. А.М. Барыкова. М.: Металлургиздат, 2016. 480 с.
13. Методика оценки ликвационной полосы листового проката / Казаков А.А., Чигинцев Л.С., Казакова Е.И., Рябошук С.В., Марков С.И. // Чёрные металлы. 2009. Вып. 12. С.17–22.
14. Завалищин А.Н., Чикишев Д.Н., Кожевников Е.В. Методика оценки макроструктуры непрерывнолитых слябов трубных сталей категории прочности К60 и К65 // Сталь. 2020. Вып. 1. С. 8–11.

15. Мошкун В.В., Столяров А.М., Казаков А.С. Снижение осевой химической неоднородности трубной стали в результате мягкого обжата непрерывнолитого сляба // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2012. Вып. 2. С. 24–25.
16. Химическая неоднородность непрерывнолитого сляба из трубной особонизкосернистой стали / Крылова Е.А., Столяров А.М., Мошкун В.В., Потапова М.В. // Теория и технология металлургического производства. 2017. №1. С. 20–22.
17. Разгулин И.А., Чикишев Д.Н., Завалишин А.Н. Исследование трансформации химической неоднородности (ликвации) в процессе толстолистовой прокатки микролегированных трубных сталей // Моделирование и развитие процессов ОМД. 2017. №23. С. 44–49.
18. Дендритная ликвация в сплавах железа в зависимости от массы добавочных элементов и их физических свойств / Кузьмин Ю.Д., Секачев А.О., Качиков А.С., Терзи В.В. // Известия высших учебных заведений. Чёрная металлургия. 2014. Т. 57. № 9. С. 52–55.
19. Столяров А.М., Мошкун В.В., Потапова М.В. Химическая неоднородность непрерывнолитых слябов разной толщины из трубной стали // Бюл. научно-технической и экономической информации «Чёрная металлургия». 2019. Т. 75. №10. 2019. С.1140–1145. DOI: 10.32339/0135-5910-2019-10
20. Анастасиади Г.П., Кондратьев С.Ю., Сильников М.В. Роль термокинетических диаграмм распада переохлаждённого аустенита при разработке конструкционных сталей // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2016. №2(243). С. 99–113. DOI: 10.5862/JEST.243.11
21. John D. Verhoeven. A Review of Microsegregation Induced Banding Phenomena in Steels (Submitted 11 November 1999; in revised form 22 February 2000) / Journal of Materials Engineering and Performance Vol. 9(3). June 2000, pp. 286–296.
22. Кудря А.В. Совместное влияние разномасштабных структур на колебание качества металлопродукции // Металловедение и термическая обработка металлов. 2005. №5. С. 18–23.
23. Разгулин И.А., Чикишев Д.Н. Моделирование процесса прокатки сляба с осевой химической неоднородностью // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2017. Т. 1. С. 68–71.
24. Казаков А.А., Пахомова О.В., Казакова Е.И. Исследование эволюции литой структуры при пластической обработке ферритно-перлитной стали // Чёрные металлы. 2013. №9. С. 15–20.
25. Гудремон Э. Специальные стали: пер. с нем. Изд. 2-е, сокращ. и перераб. /под ред. А.С. Займовского. М.: Металлургия, 1966. Т. 1. 737 с.
26. Флемингс М. Процессы затвердевания / пер. с англ. В.Н. Вигдоровича, В.Г. Глебовского, П.П. Поздеева, Б.М. Рубинчика, Е.З. Спектор; под ред. д-ра техн. наук А.А. Жукова, д-ра техн. наук В.В. Рабиновича. М.: Мир, 1977. 413 с.
27. George Krauss. Solidification, Segregation, and Banding in Carbon and Alloy Steels. Metallurgical and Materials Transactions B, volume 34B, December 2003, pp.781–792.
28. Швейва Т.В. Повышение потребительских свойств стальных изделий нейтрализацией структурной наследственности при технологическом металлопеределе в машиностроении: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Набережные Челны, 2012. 23 с.
29. Астащенко В.И. Исследование наследственного влияния металлургических факторов на процессы структурообразования сталей при термической обработке тяжело нагруженных деталей автомобиля: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Ижевск, 2007. 39 с.
30. Цветков Д.С. Повышение стабильности свойств и качества продукции стана 5000 ОАО «Северсталь» за счёт улучшения структуры толстолистового штрипса из высокопрочных низколегированных сталей: автореф. дис... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2012. 22 с.

References

1. Chernov D.K. *Izbrannye trudy po metallurgii i metallovedeniyu* [Selected studies on metallurgy and metal science]. Originated by Federov A.S., PhD (Eng.); edited by Sadovsky V.D., academician. Moscow: Nauka, 1983, 447 p. (In Russ.)
2. Feiler S.V., Emelyanova E.E. Continuous casting of steel: from idea to industrial production. *Istoriya nauki i tekhniki i universitetskoe obrazovanie: sbornik materialov nauchno-prakticheskoy konferentsii aspirantov, magistrantov i studentov UrFU i MISIS* [History of science and engineering and university education: proceedings of the scientific and practical conference of PhD students, master's students and students of UrFU and MISIS], 2010, pp. 44–49. ISBN 978-5-87623-381-3 (In Russ.)
3. Emelyanov K.I. *Sistemnyi analiz neravnovesnoy kristallizatsii uglerodistykh i nizkolegirovannykh stalei dlya prognozirovaniya ikh strukturnoy i khimicheskoy mikroneodnorodnosti: dis.* [A system analysis of non-equilibrium crystallization of carbon and low-alloyed steels to forecast their structural and chemical microinhomogeneity: PhD thesis]. Saint Petersburg, 2014. 178 p.
4. George Krauss. Solidification, segregation, and banding in carbon and alloy steels. The 2003 Howe Memorial Lecture Published with permission of the Iron & Steel Society. Metallurgical and materials transactions. VOLUME 34B, DECEMBER 2003, pp.781–792

5. Ghosh A. Segregation in cast products. Department of Materials and Metallurgical Engineering. Sadhana, Indian Institute of Technology, Kanpur 208 016, India. Vol. 26, Parts 1 & 2, February–April 2001, pp. 5–24. e-mail: ahin@iitk.ac.in
6. Zavalishchin A.N., Kozhevnikov E.V. Effect of a continuous casting technology on the structure of low-alloyed steel at different production stages. *Metallurg* [Metallurgist], 2017, no. 12, pp.13–18. (In Russ.)
7. Belyi A.P., Isaev O.B., Matrosov Yu.I., Nosochenko A.O. *Tsentralnaya segregatsionnaya neodnorodnost v nepre-ryvnykh zagotovkakh i tololistovom prokate* [Central segregation inhomogeneity in concast billets and heavy plates]. Moscow: Metallurgizdat, 2005, 136 p. (In Russ.)
8. Kazakov A.A., Pakhomova O.V., Kazakova E.I. Study on a cast structure of an industrial slab from ferrite-pearlite steel. *Chernye metally* [Ferrous Metals], 2012, no. 11, pp. 9–14. (In Russ.)
9. Efron L.I. Metal science in “large” metallurgy. Tube and pipe steels. Moscow: Metallurgizdat, 2012, 696 p. (In Russ.)
10. Malakhov N.V., Motovilina G.D., Khlusova E.I., Kazakov A.A. Structural inhomogeneity and methods of its reduction to improve the quality of structural steels. *Voprosy materialovedeniya* [Materials Science Issues], 2009, no. 3, pp. 52–64. (In Russ.)
11. Shaburova N.A., Kishtykova M.S., Goldshtein V.Ya., Rushchits S.V., Plastinin B.G. Study on defects of hot rolled plates from pipe steels and reasons for their formation. *Vestnik YuUrGU. Ser. Metallurgiya* [Bulletin of SUSU. Metallurgy Series], 2018, vol. 18, no. 4, pp. 82–86. doi: 10.14529/met180409
12. Barykov A.M. (ed.) Development of steelmaking technologies, manufacturing processes for rolled products and pipes on the Vyksa industrial site. Proceedings. Moscow: Metallurgizdat, 2016, 480 p. (In Russ.)
13. Kazakov A.A., Chigintsev L.S., Kazakova E.I., Ryaboshuk S.V., Markov S.I. A procedure used to evaluate segregation streaks on flat products. *Chernye metally* [Ferrous Metals], 2009, no. 12, pp. 17–22. (In Russ.)
14. Zavalishchin A.N., Chikishev D.N., Kozhevnikov E.V. Methods of evaluation of the concast steel slab macrostructure of pipe steel grades in the strength category K60 and K65. *Stal* [Steel], 2020, no. 1, pp. 8–11. (In Russ.)
15. Moshkunov V.V., Stolyarov A.M., Kazakov A.S. Reduction of axial chemical inhomogeneity of pipe steel as a result of soft reduction of concast slabs. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2012, no. 2, pp. 24–25. (In Russ.)
16. Krylova E.A., Stolyarov A.M., Moshkunov V.V., Potapova M.V. Chemical inhomogeneity of concast slabs from pipe ultra-low sulfur steels. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva* [Theory and Technology of Metallurgical Production], 2017, no. 1, pp. 20–22. (In Russ.)
17. Razgulin I.A., Chikishev D.N., Zavalishchin A.N. Study on the transformation of chemical inhomogeneity (liquation) during heavy plate rolling of micro-alloyed pipe steels. *Modelirovanie i razvitie protsessov OMD* [Simulation and development of metal forming processes], 2017, no. 23, pp. 44–49. (In Russ.)
18. Kuzmin Yu.D., Sekachev A.O., Kachikov A.S., Terzi V.V. Dendritic liquation in iron alloys as a function of the mass and physical properties of the secondary elements. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Chernaya metallurgiya* [Izvestiya. Ferrous Metallurgy], 2014, vol. 57, no. 9, pp. 52–55. (In Russ.)
19. Stolyarov A.M., Moshkunov V.V., Potapova M.V. Chemical inhomogeneity of concast slabs of various thickness from pipe steels. *Chernaya metallurgiya. Byulleten nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii* [Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economical Information], 2019, vol. 75, no. 10, 2019, pp. 1140–1145. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2019-10-1140-1144>
20. Anastasiadi G.P., Kondratiev S.Yu., Silnikov M.V. Role of CCT diagrams of the decay of supercooled austenite, when developing structural steels. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta* [St. Petersburg State Polytechnic University Journal. Science and Engineering], 2016, no. 2(243), pp. 99–113. DOI: 10.5862/JEST.243.11
21. John D. Verhoeven. A review of microsegregation induced banding phenomena in steels. *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 9(3), June 2000, pp. 286–296.
22. Kudrya A.V. Joint effect of structures of various scales on variations in the quality of steel products. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metal Science and Heat Treatment of Metals], 2005, no. 5, pp. 18–23. (In Russ.)
23. Razgulin I.A., Chikishev D.N. Simulation of a rolling process of slabs with axial chemical inhomogeneity. *Aktualnye problemy sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya* [Current Issues of Modern Science, Engineering and Education], 2017, vol. 1, pp. 68–71. (In Russ.)
24. Kazakov A.A., Pakhomova O.V., Kazakova E.I. Study on the evolution of a cast structure during plastic working of ferrite-pearlite steel. *Chernye metally* [Ferrous Metals], 2013, no. 9, pp. 15–20. (In Russ.)
25. Gudremont E. *Spetsialnye stali* [Special steels]. Translated from German, 2nd edition, abridged and revised; edited by Zaimovsky A.S. Moscow: Metallurgy, 1966, vol. 1, 737 p. (In Russ.)
26. Flemmings M. *Protsessy zatverdevaniya* [Hardening processes]. Translated from English by Vigdorovich V.N., Glebovsky V.G., Pozdeev P.P., Rubinchik B.M., Spektor E.Z.; edited by Zhukov A.A., DrSc (Eng.), Rabinovich V.V., DrSc (Eng.). Moscow: Mir, 1977, 413 p. (In Russ.)
27. George Krauss. Solidification, segregation, and banding in carbon and alloy Steels. *Metallurgical and Materials Transactions B*, volume 34B, December 2003, pp. 781–792.
28. Shveeva T.V. *Povyshenie potrebitelskikh svoystv stalnykh izdelii neitralizatsiei strukturnoy nasledstvennosti pri tekhnologicheskoy metalloperedele v mashinostroenii: avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk* [Increasing consumer properties of steel parts by neutralizing structural heredity on a process stage in mechanical engineering: extended abstract of the PhD (Eng.) thesis]. Naberezhnye Chelny, 2012, 23 p.
29. Astashchenko V.I. *Issledovanie nasledstvennogo vliyaniya metallurgicheskikh faktorov na protsessy strukturoobrazovaniya staley pri termicheskoy obrabotke tyazhelonagruzhennykh detalei avtomobilya: avtoreferat dissertatsii na*

soiskanie uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [Study on the inherited effect of metallurgical factors on forming structures of steels during heat treatment of heavy duty automobile parts: extended abstract of the PhD (Eng.) thesis]. Izhevsk, 2007, 39 p.

30. Tsvetkov D.S. *Povyshenie stabilnosti svoistv i kachestva produktsii stana 5000 OAO «Severstal» za schet uluchsheniya struktury tololistovogo shtripsa iz vysokoprochnykh nizkolegirovannykh staley: avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk* [Increasing stability of properties and quality of products of mill 5000 at OJSC Severstal by improving the structure of skelps from high-strength low-alloyed steels: extended abstract of the PhD (Eng.) thesis]. Saint Petersburg, 2012, 22 p.

Поступила 03.02.2021; принята к публикации 19.02.2021; опубликована 25.03.2021
Submitted 03/02/2021; revised 19/02/2021; published 25/03/2021

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

Ворожева Евгения Львовна – аспирант,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.
Email: vorozheva_el@vsw.ru. ORCID 0000-0003-1728-7776

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

Evgeniya L. Vorozheva – PhD student,
Alekseev Nizny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia
Email: vorozheva_el@vsw.ru. ORCID 0000-0003-1728-7776

СТАНДАРТИЗАЦИЯ, СЕРТИФИКАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ

STANDARDIZATION, CERTIFICATION AND QUALITY MANAGEMENT

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

УДК 658.516.1:621.882.2

DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-1-60-69



МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТЕПЕНИ ГАРМОНИЗАЦИИ СТАНДАРТОВ РАЗЛИЧНЫХ КАТЕГОРИЙ

Полякова М.А.¹, Дрягун Э.П.², Соколов А.А.², Харитонов В.А.¹, Петров И.М.¹

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

² Магнитогорский метизно-калибровочный завод «ММК-МЕТИЗ», Магнитогорск, Россия

Аннотация. Постановка задачи: проведен анализ существующих проблем стандартизации в метизной отрасли. Отмечается, что одним из путей повышения конкурентоспособности металлоизделий на внутреннем и внешнем рынках является гармонизация требований российских стандартов с зарубежными нормами. В настоящее время действует большое количество стандартов на винты самонарезающие различных конструктивных особенностей. Также российские производители ориентируются на требования зарубежных норм. Актуальной является задача определения степени соответствия требований российских стандартов к показателям качества винтов самонарезающих соответствующим требованиям, регламентируемым в зарубежных нормах. **Используемые методы:** с использованием основных принципов квалиметрии разработана методика определения степени гармонизации стандартов различных категорий. При разработке методики использованы методы сравнения, систематизации и анализа действующей информационной базы стандартизации, приемы кодирования информации. Полученные результаты хорошо согласуются и не противоречат имеющимся данным в других источниках по рассматриваемой тематике теоретического исследования. **Новизна:** разработана новая методика, позволяющая получить численную оценку степени гармонизации российских и зарубежных стандартов на винты самонарезающие. **Результат:** на примере действующих стандартов на винты самонарезающие показана возможность применения методики количественной оценки степени гармонизации требований российских и зарубежных стандартов на винты самонарезающие. **Практическая значимость:** комплексный анализ действующих российских и зарубежных стандартов на винты самонарезающие позволяет определить направления повышения степени согласованности содержащихся в них требований. Это является основой для разработки и внедрения новых технических и технологических решений в действующее производство, что позволит повысить конкурентоспособность данного вида метизной продукции на внутреннем и внешнем рынках.

Ключевые слова: стандартизация, стандарт, гармонизация, квалиметрия, методика, кодирование, винты самонарезающие.

© Полякова М.А., Дрягун Э.П., Соколов А.А., Харитонов В.А., Петров И.М., 2021

Для цитирования

Методика определения степени гармонизации стандартов различных категорий / Полякова М.А., Дрягун Э.П., Соколов А.А., Харитонов В.А., Петров И.М. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №1. С. 60–68. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-1-60-68>



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

METHOD TO ESTIMATE THE DEGREE OF HARMONIZATION BETWEEN STANDARDS OF DIFFERENT CATEGORIES

Polyakova M.A.¹, Dryagun E.P.², Sokolov A.A.², Kharitonov V.A.¹, Petrov I.M.¹

¹ Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

² Magnitogorsk Hardware and Sizing Plant MMK-METIZ, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance): The authors analyzed the existing problems of standardization in the hardware industry. It is noted that one of the ways to increase the competitiveness of metalware in the domestic and foreign markets is to harmonize the requirements of Russian standards with foreign norms. Now, there are many standards on tapping screws of different types. At the same time, manufacturers in the Russian Federation take into consideration the requirements of foreign standards. **Objectives:** It is currently relevant to determine the degree of compliance of Russian standards with quality parameters of tapping screws governed by foreign norms. **Methods Applied:** A method for determining the degree of harmonization of standards of different categories was developed using main principles of qualimetry. When developing the method, the authors used methods of comparison, systematization and analysis of the existing information base of standardization, and information coding techniques. The obtained results match well and do not contradict to the existing data in other information resources about the topic of the theoretical study. **Originality:** A new method has been developed which makes it possible to get the quantitative information about the degree of harmonization between Russian and foreign standards on tapping screws. **Findings:** Using the existing standards on tapping screws as an example, the authors showed a potential application of this method. **Practical Relevance:** A comprehensive analysis of the applicable Russian and foreign standards on tapping screws makes it possible to determine the ways to increase the degree of matching the relevant requirements. It is the basis used to create and implement new technical and technological solutions in the existing production, which will improve the competitiveness of such type of metalware both in the domestic and foreign markets.

Keywords: standardization, standard, harmonization, qualimetry, method, coding, tapping screws.

For citation

Polyakova M.A., Dryagun E.P., Sokolov A.A., Kharitonov V.A., Petrov I.M. Method to Estimate the Degree of Harmonization Between Standards of Different Categories. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021, vol. 19, no. 1, pp. 60–68. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-1-60-68>

Применяемые во всех машинах и оборудовании механические крепежные изделия, как правило, производятся по стандартам различных категорий – международным стандартам ИСО, национальным, стандартам организации и предприятий, стандартам зарубежных стран или по стандартам фирм-производителей крепежа. Крепежное изделие состоит из различных конструктивных элементов – резьбы, головки, привода и др., которые должны быть стандартизированными для обеспечения совместимости крепежа с монтажным инструментом и взаимозаменяемости как по размерам, так и по функциональным свойствам. С этой точки зрения в стандартах на крепежные изделия всегда проводится чертеж его конструктивного исполнения, размеры, допуски, а также механические, физические, эксплуатационные и другие свойства, необходимые, с одной стороны, для производства, а с другой – обусловленные областью применения нормируемого крепежного изделия [1].

Стратегической линией ранее существовавшего технического комитета ТК229 «Крепежные изделия» являлась тотальная гармонизация фонда национальных стандартов с международными стандартами ИСО, при этом предпочтительной формой гармонизации являлась разработка национальных стандартов, идентичных стандартам ИСО.

Фонд национальных стандартов (ГОСТ и ГОСТ Р), так же как и фонд стандартов ИСО на крепежные изделия, представляет собой рационально организованную систему стандартов различных категорий, которая в комплексе устанавливает полный набор технических требований, необходимых и достаточных для производства крепежных изделий, проведения контроля и испытаний, приемки и поставки потребителю [1]. Значительную часть фонда (около 20%) составляют стандарты общих требований, распространяющиеся на все крепежные изделия, на группы однородных изделий, на подгруппы изделий

особой конструкции или назначения, в которых регламентируются общие технические требования или размеры унифицированных конструктивных элементов крепежных изделий. Эти стандарты, как правило, являются ссылочными на международные стандарты ИСО и составляют основную часть фонда (80%). Стандарты на отдельные виды крепежных изделий содержат подробные чертежи конструкции типа изделия и все размеры для определенного размерного ряда, наиболее широко применяемых типоразмеров. Однако практика использования ссылочных стандартов в значительной степени усложняет работу с действующими нормативными документами, требует проведения постоянной скоординированной работы по актуализации содержания стандартов, что приводит к значительным материальным и временным затратам [2]. Во времена СССР ответственность за разработку и поддержание в актуализированном состоянии этой нормативной базы возложена на Госстандарт СССР. Финансирование разработки государственных стандартов осуществлялось из государственного бюджета. Для этого в отраслях создавались головные и базовые организации по стандартизации на базе существовавших научно-исследовательских отраслевых институтов, которые занимались научными исследованиями в данной области, разработкой государственных стандартов, поддержанием их в актуальном состоянии и отвечали за техническую политику в своей области. Общее методическое руководство и экспертизу стандартов на крепежные изделия осуществлял ВНИИНМАШ. Базовыми организациями по стандартизации отраслей с участием ВНИИНМАШ разрабатывались программы комплексной стандартизации крепежных изделий, в соответствии с которыми разрабатывались новые и пересматривались действующие государственные стандарты, гармонизированные в различной степени с международными стандартами ИСО.

Кроме национальных стандартов в различных отраслях промышленности на крепежные изделия существуют свои отраслевые стандарты и стандарты предприятий, которые в основном дублируют национальные стандарты с незначительными дополнениями, а некоторые применяемые нормативные документы вообще не увязаны с национальными стандартами на крепеж. Вполне справедливо отмечается [3], что значи-

тельная часть и национальных и межгосударственных стандартов разрабатываются как «идентичные», а для обеспечения импортозамещения утверждены несколько специальных программ по разработке гармонизированных (в основном идентичных) стандартов. При этом следует учитывать, что разработчиками стандартов, которые приняты в качестве идентичных для ГОСТ ISO, ГОСТ Р ISO, ГОСТ EN, ГОСТ ИЕС являются зарубежные компании и иностранные специалисты. В **табл. 1** приведены данные по количеству действующих отечественных стандартов на винты самонарезающие в зависимости от года их утверждения.

Таблица 1. Количество действующих отечественных стандартов на винты самонарезающие
Table 1. Number of applicable Russian standards on tapping screws

Наименование стандарта	Годы			
	1980-1989 гг.	1990-1999 гг.	2000-2009 гг.	2010-2019 гг.
ГОСТ	11	-	-	-
ГОСТ Р	-	-	-	-
ГОСТ Р ИСО	-	-	1	12
ГОСТ ISO	-	-	-	4

Как видно из представленных данных, разработка стандартов на данный вид металлопродукции проводилась только в 80-х годах прошлого столетия. В XXI веке в обращении находятся только нормативные документы, являющиеся переводными версиями стандартов ИСО.

Вместе с тем на отечественном рынке винты самонарезающие представлены в широком ассортименте производителей из европейских стран, Китая, Тайваня и др. Винты самонарезающие зарубежного производства поставляются по стандартам DIN, ISO, DIN ISO, DIN EN ISO и др., без стандартов в брендовом исполнении. В **табл. 2** приведены действующие стандарты на винты самонарезающие различного конструктивного исполнения. Поскольку данный вид крепежных изделий не подлежит обязательному подтверждению соответствия, неизбежно возникает вопрос о его качественных характеристиках. С этой точки зрения актуальной задачей является разработка методики определения степени гармонизации требований стандартов различных категорий.

Таблица 2. Действующие российские стандарты на винты самонарезающие и соответствующие зарубежные аналоги
 Table 2. Applicable Russian standards on tapping screws and relevant foreign standards

Стандарт ГОСТ	Наименование	Аналог DIN	Аналог ISO
ГОСТ 11473-75	Шуруп (саморез) с шестигранной головкой	DIN 571	
ГОСТ 1144-80	Шуруп (саморез) с полукруглой головкой и крестообразным шлицем	DIN 7981	ISO 7049
ГОСТ 1145-80	Шуруп (саморез) с потайной головкой и крестообразным шлицем	DIN 7982	ISO 7050
ГОСТ 1146-80	Шуруп (саморез) с полупотайной головкой и крестообразным шлицем	DIN 7983	ISO 7051
ГОСТ 10619-80	Винты самонарезающие с потайной головкой для металла и пластмассы	DIN 7982	ISO 7050
ГОСТ 10620-80	Винты самонарезающие с полупотайной головкой для металла и пластмассы	DIN 7983	ISO 7051
ГОСТ 10621-80	Винты самонарезающие с полукруглой головкой для металла и пластмассы	DIN 7981	ISO 7049
ГОСТ 11652-80	Винты самонарезающие с потайной головкой и заостренным концом для металла и пластмассы	DIN 7982	ISO 7050
ГОСТ 11651-80	Винты самонарезающие с полупотайной головкой и заостренным концом для металла и пластмассы	DIN 7983	ISO 7051

Для оценки степени гармонизации стандартов целесообразно использовать методы квалиметрической оценки качества [4, 5]. Как известно, уровень качества продукции в квалиметрии оценивается по отношению значений показателей качества исследуемого вида продукции к соответствующим показателям базовой модели. При этом в качестве базовых моделей принимаются лучшие отечественные или мировые аналоги, значения показателей качества которых превосходят соответствующие показатели анализируемой продукции. Аналогично можно оценить степень гармонизации стандартов на продукцию, сравнивая значения нормируемых показателей в различных нормативных документах. Тогда показатель, характеризующий степень гармонизации стандартов, будет определяться как сумма произведений единичных показателей качества на соответствующие им коэффициенты весомости:

$$Q = \sum_{i=1}^n \beta_i Q_i, \quad (1)$$

где Q – степень гармонизации сравниваемых стандартов; Q_i – единичные показатели качества, регламентируемые в сравниваемых стандартах; β_i – коэффициенты весомости нормируемых в стандартах единичных показателей качества.

Согласно используемому подходу сумма коэффициентов весомости должна быть равна 1.

Если рассчитанное значение степени гармонизации стандартов Q равно 0, то это означает полное несоответствие требованиям сравниваемых стандартов. При Q равном 1 требования стандартов полностью гармонизированы.

Однако при этом возникает задача определения численных значений сравниваемых показателей, поскольку показатели качества продукции могут быть записаны в виде числа с указанием допусков (односторонних или двусторонних), либо в виде диапазона численных значений, либо в виде «не более»/«не менее» [6, 7]. С другой стороны, анализ нормативной базы на различные виды металлоизделий показал, что на один и тот же вид металлоизделия действуют различные стандарты, требования в которых могут дублироваться. Эти факторы также следует учитывать при разработке методики оценки степени гармонизации стандартов.

Была проведена оценка степени гармонизации следующих отечественных и межгосударственных стандартов на винт самонарезающий: требования ГОСТ 11650-80 «Винты самонарезающие с полукруглой головкой и заостренным концом для металла и пластмассы. Конструкция и размеры» сравнивали с требованиями ГОСТ Р ИСО 7049-2012 «Винты самонарезающие со скругленной головкой и крестообразным шлицем»; требования ГОСТ 11651-80 «Винты самонарезающие с полупотайной головкой и заостренным концом для металла и пластмассы. Кон-

струкция и размеры» сравнивали с требованиями ГОСТ ISO 7051-2014 «Винты самонарезающие с полупотайной головкой и крестообразным шлицем» и ГОСТ Р ИСО 1483-2013 «Винты самонарезающие с полупотайной головкой со шлицем»; требования ГОСТ 11652-80 «Винты самонарезающие с потайной головкой и заостренным концом для металла и пластмассы. Конструкция и размеры» сравнивали с требованиями ГОСТ Р ИСО 1482-2013 «Винты самонарезающие с потайной головкой со шлицем» и ГОСТ Р ИСО 7050-2012 «Винты самонарезающие с потайной головкой и крестообразным шлицем».

При этом следует отметить, что в отечественных стандартах ГОСТ 11650-80, 11651-80 и ГОСТ 11652-80 нормируются требования к винтам самонарезающим с прямым и крестообразным шлицем, в то время как международные стандарты ИСО разработаны для винтов самонарезающих с одним типом шлица. В качестве базовой модели для ГОСТ 11650-80 выбраны требования ГОСТ Р ИСО 7049-2012. Поскольку требования стандарта ГОСТ 11651-80 сравнивали с требованиями, содержащимися в двух стандартах, а именно ГОСТ Р 1483-2013 и ГОСТ ISO 7051-2014, то значения соответствующих показателей для прямого и крестообразного шлицев для базовой модели были взяты из соответствующего стандарта. Аналогично определяли показатели базовой модели для ГОСТ 11652-80.

Поскольку каждый нормативный документ регламентирует ряд показателей, то для определения степени гармонизации требований стандартов необходимо все показатели представить в кодированном виде. Это позволит учесть особенности нормирования показателей качества в стандартах. Для этого использовали известный аппарат квалиметрии.

$$Q_i = \frac{P_i}{P_{\text{баз}}}, \quad (2)$$

$$Q_i = \frac{P_{\text{баз}}}{P_i}. \quad (3)$$

Зависимость (2) использовали для параметров, характеризующих сортамент и те показатели, значения которых регламентируется в виде логического утверждения «не менее», чем это нормируется в стандарте. Зависимость (3) использовали для показателей, значение которых регламентируется в виде логического утверждения «не более». В случае, если оцениваемый стандарт не регламентирует какой-либо показатель, то такому показателю присваивали значение 0. Если значение показателя в оцениваемом стандарте выше, чем в базовой модели, то такому показателю присваивали значение 1. Если показатель нормируется в определенном диапазоне численных значений, то сравнивали разность между минимальным и максимальным значениями, регламентируемыми в каждом стандарте. Значения показателей в кодированном виде представлены в табл. 3–5.

Коэффициенты весомости рассчитывают по формуле

$$\beta = \frac{1}{n}, \quad (4)$$

где n – количество нормируемых показателей качества, нормируемых в стандарте с учетом особенностей их нормирования.

Для расчета коэффициентов весомости использовали общее число показателей винта самонарезающего в каждом стандарте с учетом, если тот или иной показатель нормируется в виде логического утверждения «не более»/«не менее». Результаты расчета коэффициентов весомости представлены в табл. 6.

Таблица 3. Показатели винта самонарезающего по ГОСТ 11650-80 в кодированном виде
Table 3. Encoded parameters of tapping screws as per GOST 11650-80

Показатели	Показатели в кодированном виде
Количество регламентируемых диаметров	0,667
Номинальный диаметр резьбы d	0,753
Шаг резьбы P	1,000
Радиус под головкой d_a , не более	0,884
Предельное отклонение диаметра головки D	1,000
Отклонение высоты головки K	1,000
Радиус под головкой R	1,000
Радиус сферы головки R_1	0,328
Глубина шлица t	1,000
Диаметр крестообразного шлица m	0,679
Тип С	0,000
Тип F	0,000
Тип R	0,000
Длина винта	0,967

Таблица 4. Показатели винта самонарезающего
по ГОСТ 11651-80 в кодированном виде
Table 4. Encoded parameters of tapping screws
as per GOST 11651-80

Показатели	Показатели в кодирован- ном виде
Количество регламентируемых диаметров	0,667
Номинальный диаметр резьбы d	0,753
Шаг резьбы P	1,000
Диаметр головки D	0,628
Предельное отклонение диаметра головки D , не более	1,000
Высота головки K , не более	1,000
Высота сферы f	1,000
Радиус сферы головки R_1	1,000
Радиус под головкой R , не более	0,313
Ширина шлица h (номинальная)	1,000
Ширина шлица h (минимальная)	0,848
Ширина шлица h (максимальная)	1,000
Глубин шлица t (минимальная)	0,800
Глубин шлица t (максимальная)	1,000
Диаметр крестообразного шлица m , не более (тип Н)	1,000
Глубина вхождения калибра в крестообразный шлиц, не менее (тип Н)	0,692
Глубина вхождения калибра в крестообразный шлиц, не более (тип Н)	1,000
Диаметр крестообразного шлица m , не более (тип Z)	0,000
Глубина вхождения калибра в крестообразный шлиц, не менее (тип Z)	0,000
Глубина вхождения калибра в крестообразный шлиц, не более (тип Z)	0,000
Тип С	0,000
Тип F	0,000
Тип R	0,000
Длина винта	0,967

Таблица 5. Показатели винта самонарезающего
по ГОСТ 11652-80 в кодированном виде
Table 5. Encoded parameters of tapping screws
as per GOST 11652-80

Показатели	Показатели в кодирован- ном виде
Количество регламентируемых диаметров	0,667
Номинальный диаметр резьбы d	0,753
Шаг резьбы P	1,000
Диаметр головки D	0,628
Предельное отклонение диаметра головки D , не более	1,000
Высота головки K , не более	0,733
Радиус под головкой R , не более	1,000
Ширина шлица n (номинальная)	0,700
Ширина шлица n (минимальная)	1,000
Ширина шлица n (максимальная)	0,875
Глубин шлица t (минимальная)	1,000
Глубин шлица t (максимальная)	0,822
Диаметр крестообразного шлица m , не более (тип Н)	0,593
Глубина вхождения калибра в крестообразный шлиц, не менее (тип Н)	1,000
Глубина вхождения калибра в крестообразный шлиц, не более (тип Н)	1,000
Диаметр крестообразного шлица m , не более (тип Z)	0,000
Глубина вхождения калибра в крестообразный шлиц, не менее (тип Z)	0,000
Глубина вхождения калибра в крестообразный шлиц, не более (тип Z)	0,000
Тип С	0,000
Тип F	0,000
Тип R	0,000
Длина винта	0,967

Степень гармонизации требований действующих отечественных стандартов с требованиями стандартов ИСО определяли по формуле (1) как сумму произведений коэффициента весомости (см. табл. 6) на значение нормируемых показателей в кодированном виде (см. табл. 3–5). Результаты расчета представлены в табл. 7.

Таблица 6. Коэффициенты весоности показателей, нормируемых в стандартах на винт самонарезающий

Table 6. Weight coefficients of the parameters controlled by standards on tapping screws

Стандарт	Коэффициент весоности
ГОСТ 11650-80	0,0625
ГОСТ 11651-80	0,0294
ГОСТ 11652-80	0,0313

Таблица 7. Степень гармонизации требований российских стандартов с требованиями стандартов ИСО на винт самонарезающий

Table 7. Degree of harmonization between Russian standards and ISO standards on tapping screws

Стандарт	Степень гармонизации
ГОСТ 11650-80	0,6625
ГОСТ 11651-80	0,6531
ГОСТ 11652-80	0,6263

Как показали результаты расчета, степень гармонизации требований стандартов, утвержденных в 1980 году, с требованиями стандартов ИСО составляет 63–66%.

Таким образом, использование основных подходов квалиметрии позволяет оценить степень гармонизации требований стандартов различных категорий. Разработанная методика может быть использована в практике разработки стандартов для установления соответствующих значений нормируемых показателей.

Как показывает практика работ в области стандартизации [3], в настоящее время приходится сталкиваться с негативными последствия-

ми бездумной «гармонизации» в виде создания идентичных стандартов на крепежные изделия, которые порой обеспечивают не «импортозамещение», а «импортопринуждение». Введение этих стандартов затруднило производство крепежа на российских предприятиях из-за использования в текстах стандартов вместо отечественных зарубежных марок стали, которые отсутствуют в российских нормативных документах. Это привело к тому, что изготовители либо нарушают эти идентичные стандарты, применяя все-таки отечественные марки стали, либо покупают материалы в Европе. Неоднократные обращения в ТК 229 (куратор стандартов на крепеж), ВНИИНМАШ, в Росстандарт дали определенный результат – больше десятка восстановленных старых стандартов на крепеж только в 2019 году. Это совсем не означает, что не нужны гармонизированные стандарты. Одним из положительных примеров является разработка и утверждение межгосударственного стандарта на прокат арматурный ГОСТ 34028-2016 «Прокат арматурный для железобетонных конструкций. Технические условия». Отличительной особенностью данного стандарта является наличие в нем двух разделов. В первый раздел включены обязательные нормы, которые содержались в отменяемых стандартах. Во второй раздел включены дополнительные нормы, аналогичные зарубежным нормам и правилам [8].

Существующие в настоящее время проблемы стандартизации обусловлены переходным периодом реформирования в области технического регулирования и являются сдерживающим фактором в достижении поставленных перед стандартизацией стратегических целей [9]. Это относится к низкой эффективности стандартов из-за отставания научно-технического уровня стандартов от современных достижений науки и техники и замедления темпов гармонизации национальных стандартов с международными нормами [10–12].

Список литературы

1. Громак А.В. Прочность и безопасность машин – в высоком качестве и надежности крепежных изделий // Вестник ВНИИНМАШ. 2011. №8. С. 37–41.
2. К вопросу о проблемах использования ссылочных стандартов / Э.П. Дрягун, М.А. Полякова, О.А. Белан, Н.Т. Алсынбаев // Бюл. научно-технической и экономической информации «Черная металлургия». 2019. Т. 75. №10. С. 1169–1180.
3. Дунаевский С.Н., Тарасев Ю.И., Токмаков О.А. Новый российский закон о стандартизации в ракурсе конкретной практики // Арматуростроение. 2016. №1 (100). С. 21–25.
4. Азгальдов Г.Г., Райхман Э.П. О квалиметрии / под ред. А.В. Глищева. М.: Изд-во стандартов, 1973. 172 с.
5. Азгальдов Г.Г. Теория и практика оценки качества товаров. Основы квалиметрии. М.: Экономика, 1982. 256 с.
6. Сорокин Е.П. О форме записи диапазона числовых значений в текстах нормативных и технических документов // Стандарты и качество. 2007. № 7. С. 58–60.

7. ГОСТ 1.5-2001. Межгосударственная система стандартизации. Стандарты межгосударственные, правила и рекомендации по межгосударственной стандартизации. Общие требования к построению, изложению, оформлению, содержанию и обозначению. М.: Стандартинформ, 2010. 69 с.
8. Разработка структуры нормативного документа на металлопродукцию на основе принципа опережающей стандартизации / С.В. Снимщиков, М.А. Полякова, А.С. Лимарев, В.А. Харитонов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т. 17. №1. С. 86–93.
9. Концепция развития национальной системы стандартизации Российской Федерации на период до 2020 года. Одобрена распоряжением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2012 г. № 1762-р.
10. Терентьева Р.П. Гармонизированные стандарты на продукцию сырьевых отраслей промышленности // Стандарты и качество. 2004. № 10. С. 26–29.
11. Брод Б.Э. Определение уровня гармонизации национальных стандартов // Стандарты и качество. 2010. № 4. С. 36–39.
12. Тарасьев Ю.А., Дунаевский С.Н. Гармонизация стандартов и технических регламентов: какой она должна быть? // Стандарты и качество. 2014. № 3. С. 34–37.

References

1. Gromak A.V. Strength and safety of machines are in a high quality and reliability of fasteners. *Vestnik VNIINMASH* [Vestnik VNIINMASH], 2011, no. 8, pp. 37–41. (In Russ.)
2. Dryagun E.P., Polyakova M.A., Belan O.A., Alsynbaev N.T. On problems of applying reference standards. *Chernaya metallurgiya. Byulleten nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii* [Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information], 2019, vol. 75, no. 10, pp. 1169–1180. (In Russ.)
3. Dunaevskiy S.N., Tarasiev Yu.I., Tokmakov O.A. A new Russian law about standardization under the aspect of definite practice. *Armaturestroenie* [Valve Building], 2016, no. 1 (100), pp. 21–25. (In Russ.)
4. Azgaldov G.G., Raikhman E.P. *O kvalimetrii* [About qualimetry]. Ed. by Glichev A.V. Moscow: Publishing House of Standards, 1973, 172 p. (In Russ.)
5. Azgaldov G.G. *Teoriya i praktika otsenki kachestva tovarov. Osnovy kvalimetrii* [Theory and practice of goods quality assessment. Basics of qualimetry]. Moscow: Economics, 1982, 256 p. (In Russ.)
6. Sorokin E.P. Regarding the format of writing a numerical range in texts of regulatory and technical documents. *Standarty i kachestvo* [Standards and Quality], 2007, no. 7, pp. 58–60. (In Russ.)
7. ГОСТ 1.5-2001. *Mezhhgosudarstvennaya sistema standartizatsii. Standarty mezhhgosudarstvennyye, pravila i rekomendatsii po mezhhgosudarstvennoy standartizatsii. Obshchie trebovaniya k postroeniyu, izlozheniyu, oformleniyu, soderzhaniyu i oboznacheniyu* [Interstate System for Standardization. Interstate standards, rules and recommendations on interstate standardization. General requirements for structure, drafting, presentation, content and indication]. Moscow: Standartinform, 2010, 69 p. (In Russ.)
8. Snimshchikov S.V., Polyakova M.A., Limarev A.S., Kharitonov V.A. Development of a structure of norms for steel products based on a principle of advanced standardization. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2019, vol. 17, no. 1, pp. 86–93. doi: 10.18503/1995-2732-2019-17-1-86-93
9. The concept of developing the national system of standardization in the Russian Federation till 2020. Approved by Order of the Government of the Russian Federation No. 1762-p dated 24 September 2012. (In Russ.)
10. Terentieva R.P. Harmonized standards on products of resource-based industries. *Standarty i kachestvo* [Standards and Quality], 2004, no. 10, pp. 26–29. (In Russ.)
11. Brod B.E. Determining the level of harmonization of national standards. *Standarty i kachestvo* [Standards and Quality], 2010, no. 4, pp. 36–39. (In Russ.)
12. Tarasiev Yu.A., Dunaevskiy S.N. Harmonization of standards and technical regulations: what should it be? *Standarty i kachestvo* [Standards and Quality], 2014, no. 3, pp. 34–37. (In Russ.)

Поступила 07.02.2021; принята к публикации 05.03.2021; опубликована 25.03.2021
Submitted 07/02/2021; revised 05/03/2021; published 25/03/2021

Полякова Марина Андреевна – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технологий обработки материалов, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: m.polyakova@magtu.ru. ORCID 0000-0002-1597-8867

Дрягун Эдуард Павлович – начальник центральной заводской лаборатории, ОАО «Магнитогорский метизно-калибровочный завод «ММК-МЕТИЗ», Магнитогорск, Россия. Email: dryagun.ep@mmk-metiz.ru

Соколов Александр Алексеевич – руководитель ПК7 «Метизы и крепежные изделия», ТК 375 «Металлопродукция из черных металлов и сплавов», кандидат технических наук, ОАО «Магнитогорский метизно-калибровочный завод «ММК-МЕТИЗ», Магнитогорск, Россия. Email: sokol-7456@mail.ru

Харитонов Вениамин Александрович – кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры технологий обработки материалов, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: v.haritonov@magtu.ru

Петров Игорь Михайлович – старший преподаватель, кафедра металлургии и стандартизации, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Белорецк, Россия.
Email: atrox.88@mail.ru

Marina A. Polyakova – DrSc (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Materials Processing, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: m.polyakova@magtu.ru

Eduard P. Dryagun – Head of the Central Plant Laboratory, OJSC Magnitogorsk Hardware and Sizing Plant MMK-METIZ, Magnitogorsk, Russia.
Email: dryagun.ep@mmk-metiz.ru

Alexander A. Sokolov – Head of Subcommittee 7 “Metalware and Fasteners”, Technical Committee 375 “Steel products from ferrous metals and alloys”, PhD (Eng.), OJSC Magnitogorsk Hardware and Sizing Plant MMK-METIZ, Magnitogorsk, Russia.
Email: sokol-7456@mail.ru

Veniamin A. Kharitonov – PhD (Eng.), Professor, Professor of the Department of Materials Processing, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: v.haritonov@magtu.ru

Igor M. Petrov – Senior Lecturer, the Department of Metallurgy and Stadardization, Nosov Magnitogorsk State Technical University, branch in Beloretsk, Beloretsk, Russia
Email: atrox.88@mail.ru

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

УДК [669.15-198:669.293]:658.562.42

DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-1-69-74



ВХОДНОЙ КОНТРОЛЬ ФЕРРОНИОБИЯ, ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ МИКРОЛЕГИРОВАНИЯ СТАЛИ

Шишлонова А.Н., Адищев П.Г., Мальков М.В.

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

Аннотация. Феррониобий – это один из самых дорогих ферросплавов, является дорогостоящим металлургическим сырьём. Традиционно для микролегирования стали используют феррониобий марки FeNb65 (60–70%), который вводят в плавку в виде кускового материала или порошковой проволоки. Ликвация ниобия внутри марки FeNb65 достигает 10% и она влияет на точность дозировки необходимого количества материала. Чтобы обеспечить точность химического состава выплавляемой стали в процессе легирования любым ферросплавом, необходимо проводить входной контроль не только шихтовых материалов, но и ферросплавов. Определение химического состава ферросплавов традиционными стандартизованными методами требует наличия большого количества дорогостоящих химических реагентов и занимает длительное время. В представленной работе показана возможность экспрессного проведения рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) ферросплавов на примере феррониобия с использованием спектрометра Quant X. Показана роль пробоподготовки проб к РФА, которая представляет собой измельчение анализируемого образца до требуемой крупности и прессование на подложку из борной кислоты. Определены колебания содержания ниобия в кусках применяемого феррониобия, что важно для точного расчета необходимого количества ниобия в готовой стали, особенно при ее выплавке в печах малой вместимости. Это позволит оперативно и правильно проводить микролегирование стали и сократить ее брак (отсортровку) по химическому составу. Поэтому для обеспечения точного попадания процентного содержания ниобия в заданные пределы по марке необходимо контролировать соответствие химического состава феррониобия для микролегирования его техническим условиям. Показано на примере выплавки стали марки 10Г2Б в индукционной печи вместимостью 30 кг, что проведение расчета норм расхода феррониобия по результатам точечного входного контроля позволило выплавить сталь с содержанием ниобия в пределах, соответствующих выплавляемой марке. При этом благодаря незначительному диапазону колебания содержания ниобия (до 2,2%) в исследуемых кусках ферросплава достигнута высокая эффективность его усвоения, которая составила 73%.

Ключевые слова: рентгенофлуоресцентный анализ, ферросплавы, феррониобий, подготовка проб к анализу, входной контроль.

© Шишлонова А.Н., Адищев П.Г., Мальков М.В., 2021

Для цитирования

Шишлонова А.Н., Адищев П.Г., Мальков М.В. Входной контроль феррониобия, предназначенного для микролегирования стали // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №1. С. 69–74. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-1-69-74>



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

INCOMING INSPECTION OF FERRONIUMBIUM APPLIED FOR STEEL MICROALLOYING

Shishlonova A.N., Adishchev P.G., Malkov M.V.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Ferroniobium is one of the most expensive ferroalloys and an expensive metallurgical raw material. It is conventional to use FeNb65 grade (60–70%) added to steel as a lump material or flux-cored wire. Liquation of niobium in FeNb65 amounts to 10%, and this influences accuracy of the required dosing of the material. In order to ensure the accuracy of a chemical composition of molten steel, when adding any ferroalloy, it is necessary to carry out an incoming inspection of not only charge materials, but also ferroalloys. To determine a chemical composition of ferroalloys by conventional standardized methods, we need much time and a lot of expensive chemical reagents. This paper describes an express X-ray fluorescence analysis (XRF) of ferroalloys by the example of ferroniobium, using the Quant'X spectrometer. The authors showed a role of the sample preparation procedure, consisting of grinding the analyzed sample to the required size and pressing onto a boric acid substrate. The niobium content in pieces of applied ferroniobium is varied and determined to accurately calculate the required amount of niobium in finished steel, especially when it is smelted in low-capacity furnaces. This will make it possible to carry out microalloying of steel quickly and correctly and reduce its rejection (sorting) by a chemical composition. Therefore, to ensure that niobium percentage falls within a range specified for the grade, it is necessary to inspect the compliance of a chemical composition of ferroniobium for microalloying with its technical conditions. The example of melting 10G2B steel grade in a 30 kg induction furnace shows that by calculating ferroniobium consumption rates according to results of an incoming spot inspection, we could make steel containing niobium within the ranges set for the relevant grade. Due to an insignificant range of fluctuations in niobium content (up to 2.2%) in the ferroalloy samples under study, we achieved its high recovery rate amounting to 73%.

Keywords: X-ray fluorescence analysis, ferroalloys, ferroniobium, preparation of samples for the analysis, incoming inspection.

For citation

Shishlonova A.N., Adishchev P.G., Malkov M.V. Incoming Inspection of Ferroniobium Applied for Steel Microalloying. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021, vol. 19, no. 1, pp. 69–74. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-1-69-74>

На современном этапе развития производства при повсеместном истощении природных ресурсов и ухудшении экологической обстановки наиболее остро встают вопросы разработки ресурсосберегающих технологий получения металлопродукции при одновременном повышении ее качества. В решении этой проблемы ведущая роль принадлежит микролегированным (вводимые легирующие элементы имеют очень низкую концентрацию), в том числе ниобийсодержащим сталям. Хорошо известно положительное влияние ниобия при микролегировании стали на процессы аустенизации, рекристаллизации, роста зерна, фазовые переходы и выделения фаз, что позволяет регулировать в широких пределах механические свойства.

Низколегированные ниобием стали применяются для изготовления кузовов и рам автомобилей, корпусов морских и речных судов, нефтегазовых труб большого диаметра различного климатического исполнения. В качестве важнейших преимуществ применения микролегированных ниобием сталей в промышленности является

возможность снижения общей массы конструкции при применении более высокопрочных материалов меньших сечений, повышение их надежности и долговечности [1–2].

Наиболее приемлемым для микролегирования с технологической и экономической точек зрения является использование ферросплавов с максимально возможным содержанием ведущего элемента, в случае микролегирования ниобием – феррониобия марки FeNb65 (**табл. 1**), вводимого в плавку в виде кускового материала или порошковой проволоки.

Использование ферросплавов в плавку в качестве легирующих элементов вместо введения чистых металлов имеет преимущества: меньший угар, более низкая температура плавления (меньшие затраты тепла), ниже стоимость собственно процесса легирования. Кроме того, чистые металлы в процессе изготовления требуют существенно больше затрат.

Однако недостатком стандартных марок ферросплавов на основе ниобия является существенное колебание основного элемента ферро-

сплава, составляющее для марки FeNb65 60–70%, для других марок от 55 до 70% (табл. 1). Такое колебание концентрации элемента внутри марки FeNb65 до 10% может привести к различному содержанию основного легирующего элемента в каждом куске партии. Эти различия в содержании ниобия необходимо учитывать [3], так как они влияют на точность дозировки необходимого количества материала, особенно при выплавке стали в печах малой вместимости (до 60 кг). Связано это с тем, что для микролегирования феррониобий вводят в плавку в количестве нескольких десятков грамм (т.е. небольшой кусочек), в отличие от других легирующих элементов (кремний, марганец, никель, хром и др.), добавляемых от одного до двух килограммов.

Таблица 1. Нормируемые значения химического состава феррониобия по ГОСТ 16773-2003
Table 1. Rated chemical composition of ferroniobium as per GOST 16773-2003

Марка феррониобия	Массовая доля, %					
	Nb	Ta	не более			
			Si	Al	Ti	Sn
FeNb65	60,0-70,0	< 0,5	2,5	1,0	0,4	0,10
FeNb60Ta1Al3	55,0-70,0	< 2,0	4,0	3,0	2,5	0,30
FeNb60Ta1Al3,5	55,0-70,0	< 2,0	4,0	3,5	2,5	0,10
FeNb60Ta1Al6	55,0-70,0	< 2,0	4,0	6,0	2,5	0,15
FeNb60Ta5Al2	55,0-70,0	2,0-8,0	2,5	2,0	2,5	0,2
FeNb60Ta5Al6	55,0-70,0	2,0-8,0	4,0	6,0	2,5	0,15
FeNb60Ta5Al6Sn	55,0-70,0	2,0-8,0	4,0	6,0	2,5	3,0

Кроме того, ниобий из феррониобия плохо усваивается сталью из-за высокой температуры его плавления и плотности, которая выше, чем плотность жидкой стали. Высокая температура плавления феррониобия (примерно 1700°C) приводит к обогащению ниобием тех участков жидкого металла (дна ковша), где находятся куски ферросплава. Отсюда высокий и нестабильный угар ниобия (5–50%), неравномерное распределение его в объеме металла, что существенно осложняет получение заданного его содержания в стали [4].

Поэтому для обеспечения точного попадания процентного содержания ниобия в заданные пределы по марке необходимо контролировать соответствие химического состава каждого куска феррониобия, применяемого для микролегирования, его техническим условиям.

Следует отметить, что определение химиче-

ского состава ферросплава заключается не только в определении основного легирующего компонента, но и сопутствующих примесей [5], которые могут повлиять на качество выплавляемой стали. В связи с этим установление соответствия химического состава ферросплавов, в том числе и ниобия, их заявленной марке существующими стандартизованными химическими методами занимает длительное время, так как для каждого нормируемого элемента необходима своя методика (Nb – ГОСТ 15933.5-90, Al – ГОСТ 15933.7-90, Ti – ГОСТ 15933.3-90, Sn – ГОСТ 15933.16-90, Si – ГОСТ 28473-90).

Кроме того, все химические методики трудоемки и требуют расхода большого количества реагентов. Проведение анализа физико-химическими методами (например, атомно-эмиссионный анализ с индуктивно-связанной плазмой) сокращает время проведения самого анализа, при этом подготовка пробы к анализу по-прежнему остается химической, т.е. длительной.

Применение рентгеноспектрального флуоресцентного метода (РФА) позволяет сократить время определения химического состава ферросплавов благодаря одновременному определению всех компонентов из одной навески пробы. Кроме экспрессности, РФА обладает такими достоинствами, как широкий круг определяемых элементов и концентраций, достаточные чувствительность и точность результатов, минимальная пробоподготовка и др.

Целью представленной работы является исследование химического состава точечных проб (отдельных кусков) феррониобия рентгеноспектральным флуоресцентным методом.

Для определения химического состава ферросплавов в условиях МГТУ им. Г.И. Носова применяют энергодисперсионный рентгенофлуоресцентный спектрометр Quant`X. Прибор характеризуется высокой точностью и воспроизводимостью измерений и предназначен для определения содержания химических элементов от натрия до урана в различных веществах, находящихся в твердом, порошкообразном или растворенном состояниях. Источник возбуждения: рентгеновская трубка (материал анода – Rh, окошко – Be). Напряжение 4–50 кВ, мощность 50 Вт, ток 0,02–1,98 мА. Регистрацию флуоресцентного излучения осуществляют с помощью полупроводникового кремний-литиевого детектора (Si(Li), 155 эВ) с электрическим охлаждением [6].

Отбор точечных проб феррониобия был произведен в соответствии с ГОСТ 17260-2009. Для этого от четырех кусков ферросплава крупно-

стью более 100 мм методом дробления получали более мелкие куски и из них готовили анализируемые пробы, гомогенные по гранулометрическому и химическому составу, что позволило исключить погрешности влияния крупности частиц на их интенсивность флуоресценции [7–9].

Пробы феррониобия измельчали в два этапа. Первый – измельчение лабораторной пробы с помощью мельницы-ступки Pulverisette-2 до крупности частиц 0,1 мм, второй – последующее измельчение на вибрационной мельнице MM 400 до размера зерна 0,063 мм, удовлетворяющего требованиям анализа. Подготовленный таким образом анализируемый материал массой 1–2 г прессовали в таблетки одинаковой плотности с помощью автоматического пресса FluxanaVaneox 40t в три этапа с усилием 10, 15, 20 т и выдержкой 5 с на каждом этапе. Использование одинаковых условий прессования позволяет получать таблетки одинаковой плотности, что сводит к минимуму погрешности пробоподготовки. В качестве подложки использовали борную кислоту.

Рентгенофлуоресцентный анализ феррониобия проводили по методике [10]. Результаты исследования представлены в **табл. 2**.

Таблица 2. Результаты химического состава феррониобия марки FeNb65
Table 2. Chemical composition of FeNb65

Проба	Массовая доля, %					
	Nb	Si	Ti	Al	Ta	Sn
Кусок 1	67,8	2,39	0,40	0,54	0,47	0,07
Кусок 2	68,5	2,45	0,40	0,51	0,50	0,07
Кусок 3	66,3	1,05	0,29	0,97	0,07	0,05
Кусок 4	57,9	1,76	1,45	6,91	1,67	0,01

Из полученных результатов видно, что по химическому составу три пробы (кусок № 1–3) феррониобия соответствуют заявленной марке FeNb65 и по содержанию ниобия они близки между собой. Однако содержание основного легирующего элемента в четвертой пробе ниже нормируемого предела (см. **табл. 1**) и, кроме того, в ней отмечено повышенное содержание алюминия, что не соответствует марке FeNb65. Использование этого куска в качестве легирующего компонента может привести к несоответствию выплавленной стали по содержанию ниобия [11] и алюминия.

Куски феррониобия, соответствующие марке FeNb65, использовали для выплавки стали марки 10Г2Б (**табл. 3**) в индукционной печи вместимостью 30 кг.

Таблица 3. Химический состав стали 10Г2Б, %
Table 3. Chemical composition of 10G2B steel grade, %

C	Mn	Si	Nb	Cr	Cu	Ni
До 0,12	1,2–1,6	0,17–0,37	0,02–0,05	до 0,3	до 0,3	до 0,3

Расчет норм расхода ферросплава при использовании феррониобия в кусковом виде производили на среднее содержание ниобия в готовой стали, равное 0,035%, с учетом усвоения элемента (принятого 75%) по формуле

$$M_{\text{пр}} = \frac{[\text{Nb}] \cdot M_{\text{пл}}}{K_{\text{усв}} \cdot [\text{Nb}]_1},$$

где $M_{\text{пл}}$ – масса плавки, кг; $K_{\text{усв}}$ – коэффициент усвоения, %; $[\text{Nb}]$ – планируемое содержание ниобия в металле, %; $[\text{Nb}]_1$ – содержание ниобия в куске феррониобия, %.

Расчетные величины массы феррониобия и данные по проведенным плавкам приведены в **табл. 4**.

Таблица 4. Результаты определения содержания ниобия в стали марки 10Г2Б и степени его усвоения в опытных плавках
Table 4. Niobium content in 10G2B steel grade and the recovery rate in pilot heats

Номер опыта	Расчет на среднее содержание ниобия в готовой стали – 0,035%			
	Содержание Nb в феррониобии, %	Масса феррониобия, г	Содержание Nb в металле, %	Степень усвоения Nb в металле, %
1	67,8	20,65	0,025	71,4
2	68,5	20,38	0,024	68,6
3	66,3	21,12	0,028	80,0

Проведенные исследования показали, что достижение (обеспечение) точного конечного химического состава при микролегировании, например, стали марки 10Г2Б и высокая эффективность усвоения ниобия (73%) достигается благодаря незначительному диапазону колебания содержания ниобия (до 2,2%) в исследуемых кусках ферросплава, а также точной дозировкой его исходного количества в плавку.

Таким образом, входной контроль точечных проб феррониобия обеспечивает исключение получения некачественной продукции и проведение правильных расчетов количества ферросплава для его дозировки, т.е. точное попадание необходимого процентного содержания элемента в выплавляемую сталь.

Список литературы

1. Александров С.В. Повышение свойств сталей различного назначения за счет микролегирования ниобием // *Металлург*. 2004. № 8. С. 73–74.
2. Тимохин А.С., Долгих Ю.Н., Исаев Е.В. Производство и дальнейшее применение для легирования стали порошковой проволоки с наполнителем феррониобий в условиях сталеплавильного производства ПАО «НЛМК» // *Бюл. НТИЭИ «Черная металлургия»*. 2018. № 11. С. 69–72.
3. Пат. 2396360 Российская Федерация, МПК С21. Порошковая проволока для микролегирования стали с наполнителем на основе феррониобия / Гошкадера С.В.; патентообладатель ООО «ПРОМРЕСУРС». №2008152140/02; заявл. 29.12.2008; опубл. 10.08.2010.
4. Дюдкин Д.А., Кисиленко В.В., Рогаткин В.С. Некоторые особенности использования благородных ферросплавов для микролегирования стали при внепечной обработке расплава // *Бюл. НТИЭИ «Черная металлургия»*. 2012. № 2. С. 46–49.
5. Контроль качества ферросплавов: справочник / Ю.Л. Плинер и др. М.: Металлургия, 1993. 208 с.
6. Исследование химического состава противопригарных красок методом рентгенофлуоресцентного анализа / К.Н. Вдовин, Н.А. Феоктистов, К.Г. Пивоварова, Т.Б. Пономарева // *Литейное производство*. 2019. № 4. С. 14–18.
7. Лосев Н.Ф., Смагунова А.Н. Основы рентгеноспектрального флуоресцентного анализа. М.: Химия, 1982. 208 с.
8. Бахтияров А.В., Савельев С.К. Рентгенофлуоресцентный анализ минерального сырья. СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2014. 132 с.
9. Рентгенофлуоресцентный анализ. Применение в заводских лабораториях: сб. науч. тр.: пер. с нем. / под ред. Х. Эрхардта. М.: Металлургия, 1985. 256 с.
10. Рентгеноспектральный флуоресцентный анализ химического состава ферромарганца, марганца металлического и марганцевой лигатуры / В.Н. Самопляс, Н.Н. Гаврилюков, Л.И. Орлова, В.В. Мандрыгин // *Аналитика и контроль*. 2004. Т.8, № 1. С. 42–50.
11. Гималетдинов Р.Х., Гулаков А.А., Тухватуллин И.Х. Влияние химического состава на свойства рабочего слоя центробежно-литых индифинитных прокатных валков // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2016. №3. С. 78–89.

References

1. Aleksandrov S.V. Improving the properties of steels for various purposes due to microalloying with niobium. *Metallurg* [Metallurgist], 2004, no. 8, pp. 73–74. (In Russ.)
2. Timokhin A.S., Dolgikh Yu.N., Isaev E.V. Production and further use of flux-cored wire with the ferroniobium filler for steel alloying at steelmaking facilities of PJSC NLMK. *NTiEI Chernaya metallurgiya* [Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economical Information], 2018, no. 11, pp. 69–72. (In Russ.)
3. Goshkadera S.V. *Poroshkovaya provoloka dlya mikrolegirovaniya stali s napolnitelem na osnove ferroniobiya* [Flux-cored wire with a ferroniobium-based filler for steel microalloying]. Patent RF, no. 2396360. The patentee: LLC PROMRESURS. No. 2008152140/02. Applied on December 29, 2008; published on August 10, 2010.
4. Dyudkin D.A., Kisilenko V.V., Rogatkin V.S. Some features of the use of noble ferroalloys for microalloying of steel during secondary treatment of molten steel. *Chernaya metallurgiya* [Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economical Information], 2012, no. 2, pp. 46–49. (In Russ.)
5. Pliner Yu.L. et al. *Kontrol kachestva ferrosplavov: spravochnik* [Quality control of ferroalloys. Reference book]. Moscow: Metallurgy, 1993, 208 p. (In Russ.)
6. Vdovin K.N., Feoktistov N.A., Pivovarova K.G., Ponomareva T.B. Study on a chemical composition of anti-penetration paints by an X-ray fluorescence analysis. *Liteinoe proizvodstvo* [Foundry], 2019, no. 4, pp. 14–18. (In Russ.)
7. Losev N.F., Smagunova A.N. *Osnovy rentgenospektralnogo fluorestsennogo analiza* [Fundamentals of an X-ray spectral fluorescence analysis]. Moscow: Chemistry, 1982, 208 p. (In Russ.)
8. Bakhtiarov A.V., Saveliev S.K. *Rentgenofluorestsennyi analiz mineralnogo syrya* [An X-ray fluorescence analysis of mineral raw materials]. St. Petersburg: Publishing house of St. Petersburg University, 2014, 132 p. (In Russ.)
9. H. Erhardt (ed.) *Rentgenofluorestsennyi analiz. Primenenie v zavodskikh laboratoriyakh: sb. nauch. tr.* [An X-ray fluorescence analysis. Application at plant laboratories. Collection of scientific papers]. Translated from German. Moscow: Metallurgy, 1985, 256 p. (In Russ.)
10. Samoplyas V.N., Gavrilyukov N.N., Orlova L.I., Mandrygin V.V. An X-ray spectral fluorescence analysis of a chemical composition of ferromanganese, metallic manganese and manganese alloy. *Analitika i kontrol* [Analytics and Control], 2004, vol. 8, no. 1, pp. 42–50. (In Russ.)
11. Gimaletdinov R.Kh., Gulakov A.A., Tukhvatullin I.Kh. Effect of a chemical composition on the properties of a working layer of centrifugally cast indefinite mill rolls. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of NMSTU], 2016, no. 3, pp. 78–89. (In Russ.)

Поступила 23.12.2020; принята к публикации 15.01.2021; опубликована 25.03.2021
Submitted 23/12/2020; revised 15/01/2020; published 25/03/2021

Шишлонова Алёна Николаевна – аспирант,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: alnavolkova@mail.ru

Адищев Павел Геннадьевич – магистрант,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.

Мальков Михаил Витальевич – аспирант,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.

Alyona N. Shishlonova – postgraduate student,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: alnavolkova@mail.ru

Pavel G. Adishchev – master's student,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Mikhail V. Malkov – postgraduate student,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ NEW TECHNOLOGICAL PROCESSES AND EQUIPMENT

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

УДК 691.342:378.147

DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-1-75-82



ИЗЫСКАНИЕ НОВЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРОЧНЫХ КОРПУСОВ РЕДУКТОРОВ И ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ

Елемесов К.К., Наурызбаева Д.К., Крупник Л.А., Басканбаева Д.Д., Игбаева А.Е.

Казахский национальный технический университет им. К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан

Аннотация. Постановка задачи. Доказательство возможности и целесообразности использования полимербетона и фибробетона в качестве конструкционных материалов в машиностроении для изготовления корпусов редукторов и центробежных насосов. **Использованные методы.** При проведении исследования использованы: теоретические исследования с экспериментальной проверкой их результатов в лабораторных условиях, методика рационального планирования экспериментов со статистической обработкой результатов, стендовые испытания образцов оборудования. **Новизна** проведенных исследований заключается в обосновании возможности и целесообразности использования полимербетона и фибробетона в качестве конструкционных материалов для машиностроения. **Результаты.** В результате исследований впервые разработаны методики проектирования рациональных составов смеси с прерывистой гранулометрией заполнителей для производства полимербетона и фибробетона, технология приготовления смесей и отливки готовых изделий. Выявлен ряд закономерностей влияния основополагающих факторов на прочность полимербетона и фибробетона, позволивших разработать двухстадийную технологию изготовления корпусов редукторов и центробежных насосов с высокой степенью готовности, не требующих дополнительной обработки. Результаты теоретических и лабораторных исследований проверены при стендовых испытаниях, изготовленных образцов редуктора Ц2-250 с корпусом из полимербетона и центробежного насоса 4К6 из фибробетона. Эти испытания подтвердили ряд преимуществ по сравнению с изделиями из металла. **Практическая значимость.** Изученные нами закономерности поведения новых конструкционных материалов – полимербетона и фибробетона – позволяют рекомендовать их в качестве эффективных конструкционных материалов для использования в машиностроении при изготовлении ряда машин и механизмов, которые будут обладать рядом преимуществ: высокой прочностью, возможностью работы в сложных условиях (агрессивная среда, высокая запыленность, работа с высокоабразивным материалом и др.), меньшей в 2–2,5 раза массой по сравнению с изделиями из металла, высокой технологичностью изготовления изделий и меньшей на 18–20% стоимостью.

Ключевые слова: полимербетон, фибробетон, заполнитель, связующее, фибра, корпус редуктора, центробежный насос, частота вращения, время перемешивания, методика, технология, прочность.

© Елемесов К.К., Наурызбаева Д.К., Крупник Л.А., Басканбаева Д.Д., Игбаева А.Е., 2021

Для цитирования

Изыскание новых конструкционных материалов и технологии изготовления прочных корпусов редукторов и центробежных насосов / Елемесов К.К., Наурызбаева Д.К., Крупник Л.А., Басканбаева Д.Д., Игбаева А.Е. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №1. С. 75–82. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-1-75-82>



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

RESEARCH ON NEW STRUCTURAL MATERIALS AND MANUFACTURING TECHNOLOGIES FOR ROBUST GEARBOX AND CENTRIFUGAL PUMP HOUSINGS

Yelemessov K.K., Nauryzbayeva D.K., Krupnik, L.A., Baskanbayeva D.D., Igbayeva A.E.

Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

Abstract. Problem statement. To prove that it is possible and feasible to use polymer concrete and fiber concrete as structural materials in mechanical engineering for manufacturing gearbox and centrifugal pump housings. **Methods applied.** When carrying out the research, we used theoretical studies with an experimental verification of their results in laboratory conditions, methods of the rational planning of experiments with a statistical processing of results, and bench tests of equipment samples. **The novelty** of the research is to justify the possibility and feasibility of using polymer concrete and fiber concrete as structural materials for mechanical engineering. **Results.** As a result of the research, for the first time the authors developed the methods for designing rational compositions of mixtures with a discontinuous granulometry of aggregates for the production of polymer concrete and fiber concrete and the technology for preparing mixtures and casting finished products. The paper describes how fundamental factors influenced the strength of polymer concrete and fiber concrete, which allowed us to develop a two-stage technology for manufacturing gearbox and centrifugal pump housings with a high degree of readiness, not requiring an additional processing. The results of theoretical and laboratory studies were verified during bench tests of manufactured samples of the TS2-250 gearbox with a polymer concrete body and the 4K6 centrifugal pump made of fiber concrete. These tests proved a number of advantages over metal products. **Practical relevance.** We have studied the behavior patterns of new structural materials (polymer concrete and fiber concrete) and recommend them as efficient structural materials to be used in machinery to manufacture some machines and mechanisms that will have several advantages: high strength, ability to work under rough conditions (corrosive environment, high dust levels, working with highly abrasive materials, etc.), weighing 2–2.5 times less than metal products, high technological efficiency of manufacturing products and a lower cost (by 18–20%).

Keywords: polymer concrete, fiber concrete, aggregate, binder, fiber, gearbox housing, centrifugal pump, speed, mixing time, technique, technology, strength.

For citation

Yelemessov K.K., Nauryzbayeva D.K., Krupnik, L.A., Baskanbayeva D.D., Igbayeva A.E. Research on New Structural Materials and Manufacturing Technologies for Robust Gearbox and Centrifugal Pump Housings. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021, vol. 19, no. 1, pp. 75–82. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-1-75-82>

Введение

На предприятиях горно-металлургического комплекса значительное количество оборудования работает в тяжелых условиях эксплуатации – это химическая агрессивная среда, высокая запыленность, резкая смена температуры, перекачка высокоабразивных жидкостей и др. На сегодняшний день для учёта влияния этих факторов при изготовлении оборудования используют дорогостоящие легированные стали, увеличивают толщину стенок механизмов и оборудования и т.д.

Все это приводит к существенному удорожанию оборудования, необходимости повышенных затрат на запасные части и ремонтные работы.

В то же время в ряде промышленных отраслей, в частности в строительстве, широко используются такие композиционные материалы, как полимербетоны и фибробетоны. Они обладают рядом положительных качеств, которые позволяют исключить влияние на изделия указанных выше негативных факторов.

Замена металла на композиты при изготовлении машин и механизмов, сопровождающаяся улучшением их технических характеристик является актуальной проблемой.

Новизной настоящих исследований является доказательство технической возможности и экономической целесообразности получения нового композиционного материала, который может быть использован в машиностроении при изготовлении оборудования для горно-металлургического комплекса.

Цель исследований заключается в изыскании рациональных составов полимербетона и фибробетона и технологии изготовления из них различного оборудования.

Для реализации указанной цели было необходимо решить ряд задач, среди которых основными были:

- изучение опыта использования полимербетона и фибробетона с целью оценки возможности использования этих композитов в машиностроении;

- изыскание рациональных материалов для полимербетона и фибробетона;
- разработка методики выбора рационального соотношения компонентов в смесях;
- разработка технологии, обеспечивающей простоту изготовления изделий из полимербетона и фибробетона.

Все эти задачи решались применительно к оборудованию, используемому на предприятиях горно-металлургического комплекса. В качестве такого оборудования авторами исследований были выбраны:

- корпус редуктора, для изготовления которого использовался полимербетон;
- рабочее колесо и корпус (улитка) одноступенчатого центробежного насоса из фибробетона.

В строительной индустрии при использовании композитных материалов предпочтение отдается использованию смесей, способных отверждаться холодным способом, то есть без привлечения дополнительных энергетических затрат. Композиционные материалы на основе полимерных вяжущих являются перспективными для работы в условиях агрессивной среды, что позволяет предполагать их целесообразность использования в машиностроении.

Одной из актуальных задач широкого использования композиционных материалов является изыскание рациональных составов смесей с заданными свойствами [1]. При решении задач, возникающих при этом, можно выделить два аспекта: материаловедческий и технологический. Первый заключается в установлении количественной и качественной связей между заполнителем, наполнителем и связующими компонентами полимербетонной и фибробетонной смеси. Второй аспект касается технологии приготовления полимербетонной и фибробетонной смеси, изготовления из нее деталей и элементов машин и механизмов. Методологической основой для решения указанных задач является модель смеси, которая рассматривается как сложнорегулируемая материальная система [2, 3]. Это позволяет всесторонне оценивать роль каждого из элементов и их комплекса на свойства полимербетона и фибробетона и изделий из них.

Формирование структуры и качественных характеристик полимербетона и фибробетона происходит на стадиях подбора компонентов смеси, их перемешивания для получения однородного материала, отверждения изделий. Причем режимы каждой конкретной стадии должны обеспечивать необходимое качество изделия по комплексу эксплуатационных показателей [4].

Улучшениям механических свойств композитных материалов посвящена работа [5]. Основная цель этого исследования состояла в том, чтобы установить роль различных типов пропитки волокон и измельченных базальтовых волокон на свежие и отверждаемые свойства самоуплотняющегося бетона. Эффект воздействия волокон наблюдался в улучшении прочности на изгиб и растяжение, а также на улучшенной пластичности. Базальтовые волокна показали лучшую технологичность, чем стальные волокна.

Проведенный анализ литературных источников по данному вопросу [6, 7] показал, что используемая технология приготовления полимербетона и фибробетона и предлагаемые методы определения их механических характеристик пригодны только для строительных изделий. Не выявлены работы, связанные с исследованиями по их использованию в качестве материала для изготовления корпусных деталей насосов и корпусов редукторов. Подбор оптимального состава компонентов и технология приготовления полимербетона и фибробетона, удовлетворяющих условиям эксплуатации оборудования, требует новых исследований. Механические характеристики полимербетона и фибробетона в принципе удовлетворяют возможности использовать их в машиностроении, но необходимо провести специальные исследования возможности их использования в машиностроении.

Полученные результаты и их обсуждение

Методы исследования. При проведении исследований был использован комплексный метод, включающий теоретические исследования по установлению рациональной структуры полимербетонных и фибробетонных смесей, лабораторные экспериментальные исследования по установлению оптимальных составов смесей и режимов их приготовления.

Проведена конструкторско-технологическая подготовка оснастки для отливки опытных образцов корпусов редукторов Ц2-250 из полимербетона и насоса 4К – 6 из фибробетона и их испытаний на специальных стендах. С целью минимизации количества экспериментов при их проведении был использован метод крутого восхождения Бокса-Уилсона [8]. При проведении экспериментов были использованы апробированные стандартные методики и приборы для фиксации физико-механических характеристик предложенных композиционных материалов и

характеристик изделий из них в процессе стендовых испытаний.

Это позволило получить ряд новых закономерностей, которые были использованы в рекомендациях по конструктивным и технологическим параметрам.

Результаты исследований. Одной из основных задач для получения полимербетона и фибробетона с характеристиками, обеспечивающими возможность их применения в машиностроении, был выбор исходных материалов и установление их рационального соотношения в смеси. Теоретическими исследованиями установлено, что наиболее рациональными являются смеси из трехкомпонентного заполнителя с прерывистой гранулометрией. В таких смесях пустоты в крупном заполнителе заполняются мелкой фракцией, а пустоты в последней заполняются тонкой фракцией. Причем крупная, мелкая и тонкая фракции по своим размерам должны отличаться на порядок.

Проведенный анализ показал, что по своим характеристикам для получения полимербетона и фибробетона в качестве конструкционного материала наиболее предпочтительны бутовый и гранитный щебень.

В лабораторных экспериментах использовались:

- в качестве крупного заполнителя – бутовый и гранитный щебень;
- в качестве мелкого заполнителя – кварцевый песок;
- в качестве тонкого наполнителя – кварцевая мука, индзитовая мука;
- в качестве армирующего элемента – стальная фибра (проволочная и анкерного типа), стекловолоконная;
- в качестве связующего элемента – эпоксидная смола ЭДН-20;
- отвердитель.

Стальная фибра имела следующие характеристики: диаметр – 0,6 мм, длина – 23,0 мм. Подвижность готовой смеси по осадке конуса СТРОЙЦНИЛ составляла 8–9 см.

Максимальный исходный размер бутового и гранитного щебня составлял 10 мм.

Проведенные эксперименты позволили рекомендовать рациональные составы полимербетона и фибробетона (табл. 1).

При минимальном расходе компонентов образцы полимербетона и фибробетона приведенных составов обладают высокими показателями прочности на изгиб и сжатие (табл. 2).

Таблица 1. Рациональные составы полимербетона и фибробетона

Table 1. Rational compositions of polymer concrete and fiber concrete

Наименование компонента	Содержание, % по массе	
	Полимербетон	Фибробетон
Бутовый щебень	51,0	-
Гранитный щебень	-	48,0
Кварцевый песок	25,5	25,0
Кварцевая мука	11,0	10,0
Стальная фибра	-	4,0
Смола ЭД	10,5	11,0
Отвердитель	2,0	2,0

Таблица 2. Показатели прочности образцов полимербетона и фибробетона

Table 2. Strength of polymer concrete and fiber concrete samples

Материал	Прочность, МПа	
	на сжатие	на изгиб
Полимербетон	188,0	63,0
Фибробетон	230,0	90,0

Показатели прочности полимербетона и фибробетона в 6–8 раз превосходят аналогичные показатели для металла, из которого изготавливаются корпуса редукторов и насосов.

Исследованиями установлено, что рациональной технологией изготовления корпусов редукторов из полимербетона и насосов из фибробетона является их отливка. Такая технология наиболее совершенна, малозатратна, исключает необходимость механической обработки деталей и обеспечивает высокую точность их изготовления.

Главной особенностью изготовления литых деталей является то, что все их свойства (физические, химические, механические и др.) формируются только при одном переделе – заливке смеси компонентов в литейную форму и ее кристаллизации в ней. Технология изготовления отливки в значительной мере формирует и определяет ее качество, а значит, и качество литой детали. Несовершенства конструирования литой детали из металла и неправильность выбора способа литья ведут к образованию значительных припусков на механическую обработку. Это вызывает создание излишнего станочного парка, инструментария, технологической оснастки, производственных площадей и пр. Причем все это направлено на перевод металла в стружку. При литье поверхностный слой отливки из ме-

талла имеет более мелкозернистую структуру повышенной твердости, а механической обработкой этот слой снимается. Чем больше предусмотрен припуск на механическую обработку, тем больше снимается упрочненный поверхностный слой, что ухудшает прочностные характеристики изделия и снижает срок его службы. Этих недостатков лишены полимербетон и фибробетон.

Однако процесс технологии и режимов отливки изделий из этих композитных материалов практически не исследован. Поэтому одной из задач исследований было установление ряда влияющих факторов на конечный показатель полимербетона и фибробетона – их прочность. Проведенный анализ показал, что основными влияющими факторами следует считать: частоту вращения рабочего органа смесителя, время перемешивания компонентов, температуру смолы, содержание фибры и температуру сушки отформованных изделий [9].

Частота вращения рабочего органа смесителя обеспечивает эффективное распределение компонентов смеси с равномерным их размещением во всем объеме. Это позволяет получить полимербетон с гарантированными характеристиками. При определенных частотах вращения смешиваемая масса отбрасывается к стенкам емкости и «завоздушивается». При последующей отливке не все пузырьки выделяются из смеси при вибрационном уплотнении, а следовательно, уменьшается живое сечение образцов. Поэтому важно установить частоту вращения рабочего органа, исключая негативные явления.

По результатам экспериментов установлена зависимость прочности нового материала от частоты вращения рабочего органа n , об/мин:

- для полимербетона

$$\sigma_{сж}^n = 0,0125 \cdot n + 68,896 \text{ МПа}, R^2 = 0,9865; \quad (1)$$

- для фибробетона

$$\sigma_{сж}^f = 8,6471 \cdot n + 747,844 \text{ МПа}, R^2 = 0,9352. \quad (2)$$

Одним из важнейших факторов, влияющих на качество полимербетонной смеси, является время перемешивания. Учитывая различие в характеристиках исходных материалов, оно должно быть достаточным для равномерного размещения всех компонентов в объеме смеси. Это обеспечит ее гомогенность, что, в свою очередь, дает возможность рационального ее размещения в формах без образования внутренних пустот (раковин), снижающих прочность затвердевшего материала.

Влияние на прочность полимербетона и фибробетона времени перемешивания компонентов t , мин, описывается следующими закономерностями:

- для полимербетона

$$\sigma_{сж}^n = 7,597 \cdot t + 56,988 \text{ МПа}, R^2 = 0,9114; \quad (3)$$

- для фибробетона

$$\sigma_{сж}^f = 2,1257 \cdot t + 93,212 \text{ МПа}, R^2 = 0,8702. \quad (4)$$

Важную роль в связывании компонентов смеси является температура смолы. Эпоксидно-дионовая смола ЭНД-20 представляет собой плавный реакционно-способный продукт на основе дифенилолпропана и эпихлоргидрина. ЭНД-20 комбинируется с разными отвердителями. Для ускорения пропитки рекомендуется нагревать смолу перед процессом смешивания. Для лучшего режима работы смолы как связующего было проведено исследование влияния температуры смолы на конечный результат – прочность затвердевшего полимербетона и фибробетона.

Прочность затвердевшего полимербетона и фибробетона зависит от температуры смолы T , °С, по следующим зависимостям:

- для полимербетона

$$\sigma_T^n = 7,5966 \cdot T + 56,988 \text{ МПа}, R^2 = 0,9104; \quad (5)$$

- для фибробетона

$$\sigma_T^f = 0,305 \cdot T + 51,82 \text{ МПа}, R^2 = 0,9672. \quad (6)$$

При отвердевании изделий из полимербетона очень важно соблюдать температурный режим в определенных пределах, который обеспечивает заданные прочностные характеристики. Сушка изделий происходит при достаточно высокой температуре, что требует большого расхода теплоты, а значит, и расхода электроэнергии.

С этой целью были проведены эксперименты с рекомендованными составами из полимербетона и фибробетона, определившие связь прочности полимербетона и фибробетона от температуры тепловой обработки готового изделия τ , °С:

- для полимербетона

$$\sigma_{сж}^n = 0,1542 \cdot \tau + 62,274, R^2 = 0,9842; \quad (7)$$

- для фибробетона

$$G_{сж}^f = 0,1707 \cdot \tau + 67,831, R^2 = 0,7244. \quad (8)$$

Использование стальной фибры в изделиях из фибробетона служит для повышения прочностных характеристик изделий из этого мате-

риала. Фибра является армирующим элементом и от ее расхода в объёме фибробетона зависят его прочностные характеристики.

Теоретическими исследованиями установлено, что недостаточное количество фибры не приносит желаемого результата по увеличению прочности фибробетона. В то же время избыток фибры делает смесь неудобоукладываемой, что не позволяет получить повышенную прочность изделия [10].

Проведенные результаты исследования по установлению оптимальной величины добавки фибры m , %, показали, что прочность фибробетона описывается уравнением

$$G_{сж}^{\Phi} = 0,8285m + 64,267. \quad (9)$$

Обсуждение результатов. Проведенные исследования позволили установить рациональное соотношение компонентов в полимербетонной и фибробетонной смесях, а также закономерности влияния на прочность затвердевших образцов ряда факторов.

Анализ полученных закономерностей позволяет сделать вывод о том, что прочность полимербетона растёт пропорционально увеличению частоты вращения рабочего органа. Это объясняется гомогенизацией смеси, что обеспечивает изотропность затвердевшего полимербетона. Однако для получения необходимой прочности полимербетона 75–80 МПа достаточна частота вращения 600–900 мин⁻¹. Дальнейшее увеличение частоты вращения приведёт к немотивированному перерасходу электроэнергии и увеличению стоимости полимербетона и фибробетона.

Для достижения требуемой прочности полимербетона и фибробетона вполне достаточно времени перемешивания компонентов 3–4 мин. Увеличение времени перемешивания не приводит к существенному росту прочности, поэтому его нерационально увеличивать.

Для достижения необходимой прочности изделий из полимербетона необходимо подогреть эпоксидную смолу до температуры 60°C.

Готовые изделия из полимербетона и фибробетона для окончательного набора прочности должны подвергаться сушке при определённой температуре. Проведенные исследования показали, что температура сушки существенно влияет на интенсивность набора прочности. Вместе с тем, как видно из полученных закономерностей, избыточная температура выше 200°C не приводит к существенному росту прочности и вполне достаточна для технологии сушки изделий из полимербетона и фибробетона с температурой $T_{суш}=120\text{--}130^{\circ}\text{C}$.

Важным с точки зрения получения оптимальной структуры фибробетона является необходимое количество фибры. Экспериментально доказано, что для получения конструкционного материала, который возможно использовать для изготовления насосов, достаточно 4–5% содержания фибры в смеси.

Толщина стенок корпуса редуктора из полимербетона составляла 15 мм, а улитки насоса – 12 мм.

Отлитые образцы корпуса редуктора Ц2-250 из полимербетона (рис. 1) и центробежного насоса 4К6 из фибробетона (рис. 2) были испытаны на специальных стендах и показали хорошую работоспособность и улучшенные технические показатели: снижение массы изделия в 2–2,5 раза, высокую прочность, позволившую уменьшить толщину стенок изделий на 12–15%, снизить себестоимость изготовления на 20%.



Рис. 1. Отлитые образцы корпуса редуктора Ц2-250 из полимербетона

Fig. 1. Cast samples of the TS2-250 gearbox housing made of polymer concrete



Рис. 2. Отлитые образцы корпуса центробежного насоса 4К6 из фибробетона

Fig. 2. Cast samples of the 4K6 centrifugal pump housing made of fiber concrete

Заклучение

Проведенные исследования позволили сделать следующие выводы:

1. Доказано, что полимербетон и фибробетон по своим техническим характеристикам и по экономическим показателям целесообразно использовать в качестве эффективных материалов для изготовления корпусов редукторов и центробежных насосов.

2. Разработана методика подбора рациональных составов полимербетона и фибробетона, обеспечивающих физико-механические характеристики новых конструкционных материалов для машиностроения.

3. Предложена двухстадийная технология приготовления полимербетона и фибробетона и установлены закономерности влияния на прочность затвердевших смесей ряда влияющих факторов, что позволило рекомендовать рациональные параметры этого процесса.

4. Приведенные стендовые испытания редуктора Ц2-250 с корпусом из полимербетона и насоса 4К6 из фибробетона показали их высокое качество и улучшенные характеристики.

Исследования проводились в рамках проекта грантового финансирования Республики Казахстан на 2018–2020 годы «Транспортное, сельскохозяйственное, нефтегазовое и горно-металлургическое оборудование. Прикладные исследования» по теме АР 05131236 «Модернизация горно-металлургического оборудования с использованием инновационных материалов и компоновок приводов».

Список литературы

1. Современное состояние производства полимербетонов / В.А. Горячева, А.А. Крещик, А.И. Христофоров и др. // Международный студенческий научный вестник. 2015. № 3–2. С. 230–231.
2. Исследование физико-механических свойств дисперсно-армированных бетонов / Р.Ф. Серова, Г.М. Рахимова, Е.А. Стапилович, С.Ж. Айдарбекова // Эпоха науки. 2018. №14. С. 192–200. DOI: 10.1555/2409-3203-2018-0-14-192-200
3. Figovsky O., Beilin D. Advanced Polymer Concretes and Compounds: монография. Boca Raton, 2013. 267 с.
4. Берсенева О.А., Кулемина О.А. Полимеры нового поколения // Современная химия: Успехи и достижения: материалы II Междунар. науч. конф. Чита, 2016. С. 27–29.
5. Мирошниченко К.К. Влияние технологии перемешивания и состава фибробетона на его долговечность и усадку // Современное промышленное и гражданское строительство. 2012. №1. С. 15–20. Т. 8. ISSN:1993-3495.
6. Ключев С. Высокопрочный фибробетон для промышленного и гражданского строительства // Инженерно-строительный журнал. 2012. № 8. С. 61–66.
7. Wang J., Ma Y., Zhang Y., Chen W. Experimental research and analysis on mechanical properties of chopped Basalt fiber reinforced concrete Gongcheng Lixue // Engineering Mechanics. 2014. 31 (SUPPL). Pp. 99–102.
8. Пухаренко Ю.В., Жаворонков М.И., Пантелеев Д.А. Совершенствование методов определения силовых и энергетических характеристик трещиностойкости фибробетона // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. Вып. 3. С. 301–310. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.3.301-310
9. Studying fiber – reinforced concrete for casting housing parts of pumps / Krupnik L.A., Yelemessov K.K., Bortebayev S.A., Baskanbayeva D.D. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. ISSN 1729-3774. 6/12. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.151038>
10. Use of air bellows for low-speed drive mechanisms / Krupnik L., Yelemessov K., Beisenov B., Baskanbayeva D., Sarybaev E. // International Journal of Scientific & Engineering Research. 2018. Vol. 9. Iss. 11. Pp.1106–1112. ISSN: 2229-5518.

References

1. Goryacheva V.A., Kreshchik A.A., Khristoforov A.I. et al. A current state of polymer concrete production. *Mezhdunarodnyi studencheskii nauchnyi vestnik* [International Student Scientific Bulletin], 2015, no. 3–2, pp. 230–231. (In Russ.)

2. Serova R.F., Rakhimova G.M., Stasilovich E.A., Aidarbekova S.Zh. Research on physical and mechanical properties of fiber reinforced concrete. *Epokha nauki* [Era of Science], 2018, no. 14, pp. 192–200. DOI 10.1555/2409-3203-2018-0-14-192-200.
3. Figovsky O., Beilin D. Advanced Polymer Concretes and Compounds: Monograph. Boca Raton, 2013, 267 p.
4. Berseneva O.A., Kulemina O.A. Polymers of a new generation. *Sovremennaya khimiya: Uspekhi i dostizheniya: materialy II Mezhdunar. nauch. konf.* [Modern chemistry: Success and achievement: proceedings of the 2nd International Scientific Conference]. Chita, 2016, pp. 27–29. (In Russ.)
5. Miroshnichenko K.K. Influence of the mixing technology and the fiber concrete composition on its durability and shrinkage. *Sovremennoe promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo* [Modern Industrial and Civil Construction], 2012, no. 1, pp. 15–20. Volume 8. ISSN:1993-3495. (In Russ.)
6. Klyuev S.V. High-strength fiber-reinforced concrete for industrial and civil construction. *Inzhenerno-stroitelnyi zhurnal* [Civil Engineering Journal], 2012, no. 8, pp. 61–66. (In Russ.)
7. Wang J., Ma Y., Zhang Y., Chen W. Experimental research and analysis on mechanical properties of chopped Basalt fiber reinforced concrete. *Gongcheng Lixue*. Engineering Mechanics. 2014. 31 (SUPPL). pp. 99–102.
8. Pukharens Yu.V., Zhavoronkov M.I., Panteleev D.A. Improvement of methods for determining the strength and energy characteristics of fiber concrete crack resistance. *Vestnik MGSU* [Vestnik MGSU. Monthly Journal on Construction and Architecture], 2019, vol. 14, no. 3, pp. 301–310. DOI: 10.22227/1997-0935. 2019.3.301-310.
9. Krupnik L.A., Yelemessov K.K., Bortebayev S.A., Baskanbayeva D.D. Studying fiber-reinforced concrete for casting housing parts of pumps. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. ISSN 1729-3774. 6/12. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.151038>.
10. L. Krupnik, K. Yelemessov, B. Beisenov, D.Baskanbayeva, E.Sarybaev. Use of air bellows for low-speed drive mechanisms. *International Journal of Scientific & Engineering Research*. 2018, volume 9, issue 11, pp. 1106–1112. ISSN 2229-5518.

Поступила 17.12.2020; принята к публикации 28.01.2021; опубликована 25.03.2021
Submitted 17/12/2020; revised 28/01/2021; published 25/03/2021

Елемесов Касым Коптлеуович – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Казахский национальный технический университет им. К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан.
Email: k.yelemessov@satbayev.university. ORCID 0000-0001-6168-2787

Наурызбаева Дильда Кенжехановна – доктор PhD по специальности «Нефтегазовое дело», проректор по научно-образовательной деятельности, ведущий научный сотрудник, Казахский национальный технический университет им. К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан.
Email: d.nauryzbayeva@satbayev.university. ORCID 0000-0002-8397-3267

Крупник Леонид Андреевич – доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, Казахский национальный технический университет им. К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан.
Email: leonkr38@mail.ru. ORCID 0000-0002-8813-231X

Басканбаева Динара Джумабаевна – магистр технических наук, старший научный сотрудник, Казахский национальный технический университет им. К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан.
Email: baskanbaeva@mail.ru. ORCID 0000-0003-1688-0666

Имбаева Акжаркын Есентаевна – магистр технических наук, младший научный сотрудник, Казахский национальный технический университет им. К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан.
Email: akzharkin91-91@mail.ru. ORCID 0000-0002-4825-454X

Kassym K. Yelemessov – PhD (Eng.), Associate Professor, Lead Researcher, Satbayev University, Almaty, the Republic of Kazakhstan.
Email: k.yelemessov@satbayev.university. ORCID 0000-0001-6168-2787

Dilda K. Nauryzbayeva – PhD in Oil and Gas Engineering, Vice-Rector for Research and Academic Affairs, Lead Researcher, Satbayev University, Almaty, the Republic of Kazakhstan.
Email: d.nauryzbayeva@satbayev.university. ORCID 0000-0002-8397-3267

Leonid A. Krupnik – DrSc (Eng.), Professor, Lead Researcher, Satbayev University, Almaty, the Republic of Kazakhstan.
Email: leonkr38@mail.ru. ORCID 0000-0002-8813-231X

Dinara D. Baskanbayeva – Master of Engineering, Senior Researcher, Satbayev University, Almaty, the Republic of Kazakhstan.
Email: baskanbaeva@mail.ru, ORCID 0000-0003-1688-0666

Akzharkyn E. Igbayeva – Master of Engineering, Junior Researcher, Satbayev University, Almaty, the Republic of Kazakhstan.
Email: akzharkin91-91@mail.ru, ORCID 0000-0002-4825-454X

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

УДК 621.515

DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-1-83-93



ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ПРОЕКТИРОВАНИЯ МАЛОРАСХОДНЫХ СТУПЕНЕЙ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ КОМПРЕССОРОВ ПУТЕМ СОЗДАНИЯ БАЗЫ ДАННЫХ ВИРТУАЛЬНЫХ РАБОЧИХ КОЛЕС ПО РЕЗУЛЬТАТАМ CFD-МОДЕЛИРОВАНИЯ

Иванов В.М., Кожухов Ю.В.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Обеспечение высококачественного проектного расчета проточной части центробежного компрессора производится с помощью соответствующих точных математических моделей. Точность математических моделей для проектирования проточной части обеспечивается качественной идентификацией матмодели. Идентификация производится на основе базы натуральных или виртуальных экспериментальных данных работы ступеней компрессора. Составление необходимой по своей полноте базы экспериментальных данных на основе натуральных испытаний является очень ресурсоёмким процессом и зачастую недоступным для производителей компрессоров. Альтернативой является создание качественной базы данных по результатам виртуальных испытаний, которая обеспечивает необходимую точность математической модели. В работе рассматриваются результаты разработки базы данных геометрических и газодинамических параметров рабочих колес малорасходных ступеней центробежных компрессоров на основе виртуальных испытаний, обеспечивающей высокое качество проектирования. Входные данные, представляющие геометрические параметры рабочего колеса, варьируются, тем самым изменяется форма проточной части рабочего колеса. С помощью цифрового двойника, построенного на основе параметризированной расчетной модели, выполняется численное моделирование средствами вычислительной газодинамики – CFD (computation fluid dynamic). Выходными данными являются основные газодинамические параметры, с помощью которых оценивается качество проточной части. Всего в базе данных находится 115020 числовых значений, полученных в результате моделирования 1620-ти рабочих колес с 71-м параметром каждое. Полученные данные могут быть структурированы, проанализированы и использованы для идентификации различных математических моделей потерь малорасходных ступеней центробежных компрессоров, предиктивного анализа характеристик рабочих колес и быстрого виртуального прототипирования компрессоров. Кроме того, база данных позволяет стандартизировать типоразмерные ряды ступеней центробежных компрессоров при производстве.

Ключевые слова: качество проектирования компрессоров, малорасходная ступень, центробежный компрессор, база данных.

© Иванов В.М., Кожухов Ю.В., 2021

Для цитирования

Иванов В.М., Кожухов Ю.В. Повышение качества проектирования малорасходных ступеней центробежных компрессоров путем создания базы данных виртуальных рабочих колес по результатам CFD-моделирования // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №1. С. 83–93. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-1-83-93>



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

IMPROVING THE DESIGN QUALITY OF LOW FLOW CENTRIFUGAL COMPRESSOR STAGES BY CREATING A DATABASE OF VIRTUAL IMPELLERS BASED ON CFD MODELING RESULTS

Ivanov V.M., Kozhukhov Yu.V.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia

Abstract. The high-quality design calculation of the flow part of a centrifugal compressor is made by means of appropriate accurate mathematical models. Accuracy of mathematical models for the design of the flow part is provided by a qualitative identification of a mathematical model. The identification is made using a database of full-scale or virtual experimental data of compressor stage operation. It is a very resource-intensive process to compile the required complete base of experimental data using full-scale tests and it is often unaffordable for compressor manufacturers. An alternative is to create a quality database using the results of virtual tests, which provides the necessary accuracy of the mathematical model. The paper deals with the results of developing a database of geometry and gas-dynamic parameters of impellers of low-flow centrifugal compressor stages using virtual tests, which provides a high quality design. The input data representing the geometry parameters of the impeller are varied, thereby changing the shape of the flow part of the impeller. By means of a digital twin built on the basis of a parameterized calculation model, a numerical simulation is carried out by means of computational fluid dynamics (CFD). The output data are the basic gas-dynamic parameters used to assess the quality of the flow part. Totally in the database there are 115,020 numerical values obtained by simulating 1620 impellers with 71 parameters each. The obtained data can be structured, analyzed and used to identify various mathematical models of losses of low flow centrifugal compressor stages, predictive analysis of impeller characteristics and rapid virtual compressor prototyping. In addition, the database will contribute to the standardization of size series of centrifugal compressor stages in production.

Keywords: compressor design quality, low flow stage, centrifugal compressor, database.

For citation

Ivanov V.M., Kozhukhov Yu.V. Improving the Design Quality of Low Flow Centrifugal Compressor Stages by Creating a Database of Virtual Impellers Based on CFD Modeling Results. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021, vol. 19, no. 1, pp. 83–93. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-1-83-93>

Введение

Для проектного расчета проточной части центробежного компрессора, который обеспечивает её высокие качественные характеристики, такие как высокий КПД и широкая зона устойчивой работы, необходимо иметь наборы геометрических параметров и газодинамических характеристик модельных ступеней, заранее отработанных и испытанных на экспериментальных стендах. На основании таких экспериментальных данных создаются математические модели потерь и напора. Обычно такие математические модели состоят из алгебраических функций в виде обобщающих зависимостей. Схема проточной части модельных двухзвенных ступеней, которые состоят из рабочего колеса и диффузора, приведена на **рис. 1**. Модельные ступени создаются для совершенствования расчетных методик и являются основой для разработки качественных методов проектирования центробежных компрессоров. Расчетные методики проектирования представляют собой математические модели, которые создаются в результате

априорного анализа данных и построения алгебраических функций с последующей идентификацией неизвестных коэффициентов обобщающих зависимостей. Неизвестные коэффициенты представляют из себя математическое описание свойств проектируемого объекта. Для качественной идентификации математической модели в большинстве случаев используется база экспериментальных данных. База данных для идентификации математических моделей расчета центробежных компрессоров состоит из структурированного набора геометрических и рабочих параметров для каждой отдельной ступени или компрессора, входящих в эту базу данных. Количество объектов, входящих в базу данных, может достигать десятков и сотен для задач расчета центробежных компрессоров. Натурный эксперимент является дорогостоящим и трудозатратным. Успехи численного моделирования позволяют создавать цифровые двойники ступеней и компрессоров, не уступающие по точности экспериментальным данным [1–6]. Цифровой двойник изделия – это совокупность данных, включающая в себя цифровую про-

странственную модель объекта и его рабочие характеристики, полученные в результате имитационного моделирования методами вычислительной газодинамики протекающего в объекте рабочего процесса, в частности параметров потока в ступени компрессора. Доступная в настоящее время скорость и автоматизация проведения цифрового моделирования объекта и его рабочих параметров позволяет создавать базу данных на основе не натурных, а численных экспериментов. Такая база данных может быть достаточно обширной и является эффективной заменой экспериментальных данных для идентификации математической модели ступеней и центробежных компрессоров целиком.

Поэтому целью данной работы является создание базы данных характеристик виртуальных рабочих колес применительно к малорасходным ступеням центробежных компрессоров по результатам CFD-моделирования как основа повышения качества проектирования.

Методы исследования

Быстродейственным и качественным способом создания обширной базы цифровых данных с высоким качеством входящих в него объектов является параметризованный подход. В работе [7] показан пример осуществления параметриза-

ции геометрической модели двухступенной ступени центробежного компрессора с осерадиальным рабочим колесом. Такой подход исключает ошибки в схеме ступени и обеспечивает высокое качество цифрового двойника компрессорной ступени или компрессора в целом. На **рис. 1** показана схема меридионального контура рабочего колеса (РК) центробежного компрессора с указанием размеров, являющихся одними из основных параметров параметризованной модели. Параметризация рабочего колеса, а также сами расчеты производились в рабочей среде Ansys Workbench 18.2 с подключением программных модулей DesignModeler, Turbogrid, CFX.

Точность создаваемых параметризованным способом цифровых моделей исследована в работе [8], где показано высокое качество создаваемых цифровых объектов, находящееся в пределах точности испытаний, регламентируемой стандартом [9]. В **табл. 1 и 2** представлены геометрические и газодинамические параметры численной базы данных, использующейся для идентификации математических моделей, для проектирования центробежных компрессоров и предсказания характеристик. Относительные геометрические параметры приведены к внешнему диаметру рабочего колеса D_2 , за исключением величин, для которых приведены формулы.

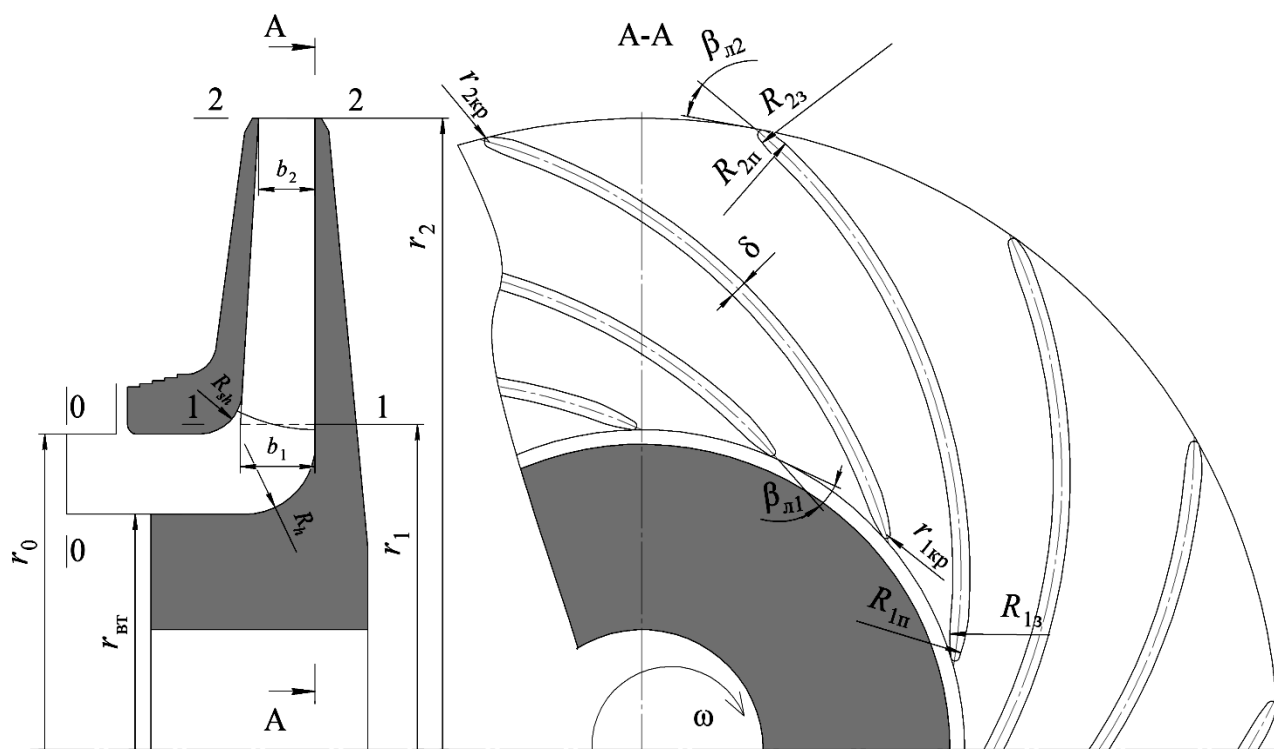


Рис. 1. Схема проточной части радиального рабочего колеса закрытого типа (меридиональный и радиальный вид)
Fig. 1. The flow part of the closed-type radial impeller (meridional and radial views)

По результатам расчетов и моделирования определяются параметры, указанные в табл. 2.

Таблица 1. Геометрические параметры численной базы данных

Table 1. Geometry parameters of the numeric database

№	Геометрические параметры	Обозначение
P1	Радиус рабочего колеса	r_2
P2	Относительный радиус входа в решетку рабочего колеса	$\bar{r}_1 = r_1 / r_2$
P3	Угол входа лопатки рабочего колеса	$\beta_{л1}$
P4	Угол выхода лопатки рабочего колеса	$\beta_{л2}$
P5	Относительная толщина лопатки	δ
P6	Относительный радиус втулки	$\bar{r}_{вт} = r_{вт} / r_2$
P7	Относительный радиус входа рабочего колеса	$\bar{r}_0 = r_0 / r_2$
P8	Относительная высота лопатки на входе в лопаточную решетку рабочего колеса	\bar{b}_1
P9	Относительная высота лопатки на выходе из решетки рабочего колеса	\bar{b}_2
P10	Относительный радиус закругления на входе передней поверхности лопатки	$\bar{R}_{1п}$
P11	Относительный радиус закругления на входе задней поверхности лопатки	$\bar{R}_{1з}$
P12	Относительный радиус закругления на выходе передней поверхности лопатки	$\bar{R}_{2п}$
P13	Относительный радиус закругления на выходе задней поверхности лопатки	$\bar{R}_{2з}$
P14	Относительный радиус закругления покрывающего диска	\bar{R}_{sh}
P15	Относительный радиус закругления основного диска	\bar{R}_h
P16	Относительный радиус закругления передней кромки	$\bar{r}_{1кр}$
P17	Относительный радиус закругления задней кромки	$\bar{r}_{2кр}$
P18	Число лопаток рабочего колеса	z
P19	Отношение площадей входа РК к входу решетки РК	K_F
P20	Отношение диаметров входа РК к входу решетки РК	K_D
P21	Параметр густоты решетки	$l/a_{ср}$
P22	Угол раскрытия эквивалентного конического диффузора	ν_3
P23	Средняя геометрическая диффузорность	F''_2 / F''_1
P24	Геометрическая диффузорность	$K_{гд}$
P25	Коэффициент стеснения на входе РК	τ_1
P26	Коэффициент стеснения на выходе РК	τ_2

Таблица 2. Газодинамические, термодинамические и дополнительные параметры численной базы данных

Table 2. Gas-dynamic, thermodynamic and auxiliary parameters of the numeric database

№	Газодинамические, термодинамические и дополнительные параметры	Обозначение
P27	Условный коэффициент расхода	Φ
P28	Условное число Маха	M_u
P29	Полное давление на входе	P^*_0
P30	Полная температура на выходе	T^*_0
P31	Массовый расход	\bar{m}
P32	Число оборотов ротора	N
P33	Политропный коэффициент полезного действия по полным параметрам	$\eta^*_п$
P34	Гидравлический коэффициент полезного действия	$\eta_г$
P35	Коэффициент полезного действия РК	$\eta_{рк}$
P36	Политропный коэффициент полезного действия по статическим параметрам	$\eta_{пол}$
P37	Коэффициент потерь поворотного колена в рабочем колесе	ζ_{90}
P38	Коэффициент потерь РК	$\zeta_{рк}$
P39	Коэффициент динамического напора	ψ_d
P40	Коэффициент внутреннего напора	ψ_i
P41	Коэффициент политропного напора	$\psi_{п}$
P42	Коэффициент политропного напора по полным параметрам	$\psi^*_п$
P43	Коэффициент теоретического напора	ψ_t
P44	Коэффициент потерь напора	ψ_w
P45	Теоретическая степень реактивности	Ω_t
P46	Комплекс показателей политропы	$n/(n-1)$
P47	Отношение давлений	Π
P48	Отношение давлений по полным параметрам	Π^*
P49	Степень сжатия на входе РК	ε_1
P50	Степень сжатия на выходе РК	ε_2
P51	Коэффициент расхода на входе РК	ϕ_0
P52	Коэффициент расхода на входе в решетку РК	ϕ_1
P53	Коэффициент расхода на выходе РК	ϕ_2
P54	Абсолютная скорость потока на входе РК	\bar{c}_1
P55	Абсолютная скорость потока на выходе РК	\bar{c}_2
P56	Относительная скорость на входе в РК	\bar{w}_1
P57	Относительная скорость на выходе в РК	\bar{w}_2
P58	Максимальная относительная скорость на передней кромке	\bar{w}_{max}
P59	Диффузорность потока	n_w
P60	Фактор диффузорности	F_D
P61	Радиус центра давления	$\bar{r}_д$
P62	Абсолютное число маха на входе РК	M_{c1}
P63	Абсолютное число маха на выходе РК	M_{c2}
P64	Относительное число маха на входе РК	M_{w1}
P65	Относительное число маха на выходе РК	M_{w2}
P66	Угол относительного потока на выходе РК	β_2
P67	Угол относительного потока на входе РК	β_1
P68	Абсолютный угол потока на входе РК	α_1
P69	Абсолютный угол потока на выходе РК	α_2
P70	Угол атаки	i
P71	Угол отставания	$\Delta\beta$

Результаты

Набор газодинамических характеристик и геометрические параметры ступеней центробежных компрессоров формируют управляемые электронные базы данных [10, 11]. Такие базы данных могут использоваться для предиктивного анализа, например для замены или оценки деградации проточной части [12, 13].

С помощью разработанного подхода проведено параметрическое исследование $N=1620$ упрощенных численных моделей рабочих колес малорасходных ступеней центробежных компрессоров средствами *CFD* в диапазоне $0,004 < \Phi_{\text{расч}} < 0,02$; $0,50 < M_u < 0,80$; $0,50 < b_1/b_2 < 1,0$; $0,30 < \bar{r}_{\text{вн}} < 0,50$; $30^\circ < \beta_{\text{л2}} < 50^\circ$; $12 < z < 16$.

Ниже приведен ряд зависимостей, использующихся в компрессоростроении [14] для анализа геометрических и газодинамических характеристик ступеней. Формулы (1)–(7) использованы при формировании табличной базы данных. Зависимости определяют соотношения между геометрическими параметрами проточной части и позволяют классифицировать ее форму, дополнение газодинамическими параметрами позволяет установить связь между геометрической формой и параметрами, определяющими аэродинамическое качество проточной части. На этом основании выполняется априорный анализ базы данных, и выводятся аналитические зависимости, которые могут быть использованы для построения математической модели.

Коэффициент геометрической диффузорности с учетом стеснения

$$K'_{\text{гд}} = \frac{\bar{r}_1 \bar{b}_1 \sin \beta_{\text{л1}} \tau_1}{\bar{b}_2 \sin \beta_{\text{л2}} \tau_2}, \quad (1)$$

где r_d – радиус точки приложения аэродинамической силы на лопатку, м; τ_1 и τ_2 – коэффициенты стеснения потока на входе и выходе рабочего колеса соответственно.

Для анализа использован параметр густоты решетки

$$\frac{l}{a_{\text{ср}}} = \frac{(1 - \bar{r}_1)}{\frac{\pi}{z}(1 + \bar{r}_1) \tau_{\text{ср}} \sin^2 \left(\frac{\beta_{\text{л1}} + \beta_{\text{л2}}}{2} \right)}, \quad (2)$$

где $\tau_{\text{ср}}$ – среднеарифметический коэффициент стеснения потока рабочего колеса.

Средняя геометрическая диффузорность

$$\frac{F_2^*}{F_1^*} = \frac{D_2 b_2 \tau_2 \sin \beta_{\text{л2}}}{D_1 b_1 \tau_1 \sin \beta_{\text{л1}}}. \quad (3)$$

Угол раскрытия эквивалентного конического диффузора

$$\text{tg} \frac{\nu_3}{2} \approx \sqrt{\frac{b_2}{D_2}} \frac{\sqrt{\tau_2 \sin \beta_{\text{л2}}} - \sqrt{\frac{D_1}{D_2} \frac{b_1}{b_2} \tau_1 \sin \beta_{\text{л1}}}}{\sqrt{z(1 - \frac{D_1}{D_2})}} \times \quad (4)$$

$$\times 2 \sin 0,5(\beta_{\text{л1}} + \beta_{\text{л2}}).$$

Выходные данные могут быть определены по следующим формулам:

- коэффициент политропного напора по полным параметрам

$$\Psi_{\text{п}}^* = \Psi_{\text{п}} + \Psi_{\text{д}}; \quad (5)$$

- гидравлический КПД

$$\eta_{\text{г}} = \frac{\Psi_{\text{п}}^*}{\Psi_{\text{т}}}; \quad (6)$$

- коэффициент потерь рабочего колеса

$$\zeta_{\text{рк}} = \frac{2(\Psi_{\text{т}} - \Psi_{\text{п}}^*)}{\bar{w}_1^2}. \quad (7)$$

На **рис. 2, 3** показано распределение основных геометрических параметров, составляющих базу данных.

База данных может быть проанализирована и ограничена по наиболее используемым в промышленности рабочим колесам, а также рекомендациям проектирования. Значения рассчитанного распределения геометрической диффузорности с учетом стеснения находится в диапазоне от 0,12 до 0,72. Параметр густоты решетки рабочего колеса находится в диапазоне значений от 2,88 до 20. Средняя геометрическая диффузорность находится в диапазоне значений от 1,4 до 8,1. Значение угла раскрытия эквивалентного конического диффузора находится в диапазоне значений от 0,93 до 9°. В данном случае целесообразно ограничить варианты до приемлемых значений, представленных в различной литературе, например в диапазоне значений $l/a_{\text{ср}} = 3,0 \dots 10,0$.

На **рис. 4** показано распределение коэффициента теоретического и политропного напора по полным параметрам рабочего колеса. На **рис. 5** показано распределение гидравлического коэффициента полезного действия и коэффициента потерь в рабочем колесе.

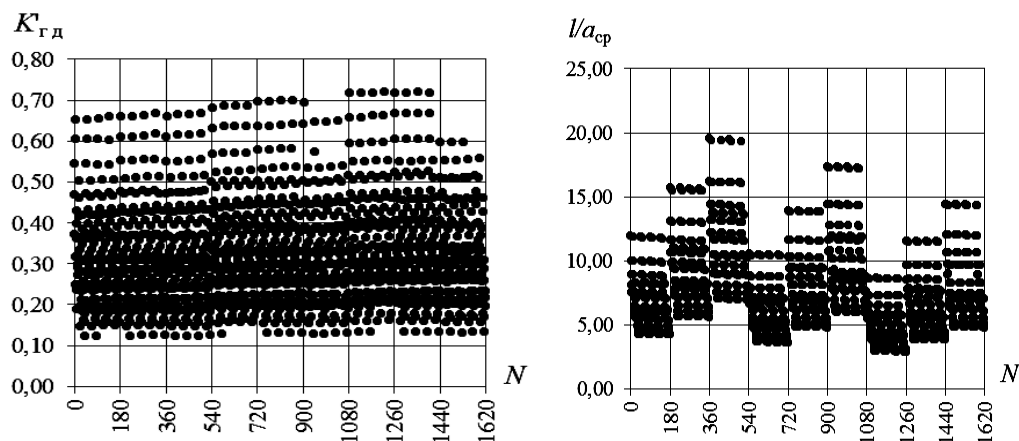


Рис. 2. Распределение коэффициента геометрической диффузности с учетом стеснения и параметра плотности решетки рабочего колеса

Fig. 2. Distribution of the geometry diffusion airfoil factor, considering constraint and density of the impeller grid

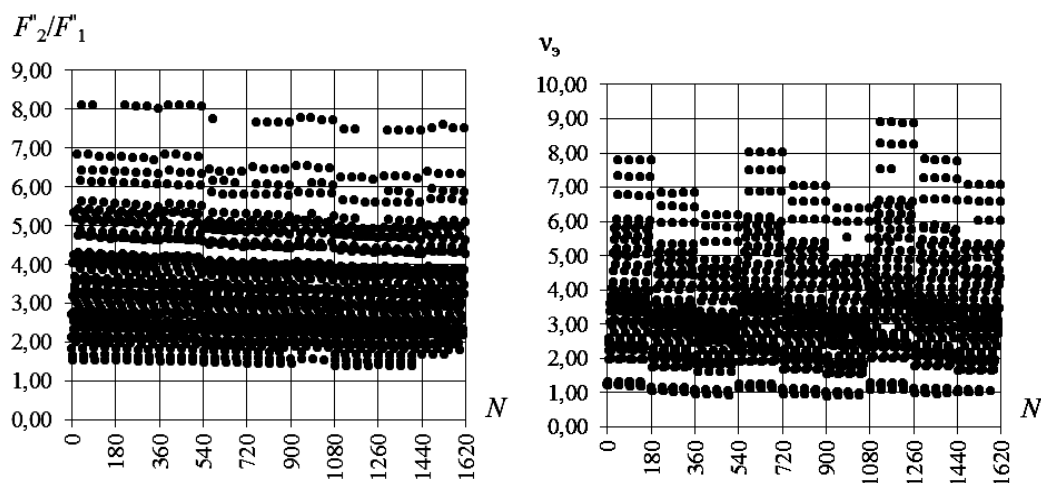


Рис. 3. Распределение средней геометрической диффузности и угла раскрытия эквивалентного конического диффузора рабочего колеса

Fig. 3. Distribution of the mean geometry diffusion airfoil and the expansion angle of the equivalent cone diffuser of the impeller

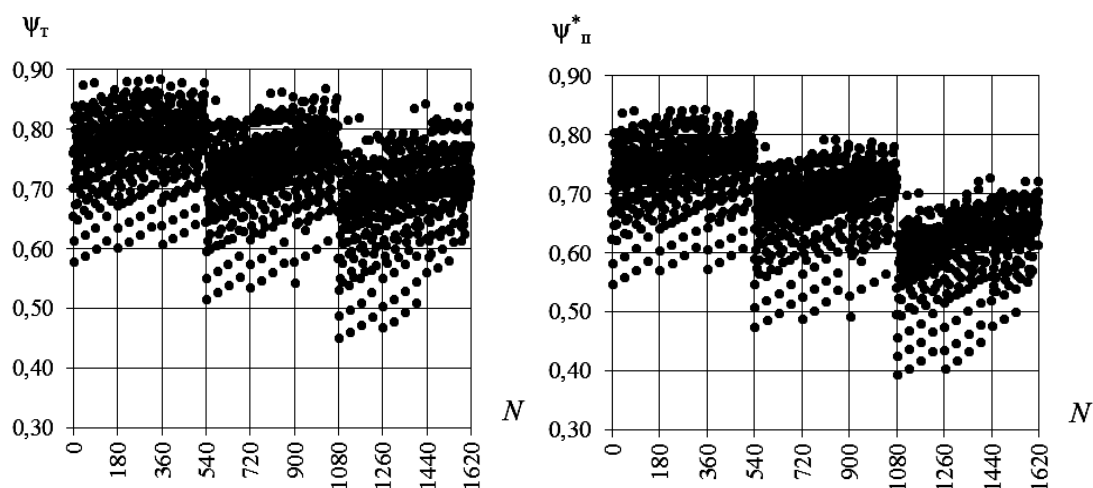


Рис. 4. Распределение коэффициента теоретического и политропного напора по полным параметрам рабочего колеса

Fig. 4. Distribution of the theoretical and polytropic flows by complete parameters of the impeller

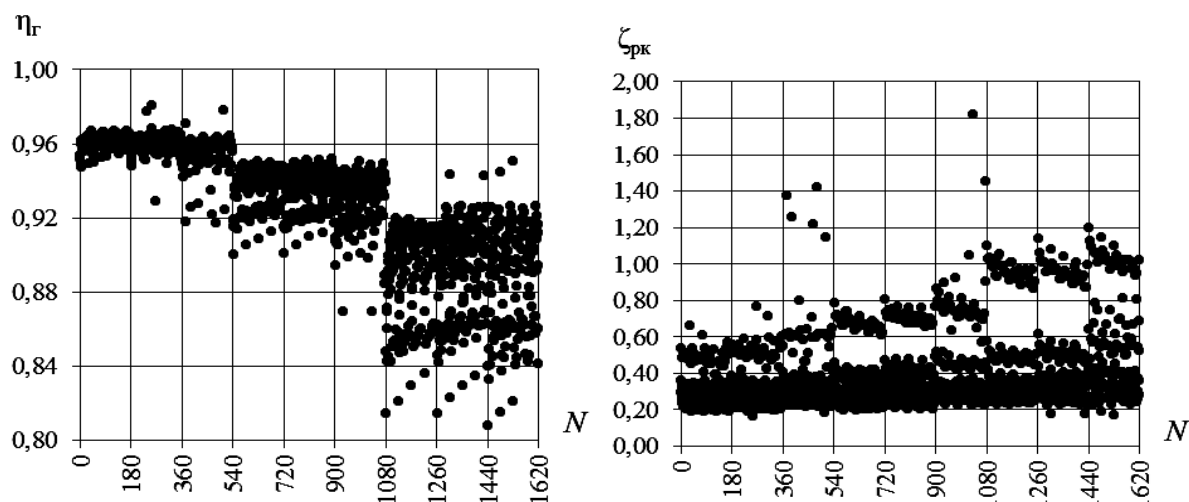


Рис. 5. Распределение гидравлического коэффициента полезного действия и коэффициента потерь в рабочем колесе

Fig. 5. Distribution of hydraulic efficiency and the loss factor in the impeller

В рассмотренных ступенях коэффициент теоретического напора рабочих колес варьируется в диапазоне значений от 0,45 до 0,89, коэффициент политропного напора в диапазоне значений от 0,40 до 0,84, гидравлический КПД в диапазоне значений от 0,98 до 0,80, коэффициент потерь в рабочем колесе в диапазоне значений от 0,16 до 1,8.

Всего в базе находится $71 \cdot 1620 = 115020$ числовых значений, полученных в результате моделирования 1620-ти рабочих колес с 71-м параметром каждое. Полученные данные могут быть структурированы, проанализированы и использованы для идентификации различных математических моделей потерь малорасходных ступеней центробежных компрессоров на основе численной базы данных. Полученная численная табличная база данных была использована для создания алгебраической математической модели напора [15] в виде обобщающих зависимостей, которая была верифицирована на независимых экспериментальных данных. Полученные обобщающие зависимости следующие.

Зависимость для расчета фактора диффузорности рабочего колеса:

$$F_D = (0,012 z + 0,084 M_u + 0,124 \beta_{л2} \text{ (в рад)} + 0,084 \bar{D}_{вт} - 1,223) K'_{гд} + 0,77. \quad (8)$$

Зависимость для определения диффузорности рабочего колеса:

$$n_w = (0,054 \beta_{л2} \text{ (в рад)} + 0,381 z + 0,310) F_D^2 + (0,318 \beta_{л2} \text{ (в рад)} - 0,359 z + 2,576) F_D + (-0,410 \beta_{л2} \text{ (в рад)} + 0,096 z + 0,287). \quad (9)$$

С учетом соотношения $n_w = w_1 / w_2$ и при известном значении относительной скорости на входе w_1 определяется коэффициент теоретического напора по формуле

$$\psi_T = 1 - \sqrt{\bar{w}_2^2 - \phi_2^2}, \quad (10)$$

где $\bar{w}_2 = w_2 / u_2$ – безразмерная относительная скорость потока на выходе из рабочего колеса; u_2 – окружная скорость вращения рабочего колеса на наружном диаметре; ϕ_2 – коэффициент расхода рабочего колеса.

Для учета перетечек через зазор покрывающего диска используется уточняющая зависимость:

$$\psi_T^{пр} = 1 - \frac{1 + \beta_{пр}}{0,985} (1 - \psi_T), \quad (11)$$

где $\beta_{пр}$ – относительные протечки через зазоры у покрывающего и основного дисков.

В табл. 3 приведены результаты расчета коэффициента теоретического напора по обобщающим зависимостям (8)–(11), полученным с помощью базы данных в сравнении с известными формулами [14] для центробежных компрессоров общепромышленного назначения. В качестве объектов использовались численные модели [8], использованные для валидации результатов численного CFD-моделирования с экспериментальными данными.

Таблица 3. Результаты расчета коэффициента теоретического напора по обобщающей зависимости, полученной с помощью базы данных

Table 3. The theoretical flow factor calculated by a generalized dependence determined by the database

Параметр	Малорасходная ступень центробежного компрессора					
	Q508	R508	S508	T508	U508	V508
$K_{гд}$	0,407	0,407	0,407	0,407	0,407	0,407
$l/a_{ср}$	3,88	3,88	3,88	3,88	3,88	3,88
Φ_p	0,0172	0,0141	0,0127	0,0107	0,0095	0,0070
M_u	0,785	0,802	0,802	0,802	0,802	0,802
F_D	0,530	0,532	0,532	0,532	0,532	0,532
φ_1	0,360	0,342	0,353	0,342	0,347	0,297
φ_2	0,142	0,135	0,140	0,137	0,140	0,121
\bar{w}_1	0,601	0,591	0,597	0,591	0,594	0,566
\bar{w}_2	0,343	0,335	0,339	0,336	0,337	0,321
$\beta_{пр}$	0,018	0,022	0,024	0,028	0,030	0,041
$\Psi_{г (CFD-моделирование [8])}$	0,684	0,686	0,676	0,676	0,669	0,694
$\Psi_{г пр}^{пр}$ (по формуле (11))	0,677	0,681	0,679	0,680	0,679	0,686
$\Psi_{г}$ (по А. Стодоле)	0,710	0,717	0,712	0,715	0,711	0,731
$\Psi_{г}$ (по К. Пфлейдереру)	0,728	0,735	0,730	0,733	0,730	0,746
$\Psi_{г}$ (по Б. Экку)	0,745	0,751	0,746	0,749	0,746	0,763
$\Psi_{г}$ (по С. Лившицу)	0,873	0,873	0,873	0,873	0,873	0,873

Из табл. 3 видно, что расчет по существующим формулам отличается от результатов CFD-моделирования в сторону увеличения теоретического напора. Это связано, прежде всего, с известными эффектами вязкости газа, наиболее сильно проявляющимися в малорасходных в отличие от среднерасходных ступеней центробежных компрессоров. Использование обобщенных результатов расчета вязкого трехмерного потока позволяет в некоторой степени учесть указанные недостатки и производить проектирование точ-

нее. Также база данных может быть использована для быстрой моделирования газодинамических характеристик малорасходных ступеней центробежных компрессоров [16–22], а также для идентификации существующих математических моделей расчета проточной части компрессорных ступеней [23, 24 и др.].

Заключение

В результате исследования выполнена разработка численной базы данных, содержащей 71 геометрический и газодинамический параметр для каждой из 1620-ти входящих в неё виртуальных рабочих колес малорасходных ступеней центробежных компрессоров. В большинстве случаев для проектирования и анализа центробежных компрессоров используется наработанная экспериментальная база данных, расширение которой достаточно трудо- и ресурсозатратно. Современные методы вычислительной газодинамики позволяют создавать цифровые двойники ступеней центробежных компрессоров с приемлемой точностью. Повышение качества проектирования было достигнуто за счет решения задач стандартизации, а именно предоставления возможности унификации процесса проектирования производства малорасходных рабочих колес и ступеней центробежного компрессора для конкретных предприятий, а также стандартизировать типоразмерные ряды рабочих колес и ступеней при производстве. Стандартизация стала возможной благодаря переходу класса задач проектирования с научного уровня, требующего применения научных методов проектирования, проведения серии натурных и численных экспериментов на суперкомпьютере, в инженерный. Данный переход позволяет снизить трудоемкость и стоимость проектирования, а также увеличить число конкурентов среди производителей компрессоров. В результате процесс проектирования стал обладать лучшими характеристиками в соотношении цена-качество, в том числе за счет привлечения в проектирование большего числа проектных центров или организаций.

Список литературы

1. Карташов С.В., Кожухов Ю.В. Обоснование выбора расчетной области в задачах моделирования вязкого потока в малорасходных ступенях центробежного компрессора // Холодильная техника. №1. 2020. С. 22–27.
2. Рахманина Л.А., Аксенов А.А. Исследование влияния неравномерного распределения абсолютной скорости потока на входе в осерadiальное рабочее колесо центробежного компрессора с применением методов численного моделирования в Ansys CFX // Компрессорные технологии. №2. 2019. С. 18–25.
3. Чеглаков И.В., Кожухов Ю.В. Результаты моделирования пространственного течения в радиальном рабочем колесе центробежного компрессора с применением программного пакета Fine/Turbo // Неделя науки СПбГПУ: материалы научно-практической конференции с международным участием. СПб.: Ин-т энергетики и транспортных систем, 2014. С. 221–223.

4. Яблоков А.М., Кожухов Ю.В., Садовский Н.И. Численное исследование влияния эквивалентной песочной шероховатости рабочего колеса на характеристики малорасходной ступени центробежного компрессора // Вестник Международной академии холода. 2020. № 4. С. 3–11. DOI: 10.17586/1606-4313-2020-19-4-3-11
5. Исследование влияния величины осевого зазора между покрывающим диском рабочего колеса и корпусом центробежного компрессора на газодинамические характеристики малорасходной модельной ступени/ Яблоков А.М., Штаничев Р.А., Садовский Н.И., Кожухов Ю.В. // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2020. №5 (134). С. 106–120.
6. Яблоков А.М., Кожухов Ю.В., Лебедев А.А. Исследование течения в малорасходной ступени центробежного компрессора методами вычислительной газодинамики // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. № 4(231)/2015. С. 59–69.
7. Расчетная модель при численной оптимизации рабочих колес центробежных компрессоров / Неверов В.В., Кожухов Ю.В., Яблоков А.М., Лебедев А.А. // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2016. № 4 (254). С. 45–58.
8. Иванов В.М., Кожухов Ю.В. Результаты численного моделирования вязкого потока в малорасходных ступенях центробежных компрессоров как основа создания математической модели напора // Холодильная техника. №3. 2020. С. 24–29.
9. ISO 5389:2005. Turbocompressors – Performance test code.
10. Кубышкин Н.А., Данилишин А.М. Система управления базами данных центробежных компрессоров // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием. 2016. С. 186–188.
11. Воронов А.Г., Воронов Г.Ф. Разработка и формирование элементов электронных баз данных по результатам аэродинамических испытаний концевых ступеней центробежных компрессоров // Вестник Казанского технологического университета. 2013. №2.
12. Ванияшов А.Д., Карабанова В.В., Сорокин М.А. Техничко-экономическое обоснование замены СПЧ на Сенноманских ДКС Уренгойского месторождения // Компрессорные технологии. №1. 2019. С. 30–33.
13. Lucas Radika, Jones Andy, Ford Wesley, Doyle Matt (2018). The effective use of data analytics in an advanced compressor performance and degradation monitoring system. The APPEA Journal 58, 723–727. DOI: 10.1071/AJ17086.
14. Селезнев К.П. Теория и расчет турбокомпрессоров. Л.: Машиностроение, 1986. 389 с.
15. Иванов В.М., Кожухов Ю.В. Математическая модель напора малорасходных рабочих колес дожимных центробежных компрессоров тепловых электростанций // Новое в российской электроэнергетике. 2019. №12. С. 12–20.
16. F. Chu, B. Dai, W. Dai, R. Jia, X. Ma and F. Wang, "Rapid Modeling Method for Performance Prediction of Centrifugal Compressor Based on Model Migration and SVM," in IEEE Access, vol. 5, pp. 21488-21496, 2017. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2753378.
17. J. Fei, N. Zhao, Y. Shi, Y. Feng, and Z. Wang, "Compressor performance prediction using a novel feed-forward neural network based on Gaussian kernel function", Adv. Mech. Eng., vol. 8, no. 1, pp. 1–14, Jan. 2016.
18. Hongsheng Jiang, Sujun Dong, Zheng Liu, Yue He, Fengming Ai, "Performance Prediction of the Centrifugal Compressor Based on a Limited Number of Sample Data", Mathematical Problems in Engineering, vol. 2019, Article ID 5954128, 13 pages, 2019. DOI: 10.1155/2019/5954128.
19. Xi G., Wang Z., Li X., & Wang S. "Aerodynamic Design and Experimental Validation of Centrifugal Compressor Impellers With Small Flow Rate." Proceedings of the ASME Turbo Expo 2009: Power for Land, Sea, and Air. Volume 7: Turbomachinery, Parts A and B. Orlando, Florida, USA. June 8–12, 2009. pp. 1331–1338. ASME. DOI: 10.1115/gt2009-59785.
20. Tamaki H., Kawakubo T., Unno M., Abe S., & Majima K. Performance Improvement of Multistage Centrifugal Compressor With Low Flow-Rate Stages Based on Factory Acceptance Test Data. Proceedings of the ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition. Volume 2D: Turbomachinery. Düsseldorf, Germany. June 16–20, 2014. V02DT42A006. ASME. DOI: 10.1115/GT2014-25156.
21. Xu C., & Amano R.S. Development of a Low Flow Coefficient Single Stage Centrifugal Compressor. Proceedings of the ASME Turbo Expo 2005: Power for Land, Sea, and Air. Volume 6: Turbo Expo 2005, Parts A and B. Reno, Nevada, USA. June 6–9, 2005. pp. 793–799. ASME. DOI: 10.1115/GT2005-68006.
22. Lettieri C., Baltadjiev N., Casey M., & Spakovszky Z. Low-Flow-Coefficient Centrifugal Compressor Design for Supercritical CO₂. Proceedings of the ASME Turbo Expo 2013: Turbine Technical Conference and Exposition. Volume 6C: Turbomachinery. San Antonio, Texas, USA. June 3–7, 2013. V06CT40A008. ASME. DOI: 10.1115/GT2013-95012.
23. Violette M., Cyril P., and Jürg S. (October 24, 2018). "Data-Driven Predesign Tool for Small-Scale Centrifugal Compressor in Refrigeration." ASME. J. Eng. Gas Turbines Power. December 2018; 140(12): 121011. DOI: 10.1115/1.4040845.
24. Дроздов Ю.В., Лунев А.Т. Применение математической модели центробежной ступени при проектировании и обработке экспериментальных данных // Компрессорная техника и пневматика №3. 2010. С. 32–36.

References

1. Kartashov S.V., Kozhukhov Yu.V. Rationale for the selection of a calculation area, when simulating a viscous flow in low-flow stages of a centrifugal compressor. *Kholodilnaya tekhnika* [Refrigeration Engineering], 2020, no. 1, pp. 22–27. (In Russ.)
2. Rakhmanina L.A., Aksenov A.A. Study on the influence of a non-uniform distribution of absolute flow velocity at the inlet to the axial centrifugal compressor impeller using numerical simulation methods in Ansys CFX. *Kompres-sornye tekhnologii* [Compressor Technologies], 2019, no. 2, pp. 18–25. (In Russ.)
3. Cheglakov I.V., Kozhukhov Yu.V. Results of simulating a three-dimensional flow in the radial impeller of a centrifugal compressor using the Fine/Turbo software package. *Nedelya Nauki SPbGPU: materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem. SPb Institut energetiki i transportnykh sistem.* [The Science Week at Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University: Proceedings of the Scientific and Practical Conference with International Participants. The Saint Petersburg Institute of Power Engineering and Transportation Systems], 2014, pp. 221–223. (In Russ.)
4. Yablokov A.M., Kozhukhov Yu.V., Sadovsky N.I. Numerical study of the influence of equivalent sand roughness of an impeller on characteristics of a low-flow centrifugal compressor stage. *Vestnik Mezhdunarodnoy akademii kholoda* [Journal of the International Academy of Refrigeration], 2020, no. 4, pp. 3–11. DOI: 10.17586/1606 4313 2020 19 4-3-11.
5. Yablokov A.M., Shtanichev R.A., Sadovsky N.I., Kozhukhov Yu. V. Research on the influence of the value of axial clearance between an impeller covering disk and a centrifugal compressor body on gas-dynamic characteristics of a low-flow model stage. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. Seriya Mashinostroyeniye* [Herald of Bauman Moscow State Technical University. Series: Mechanical Engineering], 2020, no. 5 (134), pp. 106–120. (In Russ.)
6. Yablokov A.M., Kozhukhov Yu.V., Lebedev A.A. Research on a flow in a low-flow stage of a centrifugal compressor by methods of computational gas dynamics. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU* [St. Petersburg State Polytechnic University Journal], 2015, no. 4 (231), pp. 59–69. (In Russ.)
7. Neverov V.V., Kozhukhov Yu.V., Yablokov A.M., Lebedev A.A. A calculation model for numerical optimization of centrifugal compressor impellers. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU* [St. Petersburg State Polytechnic University Journal], 2016, no. 4 (254), pp. 45–58. (In Russ.)
8. Ivanov V.M., Kozhukhov Yu.V. Numerical simulation of a viscous flow in low-flow stages of centrifugal compressors as a basis for creating a mathematical model of pressure head. *Kholodilnaya tekhnika* [Refrigeration Engineering], 2020, no. 3, pp. 24–29. (In Russ.)
9. ISO 5389:2005. Turbocompressors – Performance test code.
10. Kubyshev N.A., Danilishin A.M. The centrifugal compressor database management system. *Nedelya Nauki SPbGPU: materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem. SPb Institut energetiki i transportnykh sistem.* [The Science Week at Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University: Proceedings of the Scientific and Practical Conference with International Participants. The Saint Petersburg Institute of Power Engineering and Transportation Systems], 2016, pp. 186–188. (In Russ.)
11. Voronov A.G., Voronov G.F. Development and formation of elements of electronic databases on the results of aerodynamic tests of end stages of centrifugal compressors. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Vestnik of Kazan Technological University], 2013, no. 2. (In Russ.)
12. Vanyashov A.D., Karabanova V.V., Sorokin M.A. Feasibility study on compressor re-wheeling at the Senoman booster compressor stations of the Urengoy field. *Kompres-sornye tekhnologii* [Compressor Technologies], 2019, no. 1, pp. 30–33. (In Russ.)
13. Lucas Radika, Jones Andy, Ford Wesley, Doyle Matt (2018). The effective use of data analytics in an advanced compressor performance and degradation monitoring system. *The APPEA Journal* 58, 723–727. DOI: 10.1071/AJ17086.
14. Seleznev K.P. *Teoriya i raschet turbokompressorov* [Theory and calculation of turbocompressors]. Leningrad: Mashinostroyeniye, 1986, 389 p. (In Russ.)
15. Ivanov V.M., Kozhukhov Yu.V. A mathematical model of pressure head of low-flow impellers of booster centrifugal compressors at thermal power plants. *Novoe v rossiyskoy elektroenergetike* [News of Russian Electric Power Engineering], 2019, no. 12, pp. 12–20. (In Russ.)
16. F. Chu, B. Dai, W. Dai, R. Jia, X. Ma and F. Wang. Rapid modeling method for performance prediction of centrifugal compressor based on model migration and SVM. *IEEE Access*, vol. 5, pp. 21488–21496, 2017. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2753378.
17. J. Fei, N. Zhao, Y. Shi, Y. Feng, and Z. Wang. Compressor performance prediction using a novel feed-forward neural network based on Gaussian kernel function. *Adv. Mech. Eng.*, vol. 8, no. 1, pp. 1–14, Jan. 2016.
18. Hongsheng Jiang, Sujun Dong, Zheng Liu, Yue He, Fengming Ai. Performance prediction of the centrifugal compressor based on a limited number of sample data. *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2019, Article ID 5954128, 13 pages, 2019. DOI: 10.1155/2019/5954128.

19. Xi G., Wang Z., Li X., Wang S. Aerodynamic design and experimental validation of centrifugal compressor impellers with small flow rate. Proceedings of the ASME Turbo Expo 2009: Power for Land, Sea, and Air. Volume 7: Turbomachinery, Parts A and B. Orlando, Florida, USA. June 8–12, 2009. pp. 1331–1338. ASME. DOI: 10.1115/gt2009-59785.
20. Tamaki H., Kawakubo T., Unno M., Abe S., Majima K. Performance improvement of multistage centrifugal compressor with low flow-rate stages based on factory acceptance test data. Proceedings of the ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition. Volume 2D: Turbomachinery. Düsseldorf, Germany. June 16–20, 2014. V02DT42A006. ASME. DOI: 10.1115/GT2014-25156.
21. Xu C., Amano R.S. Development of a low flow coefficient single stage centrifugal compressor. Proceedings of the ASME Turbo Expo 2005: Power for Land, Sea, and Air. Volume 6: Turbo Expo 2005, Parts A and B. Reno, Nevada, USA. June 6–9, 2005. pp. 793–799. ASME. DOI: 10.1115/GT2005-68006.
22. Lettieri C., Baltadjiev N., Casey M., Spakovszky Z. Low-flow-coefficient centrifugal compressor design for supercritical CO₂. Proceedings of the ASME Turbo Expo 2013: Turbine Technical Conference and Exposition. Volume 6C: Turbomachinery. San Antonio, Texas, USA. June 3–7, 2013. V06CT40A008. ASME. DOI: 10.1115/GT2013-95012.
23. Violette M., Cyril P., and Jürg S. (October 24, 2018). Data-driven predesign tool for small-scale centrifugal compressor in refrigeration. ASME. J. Eng. Gas Turbines Power. December 2018; 140(12): 121011. DOI: 10.1115/1.4040845.
24. Drozdov Yu.V., Lunev A.T. Application of a mathematical model of a centrifugal stage in designing and processing of experimental data. *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika* [Compressor and Pneumatic Equipment], 2010, no. 3, pp. 32–36. (In Russ.)

Поступила 04.02.2021; принята к публикации 25.02.2021; опубликована 25.03.2021
Submitted 04/02/2021; revised 25/02/2021; published 25/03/2021

Иванов Вячеслав Михайлович – инженер-исследователь,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.
ORCID 0000-0001-5095-170X

Кожухов Юрий Владимирович – кандидат технических наук, доцент,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.
Email: kozhukhov_yv@mail.ru, ORCID 0000-0001-7679-9419

Vyacheslav M. Ivanov – Research Engineer,
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia. ORCID 0000-0001-5095-170X
Yuri V. Kozhukhov – PhD (Eng.), Associate Professor,
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia. Email: kozhukhov_yv@mail.ru,
ORCID 0000-0001-7679-9419

УВАЖАЕМЫЕ КОЛЛЕГИ!

Мы приглашаем Вас к участию в нашем журнале в качестве авторов, рекламодателей и читателей.

Журнал формируется по разделам, отражающим основные направления научной деятельности ученых МГТУ, в частности:

- РАЗРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ.
- МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ.
- ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ.
- ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО.
- ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ.
- МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ.
- СТАНДАРТИЗАЦИЯ, СЕРТИФИКАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ.
- МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ.
- НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ.
- ЭНЕРГЕТИКА МЕТАЛЛУРГИИ, ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ.
- УПРАВЛЕНИЕ, АВТОМАТИЗАЦИЯ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МЕТАЛЛУРГИИ.
- СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И СТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МЕТАЛЛУРГИИ.
- ЭКОЛОГИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ.
- ЭКОНОМИКА, УПРАВЛЕНИЕ И РЫНОК ПРОДУКЦИИ.
- СТРАТЕГИЯ РАЗВИТИЯ, ПОДГОТОВКА И ОБУЧЕНИЕ СПЕЦИАЛИСТОВ.
- ИНФОРМАЦИЯ И ДР.

ТРЕБОВАНИЯ К СТАТЬЯМ, ПРИНИМАЕМЫМ К ПУБЛИКАЦИИ

1. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ СТАТЬИ (на русском и английском языках)

1.1. Наименование статьи (не более 15 слов). Должно кратко отражать содержание статьи. Не рекомендуется использовать сокращения и аббревиатуры.

1.2. Аффiliation. Указывается фамилия, имя, отчество авторов (транслитерация), ученая степень, звание, должность, индивидуальный авторский идентификатор ORCID, полное название организации (ее официально принятый английский вариант), адрес электронной почты хотя бы одного из авторов.

1.3. Аннотация (200–250 слов). Включает постановку задачи (актуальность работы), цель, используемые методы (эксперименты), новизну, результаты, практическую значимость (направления развития).

Онлайн-перевод запрещается!

1.4. Ключевые слова: от 5 до 15 основных терминов.

2. СТРУКТУРА ОСНОВНОЙ ЧАСТИ СТАТЬИ

2.1. Введение (постановка проблемы).

2.2. Теория, материалы и методы исследования, технические и технологические разработки.

2.3. Результаты исследования и их обсуждение.

2.4. Заключение (выводы).

2.5. Список литературы (на русском и английском языках).

3. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЬИ

3.1. Рекомендуемый объем статьи – 6–8 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.

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 не редактируемом (*.jpg; качество не менее 300 dpi). В тексте статьи должны быть подрисуночные подписи в местах размещения рисунков. В конце подписи к рисунку точка не ставится. Например:

Рис. 4. Расчётная зависимость $\gamma(t)=I_{\text{н}}/I_{\text{н0}}$ от времени и удалённости КЗ от выводов асинхронного двигателя

- **таблицы** нумеруются, если их число более одной. Заголовков необходимо, когда таблица имеет самостоятельное значение, без заголовка дают таблицы вспомогательного характера.

3.3. При подготовке рукописи необходимо руководствоваться Международной системой единиц **СИ**.

4. ДОКУМЕНТЫ, ПРИЛАГАЕМЫЕ К СТАТЬЕ

4.1. Экспертное заключение о возможности опубликования.

4.2. Договор.

Внимание! Публикация статей является бесплатной. Преимущество опубликования предоставляется авторам и учреждениям, оформившим подписку на журнал.

Статьи проходят обязательное научное рецензирование.

Редакция оставляет за собой право отклонять статьи, не отвечающие указанным требованиям.

По вопросам публикации статей обращаться: 455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Редколлегия журнала «Вестник МГТУ им. Г.И. Носова», М.В. Чукину.

Телефоны: (3519) 29-85-26, 22-14-93.

Email: rio_mgtu@mail.ru; vestnik@magtu.ru (с указанием темы сообщения «Вестник МГТУ»).