

ВЕСТНИК

Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова

2023. Т.21, №2

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

Издается с марта 2003 года

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Председатель редакционной коллегии
В.М. Колокольников (Россия)

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

РЕДАКЦИЯ

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

© ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2023

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 29.12.2010.

Адрес редакции:

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

Адрес издателя:

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

Адрес типографии:

455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», участок оперативной полиграфии
Выход в свет 27.06.2023. Заказ 206. Тираж 500 экз. Цена свободная.

VESTNIK

of Nosov Magnitogorsk State Technical University

2023. Vol.21, no.2

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

PUBLISHED SINCE MARCH, 2003

EDITORIAL BOARD MEMBERS

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

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

EDITORIAL STAFF

Editor-in-Chief O.N. Tulupov

First Deputy Chief Editor M.A. Polyakova

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

Editor N.P. Boyarova

Technical Editor A.A. Neroda

Translated into English O.E. Sukhikh

The cover is designed by A.D. Grigorev

© Federal State Budgetary Institution of Higher Education
Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2023

Registration certificate PI # FS 77-59632 dated October 10, 2014 is issued by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology, and Mass Media.

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

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

Editorial office:

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

Publisher office:

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

Printing office:

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

Publication date: 27.06.2023. Order 206. Circulation: 500. Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ 5

Лобанов В.Г., Колмачихина О.Б., Полигалов С.Э., Савельев С.М., Хабибулина Р.Э., Соколов Л.В.
Изучение влияния углерода в составе клинкера на показатели гидрометаллургической переработки..... 5

Дорош Е.А., Тальгамер Б.Л.
Влияние влажности пород на производительность бульдозера при разработке россыпей 13

ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ И УТИЛИЗАЦИИ ТЕХНОГЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ И ОТХОДОВ 21

Абдрахимов В.З.
Рециклинг отходов металлургии без применения природных традиционных материалов в производство кислотоупорных материалов 21

ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ 29

Огарков Н.Н., Звягина Е.Ю.
Расчет параметров шероховатости при текстурировании поверхности прокатных валков электроэрозионным методом..... 29

Галимов Д.М., Ардашев Д.В., Дегтярева-Кашутина А.С.
Исследование качества хромового покрытия титановых деталей, полученного гальваническим способом с дискретным изменением времятоковых параметров процесса хромирования..... 37

Аносов М.С., Рябов Д.А., Чернигин М.А., Соловьев А.А.
Неразрушающий контроль накопления усталостных повреждений в стали Св-09Г2С, полученной 3D-печатью электродуговой наплавкой 47

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ 54

Горбунов К.С., Щеренкова И.С., Орехова Ю.Н., Мазур И.П.
Исследование структуры низкоуглеродистой стали после физического моделирования асимметричного процесса при горячей прокатке..... 54

СТАНДАРТИЗАЦИЯ, СЕРТИФИКАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ 67

Максимова О.В., Аронов И.З.
Особенности достижения консенсуса в группе аудиторов..... 67

Туманов А.Ю.
Метод оценки результативности систем обеспечения устойчивости функционирования объектов приборостроительных производств..... 76

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ 85

Почетуха В.В., Романов Д.А., Вацук Е.С., Филяков А.Д., Иванов Ю.Ф., Гостевская А.Н.
Структура и свойства покрытий на основе вольфрама, золота и азота, полученных на медной подложке комплексным электрофизическим методом..... 85

CONTENTS

MINING5

Lobanov V.G., Kolmachikhina O.B., Polygalov S.E., Saveliev S.M., Khabibulina R.E., Sokolov L.V.
Study on the Influence of Carbon in the Composition of Clinker on Hydrometallurgical Processing Performance...5

Dorosh E.A., Talgamer B.L.
The Influence of Rock Moisture on Bulldozer Performance in the Development of Placers 13

RECYCLING OF MAN-MADE MINERAL FORMATIONS AND WASTE21

Abdrakhimov V.Z.
Recycling of Metallurgical Waste without the Use of Natural Traditional Materials in the Production of Acid-Resistant Materials21

MATERIAL PROCESS ENGINEERING.....29

Ogarkov N.N., Zvyagina E.Yu.
Calculation of Roughness Parameters During Electrical Discharge Texturing of the Surface of Mill Rolls.....29

Galimov D.M., Ardashev D.V., Degtyareva-Kashutina A.S.
Studying the Quality of a Chromium Coating Applied on Titanium Parts by Electroplating with Discrete Changes in the Time and Current Parameters of Chrome Plating37

Anosov M.S., Ryabov D.A., Chernigin M.A., Solovyov A.A.
Non-Destructive Testing of the Accumulation of Fatigue Damage in Steel Sv-09G2S Produced by Wire Arc Additive Manufacturing47

MATERIALS SCIENCE AND HEAT TREATMENT OF METALS.....54

Gorbunov K.S., Shcherenkova I.S., Orekhova Yu.N., Mazur I.P.
Investigation of the Structure of Low-Carbon Steel after Physical Modeling of an Asymmetric Process During Hot Rolling54

STANDARDIZATION, CERTIFICATION AND QUALITY MANAGEMENT67

Maksimova O.V., Aronov I.Z.
Peculiarities of Achieving Consensus Among a Group of Auditors67

Tumanov A.Yu.
A Method for Assessing the Effectiveness of Systems Used to Ensure the Stability of the Functioning of Instrument-Making Facilities.....76

NEW TECHNOLOGICAL PROCESSES AND EQUIPMENT85

Pochetukha V.V., Romanov D.A., Vashchuk E.S., Filyakov A.D., Ivanov Yu.F., Gostevskaya A.N.
Structure and Properties of Coatings Based on Tungsten, Gold and Nitrogen Obtained on a Copper Substrate by an Integrated Electrophysical Method85

<i>Пашков А.Е., Пашков А.А., Фалеев С.Ю., Самойленко О.В.</i> Разработка методики анализа геометрических параметров длинномерных панелей	102
--	-----

НАДЕЖНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ 114

<i>Гасанов Б.Г., Азаренков А.А., Харченко Е.В., Панчвидзе Г.Г.</i> Влияние химического состава порошковых железомеднографитовых сплавов и смазочных материалов на диффузионный массоперенос и трибосинтез промежуточных структур в узлах трения.....	114
---	-----

<i>Калянов А.Е., Чернухин С.А., Великанов В.С.</i> К вопросу повышения эффективности работы конусной дробилки за счет применения объемного гидропривода	127
--	-----

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И СТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ 137

<i>Исаев М.М., Махмудбейли Л.С., Хасаяева Н.М.</i> Разработка интеллектуальной системы сканирования состава вещества	137
--	-----

<i>Гашио Е.Г., Фокин А.М.</i> Определение теплоэнергетических характеристик зданий на основе анализа архивных данных узлов учета тепловой энергии	146
--	-----

ЭКОНОМИКА, УПРАВЛЕНИЕ И РЫНОК ПРОДУКЦИИ 156

<i>Вакуленко Э.Ш., Денисова Я.В.</i> Усовершенствование процесса рекламационной деятельности на машиностроительном предприятии	156
---	-----

<i>Pashkov A.E., Pashkov A.A., Faleev S.Yu., Samoylenko O.V.</i> Development of a Methodology for Analyzing Geometric Parameters of Long Aircraft Panels	102
--	-----

RELIABILITY AND DURABILITY OF METALLURGICAL EQUIPMENT114

<i>Gasanov B.G., Azarenkov A.A., Kharchenko E.V., Panchvidze G.G.</i> Influence of the Chemical Composition of Fe-Cu-Gr Powder Alloys and Lubricants on Diffusion Mass Transfer and Tribosynthesis of Intermediate Structures in Friction Units.....	114
---	-----

<i>Kalyanov A.E., Chernukhin S.A., Velikanov V.S.</i> Increasing Performance Efficiency of a Cone Crusher by Using a Fluid Power Drive	127
---	-----

CONSTRUCTION MATERIALS AND CONSTRUCTION ENGINEERING.....137

<i>Isaev M.M., Mahmudbeyli L.S., Khasayeva N.M.</i> Development of an Intelligent System for Scanning the Composition of a Substance	137
--	-----

<i>Gasho E.G., Fokin A.M.</i> Determination of Thermal Power Characteristics of Buildings Based on the Analysis of Archival Data of Heat Metering Stations	146
---	-----

ECONOMICS, MANAGEMENT AND PRODUCT MARKET156

<i>Vakulenko E.Sh., Denisova Ya.V.</i> Improving the Claim Procedure at a Machinery Manufacturing Plant	156
--	-----

РАЗРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ MINING

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

УДК 622.765

DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-2-5-12



ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ УГЛЕРОДА В СОСТАВЕ КЛИНКЕРА НА ПОКАЗАТЕЛИ ГИДРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ

Лобанов В.Г., Колмачихина О.Б., Польшгалов С.Э., Савельев С.М., Хабибулина Р.Э., Соколов Л.В.

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

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). При переработке сульфидных цинковых концентратов по традиционной обжигово-гидрометаллургической технологии, значительная часть цинка остается в нерастворенном остатке. Цинковый кек, в котором концентрируются благородные металлы, подвергают вельцеванию. При вельцевании к кеку добавляют коксик для восстановления цинка и отгонки его в газовую фазу, благородные металлы и медь остаются в технологических отходах, называемых клинкером. Коксик, добавленный в шихту, выгорает примерно на 50%, соответственно, остаточное содержание углеродистой фазы в клинкере может составлять 25-40 мас.%. Выход клинкера достигает 27-30% от массы переработанного концентрата, при этом содержание меди в нем составляет 1-3%, цинка 2-4%, золота порядка 2-5 г/т, серебра – до 200 г/т в зависимости от состава исходного сырья. Известно, что на предприятиях России и за рубежом накоплены десятки миллионов тонн клинкера, переработка которого с целью извлечения ценных компонентов является важной задачей. Традиционная переработка клинкера в составе шихты медеплавильных заводов сопровождается определенными технологическими трудностями, а главное, не дает возможности селективно и достаточно быстро перевести благородные металлы и медь в товарный продукт. Известные технологии извлечения меди и благородных металлов обогатительными и гидрометаллургическими методами не обеспечивают удовлетворительных показателей. **Цель работы.** Исследование причин неудовлетворительного извлечения благородных металлов и меди из клинкера гидрометаллургическими методами. **Результат.** Установлено, что кокс, оставшийся в клинкере, обладает сорбционными свойствами. Удаление кокса из клинкера позволяет повысить извлечение золота при выщелачивании тиомочевинными растворами исходного клинкера с 45 до 87%. После предварительного выщелачивания меди извлечение золота возрастает с 59 до 93%.

Ключевые слова: клинкер цинкового производства, кокс, благородные металлы, извлечение, выщелачивание

© Лобанов В.Г., Колмачихина О.Б., Польшгалов С.Э., Савельев С.М., Хабибулина Р.Э., Соколов Л.В., 2023

Для цитирования

Изучение влияния углерода в составе клинкера на показатели гидрометаллургической переработки / Лобанов В.Г., Колмачихина О.Б., Польшгалов С.Э., Савельев С.М., Хабибулина Р.Э., Соколов Л.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №2. С. 5-12. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-2-5-12>



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

STUDY ON THE INFLUENCE OF CARBON IN THE COMPOSITION OF CLINKER ON HYDROMETALLURGICAL PROCESSING PERFORMANCE

Lobanov V.G., Kolmachikhina O.B., Polygalov S.E., Saveliev S.M., Khabibulina R.E., Sokolov L.V.

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

Abstract. Problem Statement (Relevance). When processing sulfide zinc concentrates according to conventional calcination hydrometallurgical technology, a significant part of zinc remains in the insoluble residue. Zinc cake, where precious metals are concentrated, is subjected to the Waelz process. During the Waelz process, coke breeze is added to the cake to reduce zinc and distill it into the gas phase; noble metals and copper remain in technological waste, called as clinker. Coke breeze added to the charge burns out by about 50%; therefore, the residual carbon-bearing content in the clinker can be 25-40%wt. Clinker yield reaches 27-30% by weight of the processed concentrate, and the copper content is 1-3%, zinc is 2-4% gold is about 2-5 g/t, silver is up to 200 g/t depending on the composition of the original raw materials. It is known that enterprises in Russia and abroad have accumulated tens of millions of tons of clinker, whose processing is an important task to extract valuable components. The conventional processing of clinker as part of the charge of copper smelters is accompanied by certain technological difficulties, and most importantly, does not make it possible to selectively and rather quickly convert precious metals and copper into commercial products. The known technologies for recovery of copper and noble metals by enrichment and hydrometallurgical methods do not provide satisfactory performance. **Objective.** The paper is aimed at studying the reasons for the unsatisfactory recovery of noble metals and copper from clinker by hydrometallurgical methods. **Result.** It has been found that coke remaining in clinker has sorption properties. The removal of coke from clinker contributes to increasing gold recovery by leaching of initial clinker with thiourea solutions from 45 to 87%. Gold recovery increases from 59 to 93% after preliminary leaching of copper.

Keywords: zinc production clinker, coke, noble metals, recovery, leaching

For citation

Lobanov V.G., Kolmachikhina O.B., Polygalov S.E., Saveliev S.M., Khabibulina R.E., Sokolov L.V. Study on the Influence of Carbon in the Composition of Clinker on Hydrometallurgical Processing Performance. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 2, pp. 5-12. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-2-5-12>

Введение

Клинкер – наиболее объемный и проблемный техногенный продукт цинкового производства. Выход клинкера достигает 27-30% от массы переработанного цинкового концентрата, при этом содержание меди в нем составляет 1-3%, цинка 2-4%, золота порядка 2-5 г/т, серебра – до 200 г/т в зависимости от состава исходного сырья. За десятилетия работы цинковых заводов на предприятиях России и за рубежом были накоплены десятки миллионов тонн клинкера [1]. Реализуемая на практике эффективная переработка клинкера основана исключительно на использовании пирометаллургических методов, в частности плавка в шахтных и автогенных печах на медеплавильных предприятиях. Вместе с тем подшихтовка клинкера к медному сырью крайне негативно влияет на технико-экономические показатели основного производства [2-4].

Многочисленные известные способы обогащения в сочетании с гидрометаллургической переработкой малоэффективны и не обеспечивают, прежде всего, требуемого извлечения ценных компонентов в товарные продукты. Основной причиной отмеченных проблем являются особенности химического и фазового состава клинкера. Наиболее значимые трудности извлечения меди, золота и серебра связаны с наличием в клинкере углистой фазы (кокса) и железа в многообразных фазовых состояниях.

Ранее [5] показано, что аналитическое определение содержания золота и его степени родства с теми или иными фазами клинкера при использовании традиционных методик не позволяет получить корректные результаты. Практическое выщелачивание золота при заведомо избыточных параметрах из измельченного клинкера цианистыми и тиомочевинными растворами характеризуется извлечением не более 30-50%.

Считаем, что в данном случае проявляется эффект «прег-роббинг» – сорбция растворенного свободного золота коксом.

Другой причиной неудовлетворительного извлечения золота может быть начальное присутствие нерастворяемого в обычных условиях золота в фазе кокса. Клинкер Беловского цинкового завода (Кемеровская обл.), явившийся объектом исследований в данной работе, в течение многих лет подвергали обработке разнообразными реагентами, содержащими компоненты Fe^{3+} , Cl^- , $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$, тиомочевину, роданид и т.д., сочетание которых допускает переход золота в раствор и последующую сорбцию коксом. Кроме того, в литературных источниках широко обсуждается факт наличия золота в энергетических и коксующихся углях и проблемы извлечения золота из продуктов использования углей [6, 7]. Другими словами, допускается присутствие золота как в исходном коксе, так и сорбированного на стадии выщелачивания меди. Подтверждением такой возможности является присутствие в заметных количествах (до 3 г/т) золота в цементной меди, получаемой при осаждении из слабокислых растворов на первой стадии.

В числе известных методов, используемых для снижения негативного влияния органического углерода в материале, поступающем на металлургическую переработку, следует отметить:

1. Удаление углерода из сырья на стадии предварительной угольной флотации при помощи реагентов – керосина, бутилового спирта и др. [8, 9].

2. Сочетание гравитационных и флотационных методов [10].

3. Подавление органического углерода в процессе флотации с применением реагентов, выступающих в роли депрессоров органического углерода [11].

4. Сорбционное цианирование с введением в пульпу выщелачивания сорбента, имеющего более высокую сорбционную активность. В качестве конкурирующего сорбента используют активированный уголь или ионообменную смолу [12].

5. Хлорирование пульпы перед сорбционным цианированием [13].

6. Окислительный обжиг при температуре 550-800°C [14].

Применимость указанных методов к повышению эффективности извлечения золота из клинкера осложняется рядом причин.

Углистая фаза в клинкере представлена «недогоревшим» при вельцевании коксом. При этом крупность частиц кокса находится в диапазоне

от пылевидной фракции до нескольких сантиметров. При помоле клинкера для последующего обогащения и гидрометаллургической переработки хрупкий кокс легко измельчается, что сопровождается увеличением его сорбционной активности. Важнейшим фактором, обуславливающим негативное влияние кокса, является очень высокое, по меркам рудного сырья, его содержание – от 10 до 20%. Даже при незначительной сорбционной активности кокса создаются условия частичной или полной сорбции золота.

Попытки использовать для удаления кокса технологически очевидный прием – флотацию – положительного эффекта не принесли, так как селективное извлечение в концентрат углистой фазы при использовании традиционных реагентных режимов в проведенных нами тестовых опытах не достигается. В значительной степени в пенный продукт переходили железосодержащие мелкодисперсные частицы, которые на стадии вельцевания физически закрепились на поверхности кокса. Свободное мелкое золото, обладая повышенной естественной флотоактивностью, в той или иной степени также переходило в концентрат, что предопределяло необходимость переработки как хвостов флотации, так и углеродного концентрата.

Усложнение флотации гравитационными приемами осложняется наличием тяжелой фракции на основе зерен спеченного металлического железа и его оксидов. Данная составляющая клинкера обладает повышенной твердостью, легко выделяется в концентрат гравитационного или магнитного обогащения. Негативной стороной этого варианта, как и в случае с флотацией, является значимое присутствие благородных металлов в концентратах магнитной сепарации. Проведенные нами исследования показали содержание благородных металлов в хвостах магнитной сепарации клинкера, г/т: золота – порядка 2,3; серебра – 134.

Специалисты [15] единодушны в том, что известными методами обогащения выделить благородные металлы из клинкера в отдельный продукт не представляется возможным. Наиболее рациональным вариантом гидрометаллургической переработки этого техногенного продукта является выщелачивание.

Варианты реагентного подавления сорбционной активности органического углерода, равно как и сорбционное цианирование с введением в пульпу выщелачивания сорбента, имеющего более высокую сорбционную активность, для переработки клинкера неприемлемы, поскольку

золото, изначально присутствующее в фазе кокса, остается в хвостах цианирования. И, наконец, следует признать, что применение хлорирования по технологическим и экономическим причинам в изучаемом случае неоправдано.

Материалы и методы исследования

Задачей данной работы являлось исследование влияния углерода на результаты аналитического определения золота и показатели выщелачивания золота, серебра и меди известными методами.

Наиболее простой и очевидный прием, который позволит оценить негативное влияние углерода, заключается в сопоставлении результатов анализа и выщелачивания исходного клинкера и клинкера, из которого предварительно удален углерод. В аналитических целях в качестве наиболее целесообразного приема удаления углерода в данной работе использовали «мягкое горение», основной целью которого является минимизация уноса тонкодисперсного золота с газообразными продуктами горения. Для практической реализации процесса навески тонкоизмельченного клинкера в фарфоровых чашках подвергали нагреву при температуре 650-700°C. Периодическое взвешивание массы навески позволило определить, что полное окисление кокса достигается в течение примерно 10 ч. Предварительный обжиг клинкера способствует не только удалению углерода, входящего в состав клинкера, но и (возможно) деструкции золотосодержащих фаз, что делает частицы золота более доступными для выщелачивающего реагента.

Состав частной пробы клинкера БЦЗ, определенный с использованием РФА на анализаторе EDX-7000, приведен в табл. 1. Содержание благородных металлов определяли пробирной плавкой по традиционной методике в лаборатории ООО «Березовский рудник» (г. Березовский, Свердловская обл.).

Таблица 1. Химический состав клинкера по основным компонентам, %

Table 1. Chemical composition of clinker by main components, %

Элемент	Содержание	Элемент	Содержание
Cu	2,4	C	12,7
Fe	37,4	Pb	0,4
SiO ₂	24,0	CaO	3,2
Zn	6,7	Au, г/т	3,1
S _{общ}	1,85	Ag, г/т	195,0

Для оценки влияния обезуглероживания на показатели процесса выщелачивания меди и благородных металлов провели серию опытов, схемы проведения которых показаны на рис. 1 и 2.

Эксперименты проводили в следующих условиях. Размол частной пробы исходного клинкера проводили в лабораторной стержневой мельнице без добавления воды для получения фракции -0,5 мм. Во избежание переизмельчения через 30 мин помола материал рассеяли, фракцию -0,5 мм отделили, фракцию +0,5 мм подвергли дальнейшему измельчению. После повторного измельчения полученный материал вновь рассеяли и смешали с ранее выделенной фракцией -0,5 мм. Пробу тщательно усреднили.

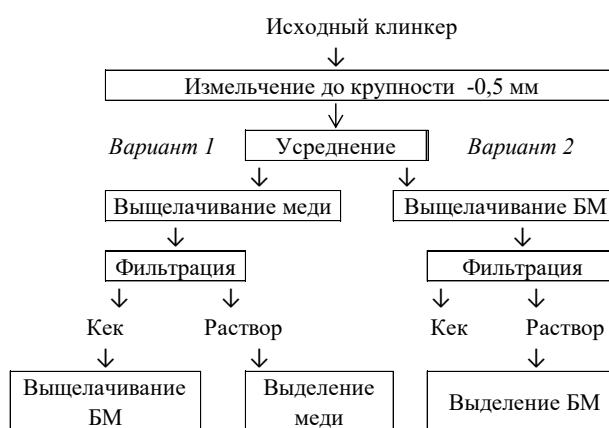


Рис. 1. Схема эксперимента без удаления коксика
Fig. 1. Scheme of the experiment without removal of coke breeze



Рис. 2. Схема экспериментов с предварительным удалением коксика
Fig. 2. Scheme of experiments with preliminary removal of coke breeze

Отбрали малые пробы усредненного материала и подвергли обжигу в муфельной печи при температуре 650°C в течение 12 ч. В ходе обжига материал периодически перемешивали, в печь по-

давали воздух для лучшего окисления угля. Убыль массы навесок клинкера составляла 17-18%. При обработке результатов с использованием известных методик учтено изменение массы, связанное с удалением кристаллической воды и окислением Fe^{2+} до Fe^{3+} . Состав полученного огарка, определенный с использованием РФА на анализаторе EDX-7000, приведен в табл. 2. Содержание благородных металлов в продукте обжига (огарке) также, как и в исходном клинкере, определяли пробирной плавкой. Изображения исходного клинкера и огарка приведены на рис. 3.

Таблица 2. Химический состав продукта обжига (огарка) по основным компонентам, %
Table 2. Chemical composition of the product of calcination (calcine) by main components, %

Элемент	Содержание	Элемент	Содержание
Cu	2,91	C	1,05
Fe	45,60	Pb	0,42
SiO_2	29,31	CaO	3,87
Zn	8,15	Au, г/т	3,68
$\text{S}_{\text{общ}}$	0,31	Ag, г/т	237,40

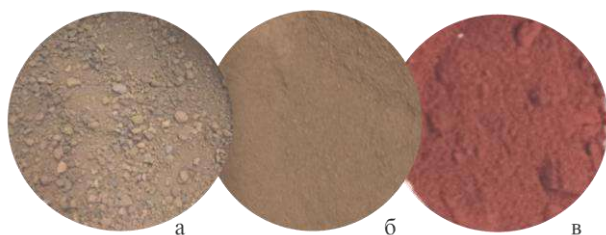


Рис. 3. Исследуемый материал: а – исходный неизмельченный клинкер; б – исходный клинкер, измельченный до крупности -0,5 мм; в – клинкер, измельченный до крупности -0,5 мм, после обжига

Fig. 3. The material under study: a is initial non-crushed clinker; б is initial clinker crushed to a size of -0.5 mm; в is clinker crushed to a size of -0.5 mm after calcination

Из полученных огарков отбирали параллельные пробы по 50 г для выщелачивания. Медь выщелачивали раствором серной кислоты с концентрацией 100 г/дм³. Для выщелачивания благородных металлов использовали три выщелачивающие системы:

- цианистый раствор с концентрацией 5 г/дм³ и раствор реагента «Золотая цикада» с концентрацией 5 г/дм³;
- окислителем в этих опытах являлся кислород воздуха;

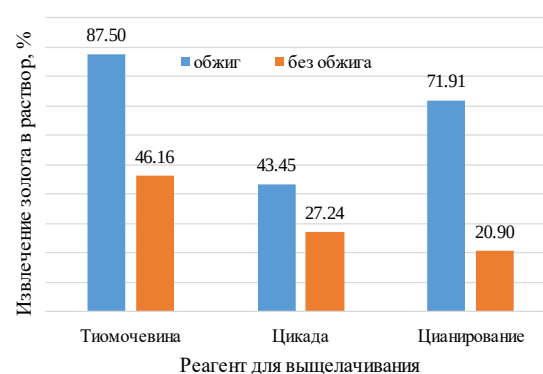
– тиомочевинный раствор (концентрация 5 г/дм³).

Выщелачивание параллельных проб проводили в бутылочном агитаторе, без нагрева, в течение 24 ч. После завершения выщелачивания пульпу фильтровали, растворы методом атомной адсорбции анализировали на содержание меди, золота и серебра.

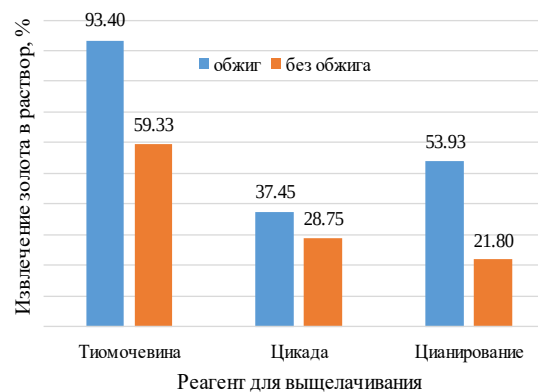
Опыты с предварительным выщелачиванием меди проводили с целью оценить влияние этой стадии на показатели выщелачивания благородных металлов.

Полученные результаты и их обсуждение

Результаты экспериментов по выщелачиванию благородных металлов различными растворителями представлены на рис. 4, 5.



а



б

Рис. 4. Влияние предварительного обжига на извлечение золота в раствор: а – из исходного клинкера; б – из клинкера, подвергнутого серноокислому выщелачиванию для извлечения меди

Fig. 4. The effect of precalcination on gold recovery into the solution: а is from initial clinker; б is from clinker subjected to sulfuric acid leaching for copper recovery

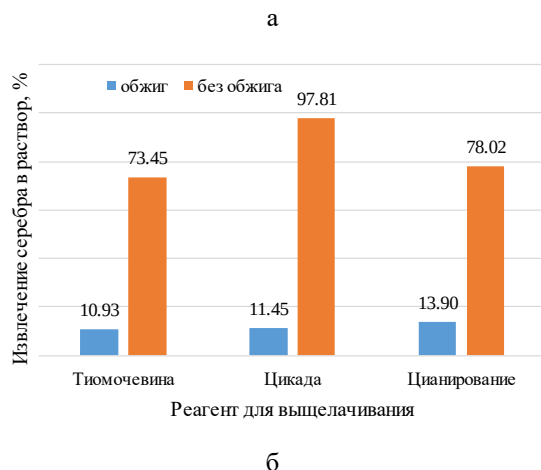
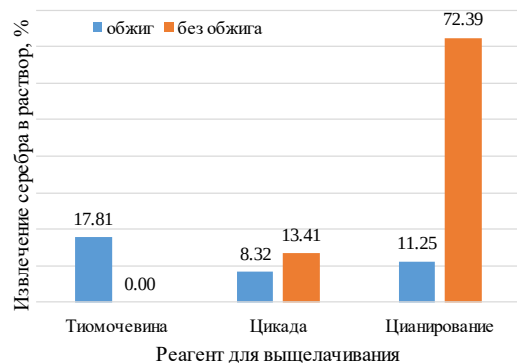


Рис. 5. Влияние предварительного обжига на извлечение серебра в раствор: а – из исходного клинкера; б – из клинкера, подвергнутого сернокислому выщелачиванию для извлечения меди
Fig. 5. The effect of precalcination on silver recovery into the solution: а is from initial clinker; б is from clinker subjected to sulfuric acid leaching for copper recovery

На основании полученных результатов можно утверждать, что кокс, оставшийся в клинкере после вельцевания, обладает сорбционной активностью по отношению к благородным металлам и меди, прежде всего – по отношению к золоту. При этом кокс проявляет сорбционные свойства в продуктивных растворах разного состава (цианистые, тиомочевинные, реагента «Золотая цикада»). Таким образом, сорбция благородных металлов на коксе является одной из причин неудовлетворительного извлечения металлов из клинкера гидрометаллургическими методами.

Удаление углистой фазы из клинкера позволяет повысить извлечение золота при выщелачивании тиомочевинной исходного клинкера с 45 до 87%. После предварительного выщелачивания меди извлечение золота возрастает с 59 до 93%. Выщелачивание тиомочевинной при сопоставимых условиях позволяет достичь более высокого извлечения золота.

Предварительный обжиг клинкера положительно влияет на переход в раствор золота при выщелачивании всеми выбранными растворителями, но негативно влияет на показатели выщелачивания серебра в аналогичных условиях. Причины данной особенности требуют изучения.

Практическое удаление кокса из исходного клинкера «мягким горением» экономически не оправдано. Намечена программа исследования по выбору режимов эффективного удаления кокса флотацией перед выщелачиванием или после него.

Заключение

Проведенные исследования показали, что не-сгоревший в процессе вельцевания кокс, даже несмотря на пассивацию его поверхности, обладает сорбционными свойствами по отношению к меди и золоту.

В результате проявления сорбционной активности кокса не удастся достигнуть высоких показателей по переводу меди и золота в продуктивные растворы. Для повышения показателей извлечения целевых металлов требуется удаление углистой фазы из клинкера до начала выщелачивания.

Список источников

1. Евдокимов С.И., Паньшин А.М. Выбор технологии обогащения клинкера от вельцевания цинковых кеков // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2009. № 2. С.19-25.
2. Тошкодирова Р.Э., Абдурахмонов С. Переработка клинкера – техногенного отхода цинкового производства // Universum: технические науки. 2020. №11-1. С. 78-81. DOI: 10.32743/UniTech.2020.80.11-1.78-81
3. Абдурахмонов С., Тошкодирова Р.Э. Технология переработки клинкера цинкового производства. Навои: Изд-во А. Навои, 2020. 96 с.
4. Способ переработки клинкера цинкового производства: пат. 2278174 РФ: МПК C22B7/00 / Скопов Г.В., Харитиди Г.П., Кривонос Ю.С., Щербаков В.В., Рыбников А.П. опубл. 20.06.2006.
5. Особенности присутствия благородных металлов в клинкере цинкового производства / Лобанов В.Г., Колмачихина О.Б., Польшгалов С.Э., Хабибулина Р.Э., Соколов Л.В. // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2022. № 5. С. 19-25. doi.org/10.3103/S1067821222060104
6. Салихов В.А. Перспективы извлечения ценных цветных и редких металлов из золошлаковых отходов энергетических предприятий Кемеровской области // Экономика. 2009. №6. С. 163-168.
7. Исследование распределения золота в материале золошлаковых отходов / Рассказова А.В., Лаврик Н.А., Литвинова Н.М. и др. // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 12. С. 282-296.
8. Леонов С.Б. Обогащение руд: сб. науч. тр. / Иркутск: ИПИ, 1986. 143 с.
9. Dinghua L., Weidong W., Yanan T., Guanlin R., Shunlong Y., Haiyan L., Hao H. Flotation specificity

- of coal gasification fine slag based on release analysis. *Journal of Cleaner Production*. 2022, № 363, 132426. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132426>
10. Дементьева Н.А., Муллов В.М., Бывальцев В.В. Испытания инновационной технологии переработки углистой золотосодержащей руды: сб. тр. АО «Иргиредмет». Иркутск, 2022.
 11. Перспектива использования реагента-депрессора отечественного производства при флотации углистых золотосодержащих руд / Сосипаторов А.И., Панченко Г.М., Высотин В.В., Винокурова М.А., Чикин А.Ю. // *Металлургия и материаловедение*. 2018. Т. 22. №9. С. 184-193.
 12. Саидакмедов А.А. К вопросу о депрессии органического углерода при флотации углистых золотосодержащих руд // *Metallurgy and mineral processing*. 2022. № 2. С. 4-8.
 13. Лодейщиков В.В. Технология извлечения золота и серебра из упорных руд. В 2-х т. Иркутск: Иргиредмет, 1999. 788 с.
 14. Худояров С.Р., Ильхомов Ж.А., Бозоров А.Б. Технология извлечения золота из упорных углистых золотосодержащих руд // *Результаты современных научных исследований и разработок: сб. ст. VI Междунар. науч.-практ. конф.* Пенза, 2019. С. 70-73.
 15. Сабанова М.Н., Орехова Н.Н., Горлова О.Е. Технологические исследования обогатимости клинкера вельцевания цинковых кеков с разделением техногенных фаз // *Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: материалы XXIV Международной научно-технической конференции*. Екатеринбург: Изд-во «Форт Диалог-Исеть», 2019. С. 98-103.
 6. Salikhov V.A. Prospects for recovery of valuable non-ferrous and rare metals from ash and slag dumps of energy enterprises of the Kemerovo Region. *Ekonomika [Economics]*. 2009;(6):163-168. (In Russ.)
 7. Rasskazova A.V., Lavrik N.A., Litvinova N.M. et al. Study on the distribution of gold in the material of ash and slag waste. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten [Mining Informational and Analytical Bulletin]*. 2016;(12):282-296. (In Russ.)
 8. Leonov S.B. *Obogashchenie rud: sb. nauch. tr. [Enrichment of ores: collection of research papers]*. Irkutsk: Irkutsk Polytechnic Institute, 1986, 143 p. (In Russ.)
 9. Dinghua L., Weidong W., Yanan T., Guanlin R., Shunlong Y., Haiyan L., Hao H. Flotation specificity of coal gasification fine slag based on release analysis. *Journal of Cleaner Production*. 2022;(363):132426. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132426>
 10. Dementieva N.A., Mullov V.M., Byvaltshev V.V. *Ispytaniya innovatsionnoy tekhnologii pererabotki uglстой zolotosoderzhashchey rudy: sb. tr. [Testing of innovative technology for processing carbonaceous gold-bearing ore: collection of papers]*. Irkutsk: JSC Irgiredmet, 2022. (In Russ.)
 11. Sosipatorov A.I., Panchenko G.M., Vysotin V.V., Vinokurova M.A., Chikin A.Yu. et al. Application prospects of domestic depressor reagent under carbonaceous gold-bearing ore flotation. *Metallurgiya i materialovedenie [Metallurgy and Materials Science]*. 2018;22(9):184-193. (In Russ.)
 12. Saidakhmedov A.A. On the issue of depression of organic carbon during the flotation of carbonaceous gold-bearing ores. *Metallurgy and Mineral Processing*. 2022;(2):4-8. (In Russ.)
 13. Lodeishchikov V.V. *Tekhnologiya izvlecheniya zolota i serebra iz upornykh rud. V 2 t. [Technology of recovery of gold and silver from refractory ores. In 2 volumes]*. Irkutsk: Irgiredmet, 1999, 788 p. (In Russ.)
 14. Khudoyarov S.R., Ilkhomov Zh.A., Bozorov A.B. Technology of recovering gold from refractory carbonaceous gold-bearing ores. *Rezultaty sovremennykh nauchnykh issledovaniy i razrabotok: sb. st. VI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. [Results of current studies and development: Proceedings of the 6th International Scientific and Practical Conference]*. Penza, 2019, pp. 70-73. (In Russ.)
 15. Sabanova M.N., Orekhova N.N., Gorlova O.E. Technological studies on enrichment of clinker by the Waelz process of zinc cakes with separation of industry-related phases. *Nauchnye osnovy i praktika pererabotki rud i tekhnogennogo syrya: materialy XXIV Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii [Scientific framework and practice of processing ores and industry-related raw materials: Proceedings of the 24th International Scientific and Technical Conference]*. Yekaterinburg: Fort Dialog-Iset Publishing House, 2019, p.98-103. (In Russ.)
 1. Evdokimov S.I., Panshin A.M. Selecting the concentration technology of clinker using the Waelz process on zinc cakes. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Tsvetnaya metallurgiya [Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy]*. 2009;(2):19-25. (In Russ.)
 2. Toshkodiroya R.E., Abdurakhmonov S. Clinker processing – zinc industrial waste. *Universum: tekhnicheskoe nauki [Universum: Engineering Sciences]*. 2020;(11-1):78-81. DOI: 10.32743/UniTech.2020.80.11-1.78-81
 3. Abdurakhmonov S., Toshkodiroya R.E. *Tekhnologiya pererabotki klinkera tsinkovogo proizvodstva [Processing technology for zinc clinker production]*. Navoi: Navoi Publishing House, 2020, 96 p. (In Russ.)
 4. Skopov G.V., Kharitidi G.P., Krivonosov Yu.S., Shcherbakov V.V., Rybnikov A.P. *Sposob pererabotki klinkera cinkovogo proizvodstva [Method for processing zinc clinker]*. Patent RU, no. 2278174, 2006.
 5. Lobanov V.G., Kolmachikhina O.B., Polygalov S.E., Khabibulina R.E., Sokolov L.V. Features of the presence of noble metals in zinc production clinker. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Tsvetnaya metallurgiya [Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy]*. 2022;(5):19-25. doi.org/10.3103/S1067821222060104

References

Поступила 13.03.2023; принята к публикации 14.04.2023; опубликована 27.06.2023
Submitted 13/03/2023; revised 14/04/2023; published 27/06/2023

Лобанов Владимир Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры металлургии цветных металлов, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия. Email: v.g.lobanov@urfu.ru. ORCID 0000-0001-6450-8434

Колмачихина Ольга Борисовна – кандидат технических наук, доцент кафедры металлургии цветных металлов, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия. Email: o.b.kolmachikhina@urfu.ru. ORCID 0000-0002-7879-8791

Полыгалов Сергей Эдуардович – старший преподаватель кафедры металлургии цветных металлов, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия. Email: sergey.polygalov@urfu.ru.

Савельев Сергей Михайлович – аспирант кафедры металлургии цветных металлов, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия. Email: uvmholding@gmail.com.

Хабibuлина Раиса Энверовна – ассистент кафедры металлургии цветных металлов, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия. Email: raisa.khabibulina@urfu.ru. ORCID 0000-0002-2764-4434

Соколов Лев Викторович – аспирант кафедры металлургии цветных металлов, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия. Email: lev.sokolov@urfu.ru.

Vladimir G. Lobanov – PhD (Eng.), Associate Professor of the Department of Metallurgy of Non-Ferrous Metals, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia. Email: v.g.lobanov@urfu.ru. ORCID 0000-0001-6450-8434

Olga B. Kolmachikhina – PhD (Eng.), Associate Professor of the Department of Metallurgy of Non-Ferrous Metals, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia. Email: o.b.kolmachikhina@urfu.ru. ORCID 0000-0002-7879-8791

Sergey E. Polygalov – Senior Lecturer, Department of Metallurgy of Non-Ferrous Metals, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia. Email: sergey.polygalov@urfu.ru.

Sergey M. Saveliev – postgraduate student of the Department of Metallurgy of Non-Ferrous Metals, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia. Email: uvmholding@gmail.com.

Raisa E. Khabibulina – Teaching Assistant of the Department of Metallurgy of Non-Ferrous Metals, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia. Email: raisa.khabibulina@urfu.ru. ORCID 0000-0002-2764-4434

Lev V. Sokolov – postgraduate student of the Department of Metallurgy of Non-Ferrous Metals, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia. Email: lev.sokolov@urfu.ru.

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

УДК 622.271.1

DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-2-13-20



ВЛИЯНИЕ ВЛАЖНОСТИ ПОРОД НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ БУЛЬДОЗЕРА ПРИ РАЗРАБОТКЕ РОССЫПЕЙ

Дорош Е.А.¹, Тальгамер Б.Л.²¹ ООО «СибЗолото», Иркутск, Россия² Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Бульдозерная разработка россыпных месторождений получила широкое применение начиная с 40-х годов прошлого века при разработке многолетнемерзлых россыпей и с 60-х годов – при разработке талых россыпей. Увеличение объемов бульдозерной разработки обеспечивалось, с одной стороны, ростом мощности базовых тракторов, с другой – технологическими преимуществами бульдозерного способа разработки. Вместе с тем, несмотря на богатый опыт использования бульдозерной техники, часто машины используют в неподходящих для этого горно-геологических и горнотехнических условиях, например при разработке пород повышенной влажности. Результатом в конечном счёте является нерациональное использование оборудования и увеличение себестоимости конечной продукции. **Цель работы.** Определение влияния влажности пород на производительность бульдозеров и установление границы, при которой бульдозерная разработка неэффективна. **Методы исследования.** Хронометраж работы бульдозера в обводнённом забое, определение влажности разрабатываемых пород, моделирование технической производительности на основании наблюдений, анализ влияния влажности разрабатываемых пород на производительность бульдозера. **Результаты.** При увеличении влажности разрабатываемых пород с 14 до 26% производительность падает на 51-63%, при увеличении до 34% – на 68-78%. Бульдозерная разработка эффективна при выемке пород нормальной влажности 8-15 %, малоэффективна при влажности 15-25 % и чаще всего неэффективна при влажности более 30-35%. **Практическая значимость.** В связи с ухудшением сырьевой базы россыпного золота и вовлечением в разработку запасов низкого качества важно рационально использовать высокопроизводительное горное оборудование при разработке пород повышенной влажности.

Ключевые слова: россыпные месторождения, открытый способ разработки, бульдозер, влажность пород, производительность бульдозеров

© Дорош Е.А., Тальгамер Б.Л., 2023

Для цитирования

Дорош Е.А., Тальгамер Б.Л. Влияние влажности пород на производительность бульдозера при разработке россыпей // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №2. С. 13-20. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-2-13-20>



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

THE INFLUENCE OF ROCK MOISTURE ON BULLDOZER PERFORMANCE IN THE DEVELOPMENT OF PLACERS

Dorosh E.A.¹, Talgamer B.L.²

¹ LLC SibZoloto, Irkutsk, Russia

² Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The development of placers by bulldozers has been widely used since the 1940s in the development of permafrost placers and since the 1960s in the development of thawed placers. On the one hand, the increase in the volume of the development by bulldozers was ensured by an increase in power of utility tractors, and on the other hand, by technological advantages of the development by bulldozers. At the same time, despite the rich experience of the use of bulldozer equipment, machines are often used in unsuitable mining and geological, and mining and engineering conditions, for example, when developing rocks of higher moisture. Ultimately, the result is an inefficient use of equipment and an increase in the cost of final products. **Objectives.** The study is aimed at determining the influence of moisture on performance of bulldozers and establishing a boundary, when the development by bulldozers is inefficient. **Methods Applied.** We applied the following methods: determining the timing of the bulldozer operation in a watered face, determining moisture of developed rocks, modeling technical performance based on the monitoring results, and analyzing the influence of moisture of developed rocks on performance of the bulldozer. **Results.** The performance drops by 51-63% with an increase in moisture of the developed rocks from 14 to 26%, and by 68-78% with an increase to 34%. The development by bulldozers is efficient, when excavating rocks with a normal moisture of 8-15%, less efficient, when moisture content is 15-25%, and more often inefficient at a moisture of over 30-35%. **Practical Relevance.** Due to the deterioration of the raw material resources base of placer gold and the involvement in the development of low-quality reserves, it is important to efficiently use high-performance mining equipment in the development of rocks of higher moisture.

Keywords: placer deposits, open pit mining, bulldozer, rock moisture, bulldozer performance

For citation

Dorosh E.A., Talgamer B.L. The Influence of Rock Moisture on Bulldozer Performance in the Development of Placers. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 2, pp. 13-20. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-2-13-20>

Введение

Перспективным направлением в горнодобывающей промышленности страны является добыча золота. Потребность в золоте находится на высоком уровне [1-3]. Несмотря на то, что большая часть золота в стране добывается из рудных месторождений – 69-74% [4], золотоносные россыпи продолжают занимать значительную долю в минерально-сырьевой базе РФ.

Основная часть россыпей сосредоточена на северо-востоке страны, в регионах, стабильно добывающих россыпное золото. Это в первую очередь Магаданская, Иркутская и Амурская области, Республики Саха (Якутия) и Бурятия, Забайкальский край [5]. В этих регионах доля добычи золота из россыпей составляет от 30 до 60%.

Большая часть россыпей в стране разрабатывается открытым раздельным – 60-90% и дражным – 5-15% [6-9] способами, а гидравлический и подземный способы разработки россыпей практически не используются. Большая часть балансовых запасов приходится на открытый

раздельный – 50-70% и дражный – 15-20% способы разработки [8, 10, 11].

Горнотехнические условия залегания россыпных месторождений в целом достаточно сложные [8, 12, 13]. Большая часть месторождений в различной степени поражены мерзлотой, обводнённые, часть россыпей сильно валунистые, пески труднопромывистые. Значительная доля запасов относится к глубокозалегающим с большой мощностью вскрышных пород. Несмотря на сложные горнотехнические условия залегания вовлекаемых в эксплуатацию запасов, в последние годы объёмы добычи россыпного золота не снижаются, а в некоторых регионах даже растут [14].

Отмеченные тенденции россыпной золотодобычи обуславливают парадокс. Происходит некоторый рост производственных показателей в условиях ухудшения качества минерально-сырьевой базы и горнотехнических условий. Связанно это в первую очередь с широким внедрением более производительного горного оборудования, позволяющего разрабатывать большие объёмы горной массы. При внедрении бульдозерного способа

разработки россыпей в Советском Союзе в 1930-1950 гг. в основном использовали легкие машины малой мощности 30-96 кВт. В период 1950-1970 гг. парк представляли бульдозеры на базе тракторов 80 л.с. (59 кВт) – 12,5%, 100-140 л.с. (74-103 кВт) – 86,4%, 180-385 л.с. (132-283 кВт) – 1,1%. В период 1970-1990 гг. широко применялись средние бульдозеры мощностью 108-180 л.с. (79-132 кВт), реже тяжелые бульдозеры мощностью 300-410 л.с. (220-302 кВт). С 1990 г. по настоящее время широкое применение получили тяжелые бульдозеры мощностью 458-862 л.с. (337-634 кВт).

Достаточно часто при разработке россыпей имеет место неэффективное использование мощного, дорогостоящего горного оборудования. В основном это происходит в сложных горнотехнических условиях, связанных с наличием мерзлоты, валунистостью и обводненностью разрабатываемых пород. В некоторых особо неблагоприятных условиях парк тяжелой бульдозерной техники используется на 20-40% от своей мощности. Как известно, стоимость машино-суток работы таких машин составляет 60-200 тыс. руб. [15], а систематическое неэффективное использование высокопроизводительных машин отрицательно сказывается на себестоимости конечной продукции.

Проблематика, обзор существующих положений

Обводненность россыпи резко затрудняет её эксплуатацию, заметно снижая производительность горного оборудования. Большинство россыпей северо-востока страны имеет значительные притоки подземных и поверхностных вод, которые, попадая в горные выработки, существенно осложняют работу, увеличивая потери песков, а во многих случаях делая практически невозможной разработку россыпи бульдозерами. Работа на обводненной площади не только резко снижает производительность бульдозера, но и приводит к быстрому износу его ходовой части. Помимо отрицательного влияния на горную технику, обводненность россыпи негативно влияет на устойчивость пород, обогащает породы, прилегающие к плотике, а при наличии большой трещиноватости плотика ведёт к росту потерь металла.

Перед эксплуатацией россыпи выполняется комплекс мероприятий, направленный на осушение полигона (карьерного поля), заключающийся в проведении специальных канав, водоспусков или организации принудительного водоотлива. При разработке россыпей не всегда удается осуществить качественное осушение рыхлых отло-

жений и работы вынужденно выполняются в неблагоприятных условиях. Условия эти могут изменяться в широких пределах, где-то полигоны обводнены незначительно и падение производительности оборудования незаметно, а иногда полигоны обводнены чрезмерно и работа привычными методами там осуществляться не может. Целью данной статьи является определение влияния влажности пород на производительность бульдозеров и выявление границы, при которой разработка становится неэффективной.

На **рис. 1** показана работа бульдозера CAT D9R в необводненном забое. Разрабатываемая порода представлена в основном суглинками, песками и галечниками (целик, III категория, талые). Породы нормальной влажности ~ 14%, объем призмы волочения 10-13 м³.

На **рис. 2** приведен пример работы бульдозера CAT D9R в обводненном забое. Разрабатываемая порода представлена илисто-глинистыми отложениями, песками и галечниками (целик, II категория, талые). Влажность породы ~ 34%, объем призмы волочения 3-4,5 м³.

При разработке россыпных месторождений потеря производительности бульдозеров на выемке пород повышенной влажности наблюдается довольно часто. Несмотря на актуальность этого вопроса, данных об исследованиях работы бульдозера при разработке пород повышенной влажности немного. Исследованиями, выполненными М.И. Клименко, Г.А. Сулиным, В.И. Емельяновым, В.Г. Лешковым, Л.П. Мацуевым, С.В. Потемкиным [16-21] и связанными с анализом работы бульдозера в обводненном забое, было определено:

1) При влажности песчано-галечных пород 12-18% в зависимости от крупности материала угол призмы волочения перед отвалом бульдозера α изменяется в пределах 35-41°.

2) Изменение влажности пород с 10 до 20% приводит к увеличению вала, так как в результате большой вязкости породы высота и длина вала приближается к размерам отвала, а угол α изменяется в небольших пределах.

3) В породах влажностью 30-35% объем вала породы перед бульдозером составляет 20% по отношению к валу породы в гравелистых породах.

4) Наибольшая эффективность достигается при разработке и перемещении грунтов, влажность которых близка к оптимальной – 8-15%.

5) При разработке разжиженных пород на обводненных полигонах большой эффект дает применение открьлков и уширителей. Увеличение вала, перемещаемого бульдозером за счёт уширителей, составляет 48-157%.



Рис. 1. Пример работы бульдозера CAT D9R в нормальном забое

Fig. 1. Operation of bulldozer CAT D9R in a standard face (for reference)



Рис. 2. Пример работы бульдозера CAT D9R в обводнённом забое

Fig. 2. Operation of bulldozer CAT D9R in a watered face (for reference)

Особенно низкие показатели бульдозерных работ отмечаются при послойной выемке оттаивающих мёрзлых высокольдистых илистых отложений с их складированием на бортах выработок. При транспортировании таких пород на борт карьера они почти полностью «стекают» с отвала бульдозера. В таких условиях используется параллельная работа нескольких машин с установкой отвалов в одну линию.

Определение влияния влажности пород на производительность горного оборудования важно для проектирования горных работ, так как основной целью проектирования является достижение максимальных результатов с минимальными затратами. Довольно часто при проектировании горных работ область применения и производительность горного оборудования определены без учета факторов, значительно на это влияющих, что негативно сказывается на экономических показателях.

При проектировании разработки россыпных месторождений производительность горного оборудования определяют по расчётным формулам либо нормативам. В нормативах (Единые нормы выработки и времени на разработку россыпных месторождений открытым способом, 1991 г.) для расчёта нормы выработки бульдозера в сильно обводнённом забое в исключительных случаях принято использовать понижающий коэффициент 0,8, что не всегда соответствует действительным условиям работы.

Материалы и методы исследования

Материалами для исследования послужили полевые наблюдения за работой бульдозера при разработке грунтов различной влажности. Наблюдения проводились на трёх полигонах, обводнённых в различной степени. Первый забой сухой, производительность бульдозера в этом забое послужила эталоном для сравнения. Второй и третий забои обводнённые.

В первую очередь во всех забоях была определена влажность (весовая) разрабатываемых пород. Для этого с каждого забоя отбиралось от 3-х до 5-ти проб по 10-20 г. Пробы взвешивали, а затем просушивали в сушильном шкафу при температуре 90-110°C. Время сушки 3-5 ч. После завершения процедуры пробы снова взвешивали и опять просушивали. Действия повторяли до тех пор, пока разница между весом до и после просушки не превышала 0,02 г. Влажность вычислялась по формуле

$$W = \frac{100(m_1 - m_0)}{m_0 + m},$$

где W – влажность разрабатываемой породы, %; m – вес пустого стакана и крышки, г; m_1 – вес разрабатываемой породы вместе с крышкой и стаканом, г; m_0 – вес высушенного грунта со стаканом и крышкой, г.

После вычисления влажности каждой пробы результаты по полигону усреднялись.

В каждом забое осуществлялся хронометраж работы бульдозера при различной дальности транспортирования и постоянном уклоне поверхности от -3 до +3°. Выполнялись операции по подрезке и транспортированию пород, разгрузке, возвращению к исходному положению (обратным ходом), время фиксировалось. После каждого цикла выполнялся замер (тахеометром) объема вала разработанной (отгруженной) бульдозером породы. Затем определялось количество циклов за час работы и рассчитывалась производительность бульдозера.

Результаты исследования и их обсуждения

Результаты представлены зависимостью технической производительности (**рис. 3**) и себестоимости работы бульдозера (**рис. 4**) от дальности транспортирования при различной влажности пород.

Из **рис. 3** следует, что при увеличении влажности разрабатываемой породы происходит падение производительности бульдозера. В среднем при увеличении влажности с 14 до 26% производительность падает на 51-63%, а при увеличении до 34% – на 68-78%.

Полученная зависимость справедлива при уклоне забоя от -3 до +3°. Было отмечено, что при увеличении или уменьшении уклона поверхности происходит заметное растекание разрабатываемой более влажной породы и имеют место значительные потери пород при транспортировании.

Породы с влажностью более 30% транспортировать на расстояние более 60-70 м практически невозможно, так как большая их часть теряется (растекается).

Из **рис. 4** следует, что при увеличении влажности разрабатываемой породы происходит повышение себестоимости пропорционально падению производительности. В среднем при увеличении влажности с 14 до 26% себестоимость повышается на 51-63%, а при увеличении до 34% – на 68-78%.

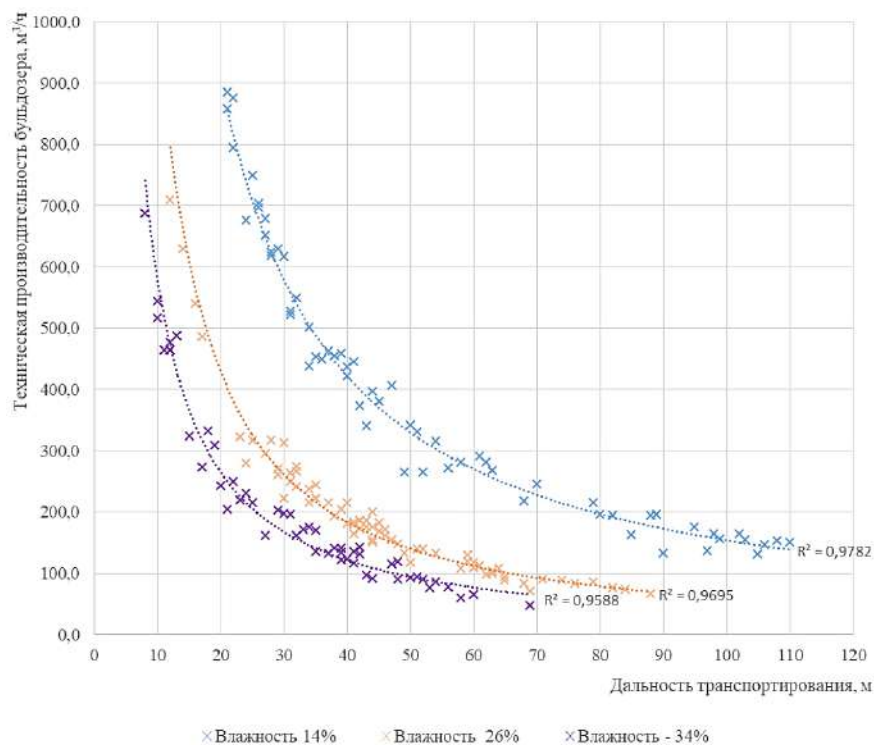


Рис. 3. Зависимость технической производительности бульдозера CAT D9R от дальности транспортирования при влажности пород 14, 26, 34%

Fig. 3. Relation between technical performance of bulldozer CAT D9R and handling distance, when rock moisture is 14, 26, 34%

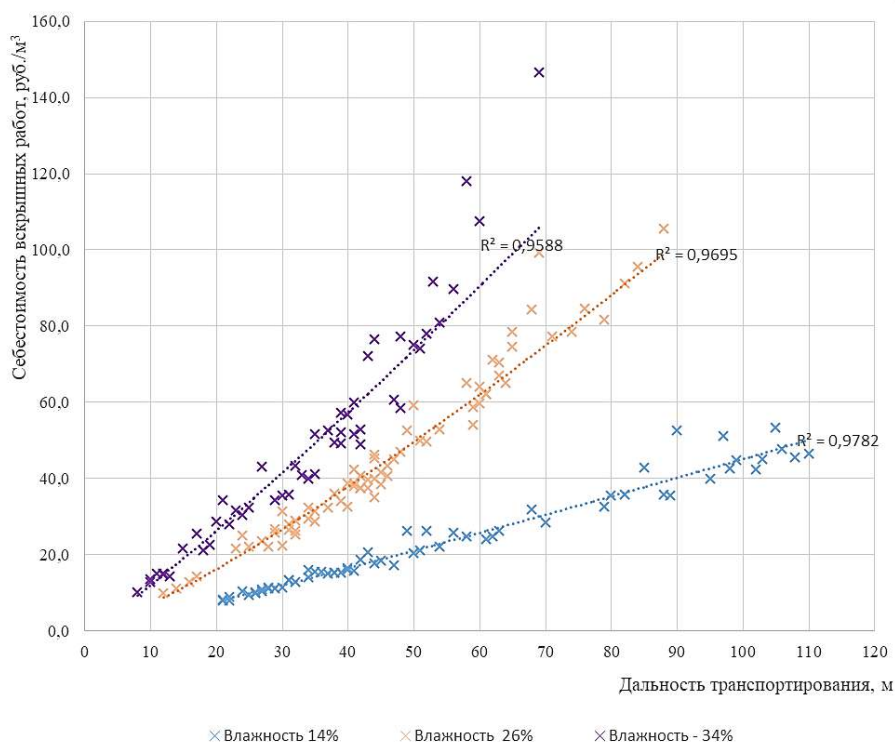


Рис. 4. Зависимость себестоимости разработки пород бульдозером CAT D9R от дальности транспортирования при влажности пород 14, 26, 34% (при стоимости машино-часа работы 6950 руб.)

Fig. 4. Relation between the cost of the rock development by bulldozer CAT D9R and handling distance, when rock moisture is 14, 26, 34% (when machine-hour cost is RUB 6950)

Выводы

1. Влажность разрабатываемых пород оказывает значительное влияние на производительность бульдозерной техники. Работа бульдозера эффективна при разработке пород нормальной влажности 8-15%, малоэффективна при влажности 15-25% и в основном неэффективна при влажности более 30-35%. Повышение себестоимости разработки пород бульдозером происходит пропорционально падению производительности.

2. При проектировании бульдозерных работ на выемке пород с высокой влажностью (15-35%) рекомендуется вводить в расчёты производительности и нормы выработки понижающий коэффициент от 0,8 до 0,3, учитывающий содержание воды в породе.

Список источников

1. Рубцов Н.Н. Потребление золота в мире // Вестник Российского университета дружбы народов. Сер. Социология. 2013. №1. С. 74-85.
2. Плешинцева А.А. Мировой рынок золота: промышленное потребление // Социально-экономические явления и процессы. 2017. №2. С. 98-105.
3. Егорова М.С., Реховаская В.А., Михайлова К.Ю. Динамика спроса и предложения на мировом рынке золота: проблемы и перспективы // Международный журнал экспериментального образования. 2015. №3. С. 585-548.
4. Обзор золотодобывающей отрасли России по итогам 2020 года [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://assets.ey.com/content/dam/ey-sites/ey-com/ru_ru/topics/mining-metals/ey-gold-surveys/ey-gold-survey-2020.pdf (дата обращения: 09.04.2022).
5. ИТС 49-2017. Добыча драгоценных металлов. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. Москва, 2017. С. 3-21.
6. Ермаков С.А., Потехин А.В. Анализ применяемых способов разработки и оборудования на россыпных месторождениях Якутии // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2012. № 7. С. 218-224.
7. Волков А.В. Золотые перспективы Иркутской области // Золото и технологии. 2017. №4(38). С. 118-127.
8. Дорош Е.А., Тальгамер Б.Л. Анализ запасов золота в Иркутской области и обоснование направлений развития способов разработки россыпей // Науки о земле и недропользование. 2022. №3. С. 118-127.
9. Тальгамер Б.Л., Тютрин С.Г., Ершов В.А. Состояние и перспективы дражной золотодобычи в Иркутской области // Золотодобыча. 2016. №12(217). С. 11-15.
10. Перспективы резервного фонда минерально-сырьевой базы россыпного золота / Куторгин В.И., Сапрыкин А.А., Джобадзе В.А., Тарасов А.С. // ЦНИГРИ Роснедра МПР России. 2008. №4. С. 9-15.

11. Состояние и перспективы развития золотодобывающей промышленности Республики Саха (Якутия) // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2013. №2. С. 45-50.
12. Бураков А.М., Ермаков С.А., Касанов И.С. Особенности горнотехнических условий разработки россыпных месторождений Якутии // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2012. №7. С. 190-198.
13. Дорош Е.А., Тальгамер Б.Л. Оценка перспектив развития россыпной золотодобычи в России // Материалы Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Геонауки – 2021». Иркутск: Изд-во ИрННТУ, 2021. С. 58-66.
14. Производство золота в России [Электронный ресурс] // Золотодобыча. Информ. реклам. бюлл. Иркутск: Иргиредмет, 2019. <https://zolotodb.ru/article/10922>
15. Бабий Ю.А., Москалевич В.И., Пятаков В.Г. Технико-экономические показатели работы горно-транспортного оборудования, определённые на базе данных, полученных дистанционным способом [Электронный ресурс] // Золотодобыча. 2022. Режим доступа: <https://zolotodb.ru/article/12795>
16. Лешков В.Г. Разработка россыпных месторождений. М.: Горная книга, 2007. 906 с.
17. Емельянов А.И. Технология бульдозерной разработки вечномёрзлых россыпей. М.: Недра, 1976. 287 с.
18. Клименко М.И., Сулин Г.А. Разработки россыпных месторождений бульдозерами. Магадан: Магаданское книжное издательство, 1976. 201 с.
19. Сулин Г.А. Техника и технология разработки россыпей открытым способом. М.: Недра, 1974. 233 с.
20. Справочник по разработке россыпей / В.П. Березин, В.Г. Лешков, Л.П. Мацуева, С.В. Потемкин. М.: Недра, 1973. 592 с.
21. Березин В.П. Справочник по разработке россыпей. Магадан: Магаданское книжное издательство, 1959. 200 с.

References

1. Rubtsov N.N. Consumption of gold in the world. *Vestnik Rossiiskogo universiteta druzhby narodov. Ser. Sotsiologiya* [RUDN Journal of Sociology]. 2013;(1):74-85. (In Russ.)
2. Pleshintseva A.A. World market of gold: industrial consumption. *Sotsialno-ekonomicheskie yavleniya i protsessy* [Social-Economic Phenomena and Processes]. 2017;(2):98-105. (In Russ.)
3. Egorova M.S., Rekhovskaya V.A., Mikhailova K.Yu. Dynamics of demand and supply in the global gold market: problems and prospects. *Mezhdunarodnyi zhurnal eksperimentalnogo obrazovaniya* [International Journal of Experimental Education]. 2015;(3):545-548. (In Russ.)
4. Overview of the gold mining industry in Russia at year end 2020 [Electronic resource]. Available at: https://assets.ey.com/content/dam/ey-sites/ey-com/ru_

- ru/topics/mining-metals/ey-gold-surveys/ey-gold-survey-2020.pdf (Accessed on April 09, 2022).
5. ITS 49-2017. *Dobycha dragotsennykh metallov* [Information and technical reference book 49-2017. Extraction of precious metals]. Moscow: Federal Agency for Technical Regulation and Metrology, 2017, pp. 3-21. (In Russ.)
 6. Ermakov S.A., Potekhin A.V. The analysis of applied development methods and equipment at alluvial deposits in Yakutia. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)* [Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)]. 2012;(7):218-224. (In Russ.)
 7. Volkov A.V. Golden prospects for the Irkutsk Region. *Zoloto i tekhnologii* [Gold and Technologies]. 2017;(4(38)):118-127. (In Russ.)
 8. Dorosh E.A., Talgamer B.L. The analysis of gold reserves in the Irkutsk Region and providing a rationale for areas of the development of methods for placer mining. *Nauki o zemle i nedropolzovanie* [Earth Sciences and Subsoil Use]. 2022;(3):118-127. (In Russ.)
 9. Talgamer B.L., Tyutrin S.G., Ershov V.A. Status and prospects of dredging gold mining in the Irkutsk Region. *Zolotodobycha* [Gold Mining]. 2016;(12(217)):11-15. (In Russ.)
 10. Kutorgin V.I., Saprykin A.A., Dzhobadze V.A., Tarasov A.S. Prospects for the reserve fund of the mineral resource base of alluvial gold. *TsNIGRI Rosnedra MPR Rossii* [Central Geological Research Institute for Non-Ferrous and Precious Metals, the Federal Agency on Subsoil Use, the Ministry of Natural Resources of Russia]. 2008;(4):9-15. (In Russ.)
 11. Status and prospects of the development of the gold mining industry of the Republic of Sakha (Yakutia). *Mineralnye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie* [Mineral Resources of Russia. Economics and Management]. 2013;(2):45-50. (In Russ.)
 12. Burakov A.M., Ermakov S.A., Kasanov I.S. Features of mining conditions for the development of alluvial deposits in Yakutia. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)* [Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)]. 2012;(7):190-198. (In Russ.)
 13. Dorosh E.A., Talgamer B.L. Assessment of prospects for the development of alluvial gold mining in Russia. *Materialy Vserossiiskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Geonauki – 2021»* [Proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference with an International Participation “Geoscience – 2021”]. Irkutsk: Publishing House of Irkutsk National Research Technical University, 2021, pp. 58-66. (In Russ.)
 14. Gold production in Russia. Gold mining. Information and advertising bulletin. Irkutsk: Irgiredmet, 2019. Available at: <https://zolotodb.ru/article/10922>
 15. Babiy Yu.A., Moskalevich V.I., Pyatakov V.G. Technical and economic indicators of the operation of mining and transport equipment determined on the basis of remotely obtained data. Gold mining, 2022. Available at: <https://zolotodb.ru/article/12795>
 16. Leshkov V.G. *Razrabotka rossypnykh mestorozhdeniy* [Development of alluvial deposits]. Moscow: Gornaya kniga, 2007, 906 p. (In Russ.)
 17. Emelyanov A.I. *Tekhnologiya buldozernoy razrabotki vechnomerzlykh rossypey* [Technology of the development of permafrost placers by bulldozers]. Moscow: Nedra, 1976, 287 p. (In Russ.)
 18. Klimenko M.I., Sulin G.A. *Razrabotka rossypnykh mestorozhdeniy buldozerami* [Development of placer deposits by bulldozers]. Magadan: Magadan Book Publishing House, 1976, 201 p. (In Russ.)
 19. Sulin G.A. *Tekhnika i tekhnologiya razrabotki rossypey otkrytym sposobom* [Engineering and technology of the open pit mining of placers]. Moscow: Nedra, 1974, 233 p. (In Russ.)
 20. Berezin V.P., Leshkov V.G., Matsueva L.P., Potemkin S.V. *Spravochnik po razrabotke rossypey* [Reference book on the development of placers]. Moscow: Nedra, 1973, 592 p. (In Russ.)
 21. Berezin V.P. *Spravochnik po razrabotke rossypey* [Reference book on the development of placers]. Magadan: Magadan Book Publishing House, 1959, 200 p. (In Russ.)

Поступила 13.03.2023; принята к публикации 24.04.2023; опубликована 27.06.2023
Submitted 13/03/2023; revised 24/04/2023; published 27/06/2023

Дорош Егор Алексеевич – исполнительный директор ООО «СибЗолото», Иркутск, Россия.
Email: egordoros3@gmail.com.

Тальгамер Борис Леонидович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой разработки месторождений полезных ископаемых, Институт недропользования, Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия.
Email: talgamer@istu.edu. ORCID 0000-0003-1413-0116

Egor A. Dorosh – Executive Director of LLC SibZoloto, Irkutsk, Russia.
Email: egordoros3@gmail.com.

Boris L. Talgamer – DrSc (Eng.), Professor, Head of the Department of Mineral Deposits Development, Institute of Subsoil Use, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.
Email: talgamer@istu.edu. ORCID 0000-0003-1413-0116

ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ И УТИЛИЗАЦИИ ТЕХНОГЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ И ОТХОДОВ

RECYCLING OF MAN-MADE MINERAL FORMATIONS AND WASTE

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

УДК 666.774:669.054.82

DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-2-21-28



РЕЦИКЛИНГ ОТХОДОВ МЕТАЛЛУРГИИ БЕЗ ПРИМЕНЕНИЯ ПРИРОДНЫХ ТРАДИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПРОИЗВОДСТВО КИСЛОТУПОРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Абдрахимов В.З.

Самарский государственный экономический университет, Самара, Россия

Аннотация. Постановка задачи. С учетом истощения силикатного алюмосодержащего традиционного сырья для производства керамических материалов строительного направления необходимо изыскать и исследовать способы его замены на техногенное сырье. Такой опыт показали передовые зарубежные государства и использовали еще его как инструментарий по охране окружающей природной среды от различных негативных последствий. **Цель работы.** Получение кислотоупоров на основе отходов металлургии – глинистой части хвостов гравитации циркон-ильменитовых руд (далее ГЦИ), используемых в качестве глинистого связующего, и шлака от выплавки ферротитана, используемого в качестве отощителя, без применения природных традиционных материалов, исследование влияния шлака на технические показатели кислотоупоров. **Используемые методы.** Для исследования сырьевых материалов в настоящей работе были использованы современные методы химического анализа: для поэлементного анализа – растровый электронный микроскоп JSM 6390A (Jeol, Япония); для петрографического исследования использовались иммерсионные жидкости, прозрачные шлифы и аншлифы, микроскопы МИН-8 и МИН-7. Для определения технических свойств использовался ГОСТ 961-89 «Плитки кислотоупорные и термокислотоупорные керамические» (марка КШ (кислотоупорные шамотные)). **Результат.** Исследования показали, что использование ГЦИ без шлака от выплавки ферротитана, который применяется в качестве отощителя, не позволяет получить кислотоупорную плитку, отвечающую требованиям ГОСТ 961-89 по кислотостойкости даже при температуре обжига 1300°C, из-за повышенного содержания в ГЦИ оксида железа Fe_2O_3 (более 6%). Введение в составы керамических масс шлака от выплавки ферротитана, содержащего оксид алюминия Al_2O_3 более >70%, способствует повышению кислотостойкости. **Практическая значимость.** Использование шлака от выплавки ферротитана с повышенным содержанием оксида алюминия позволяет получить кислотоупорную плитку с высокими техническими показателями.

Ключевые слова: глинистая часть, шлак от выплавки ферротитана, кислотоупорная плитка, отходы металлургии, экология

© Абдрахимов В.З., 2023

Для цитирования

Абдрахимов В.З. Рециклинг отходов металлургии без применения природных традиционных материалов в производство кислотоупорных материалов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №2. С. 21-28. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-2-21-28>



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

RECYCLING OF METALLURGICAL WASTE WITHOUT THE USE OF NATURAL TRADITIONAL MATERIALS IN THE PRODUCTION OF ACID-RESISTANT MATERIALS

Abdrakhimov V.Z.

Samara State Economic University, Samara, Russia

Abstract. Problem Statement. Factoring into the depletion of silicate aluminum-containing traditional raw materials for the production of ceramic materials of the construction application, it is necessary to find and study how to replace them with industry-related raw materials. Such experience has been shown by advanced foreign states that also used is as a tool for protecting the environment against various negative consequences. **Objectives.** The research is aimed at producing acid-resistant materials based on metallurgical waste, namely a clay part of gravity tailings of zircon-ilmenite ores (GZI) used as a clay binder and ferrotitanium slag used as a leaner without the use of natural traditional materials; studying the effect of slag on the technical characteristics of acid-resistant materials. **Methods Applied.** To study the raw materials, modern chemical analysis methods were used in the research: JSM 6390A, a scanning electron microscope by Jeol, Japan, to perform an elemental analysis; immersion liquids, transparent sections and polished sections, microscopes MIN-8 and MIN-7 were used for the petrographic study. To determine the technical properties, GOST 961-89 "Acid-resistant and thermostable acid-resistant ceramic tiles" of the KSh brand (acid-resistant chamotte) was used. **Result.** The studies have shown that the use of GZI without ferrotitanium slag, which is applied as a leaner, does not contribute to producing acid-resistant tiles in compliance with the requirements of GOST 961-89 for acid resistance even at a firing temperature of 1300 °C because of a higher content of iron oxide ($\text{Fe}_2\text{O}_3 > 6\%$) in GZI. Introducing ferrotitanium slag, containing aluminum oxide $\text{Al}_2\text{O}_3 > 70\%$, into compositions of ceramic mixtures contributes to an increase in acid resistance. **Practical Relevance.** The use of ferrotitanium slag with an increased content of aluminum oxide makes it possible to produce acid-resistant tiles with increased technical indicators.

Keywords: clay part, ferrotitanium slag, acid-resistant tiles, metallurgical waste, ecology

For citation

Abdrakhimov V.Z. Recycling of Metallurgical Waste Without the Use of Natural Traditional Materials in the Production of Acid-Resistant Materials. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 2, pp. 21-28. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-2-21-28>

Введение

Ежегодно в России образуется свыше 5 млрд т твердых отходов, из которых коммунальные твердые отходы практически не превышают 70 млн т, что показывает невысокую долю – в пределах 1,5% [1]. Суммарное количество отходов производства, которые называют техногенным сырьем, приближается к 99%.

Металлургическая промышленность в России, согласно данным Росстата, занимает второе место по степени загрязнения окружающей среды после энергетической отрасли. В самой металлургической отрасли доминирует цветная металлургия, за которой следует чёрная.

Таким образом, главными отходообразующими сегментами экономики России стали: угольная промышленность, доля техногенного сырья которой составляет в районе 57% (2,8 млрд т) сов-

местно с добычей, обогащением и агломерацией; цветная металлургия – 15% (740 млн т) совместно с добычей, обогащательными фабриками, добычей ториевых и урановых руд и переработкой различных цветных металлов; черная металлургия – 11% (535 млн т), включая переработку и обогащение железных руд [1].

За последние столетия гигантские объемы техногенного сырья образовались в хвостохранилищах, шламонакопителях, золошлакоотвалах различных ТЭС, полигонах и т.д., что в конечном итоге может привести к кризису [2-4]. Такой экологический кризис XXI века скорее всего станет кризисом редуцентов, это когда редуценты уже не в состоянии будут значительно увеличивающиеся объемы отходов разлагать, особенно то количество техногенного сырья, произведенное человечеством, которое не имеет в природе аналогов по химическому составу [5]. Сле-

дует отметить, что и микроорганизмов для утилизации вновь образовавшегося техногенного сырья и расщепления его в исходные химические элементы также недостаточно [6, 7].

Аналитическая служба международной аудиторско-консалтинговой сети FinExpertiza в 2019 году выяснила, что в России по образованию производственных отходов был установлен рекорд. Количество отходов (техногенного сырья) достигло 7,75 млрд т, что практически в 4 раза больше с момента начала наблюдений с 2002 года (было 2 млрд т).

Специфика большинства металлургических заводов России показывает, что эти производства отрицательно воздействуют не только на экологию, но и на здоровье человека. Из-за массового хранения вредоносного крупнотоннажного техногенного сырья металлургической промышленности происходит зашламовывание почвы, а из-за недостаточно очищенных вод, сброшенных в водоемы, и выброса огромного количества вредных веществ в атмосферу происходит отравление окружающей природной среды [8-10].

Применение крупнотоннажного техногенного сырья в производстве керамических кислотоупорных материалов будет способствовать утилизации отходов производств, расширит сырьевую основу для керамических изделий и внесет большой вклад в экологию государства.

Теоретической основой в настоящее время для разработки основных направлений по использованию отходов производств и созданию безотходных технологий считается комплексное материаловедение. Комплексное материаловедение – это когда связи, относящиеся к корреляционным, представлены в триаде, которая состоит из: а) структуры – от нано- до макромасштаба; б) вещественного состава, в который входят фазовый и химико-минеральный; в) характеристики полученного неорганического материала.

В настоящее время практически отсутствует финансирование на геологоразведочные изыскания сырьевой базы для получения массовых керамических материалов, поэтому актуальными становятся вопросы по замене традиционного природного сырья на техногенные отходы металлургии [11, 12]. Использование техногенного сырья в производстве кислотоупорной продукции будет способствовать изъятию из финансирования геологоразведочных работ, разработки и содержания карьеров. Кроме того, высвободятся

от влияния неблагоприятных антропогенных агентов большие территории.

Для защиты окружающей среды в директиве ЕС 2008/98/ЕС указано, что в этом случае в большей мере будет эффективна именно переработка техногенного сырья с целью его вторичного применения в новом каком-либо продукте, необходимым для общества [13].

С учетом истощения силикатного алюмосодержащего традиционного сырья для производства керамических материалов строительного направления необходимо изыскать и исследовать способы его замены на техногенное сырье. Такой опыт показали передовые зарубежные государства, который использовали еще как инструментальный в деле охраны окружающей природной среды от различных негативных последствий.

Целью работы является получение кислотоупоров на основе отходов металлургии – глинистой части хвостов гравитации циркон-ильменитовых руд (далее ГЦИ), используемых в качестве глинистого связующего, и шлака от выплавки ферротитана, используемого в качестве отошителя, без применения природных традиционных материалов, а также исследование влияния шлака на технические показатели кислотоупоров.

Материалы и методы исследования

Для исследования сырьевых материалов в настоящей работе были использованы современные методы химического анализа: для элементного анализа – растровый электронный микроскоп JSM 6390A (Jeol, Япония); для петрографического исследования использовались иммерсионные жидкости, прозрачные шлифы и аншлифы под микроскопом МИН-8 и МИН-7. Для определения технических свойств использовался ГОСТ 961-89 «Плитки кислотоупорные и термокислотоупорные керамические» (марка КШ (кислотоупорные шамотные)).

1. Экспериментальная часть. В качестве глинистого компонента для изготовления кислотоупоров применялась ГЦИ (глинистая часть хвостов гравитации циркон-ильменитовых руд), а в качестве отошителей – шамот из обожженной ГЦИ при температуре 1200°C и шлак от выплавки ферротитана. Оксидный и поэлементный химические составы используемых отходов производств представлены в **табл. 1** и **2**, фракционный (гранулометрический) состав – в **табл. 3**, микроструктура отходов производств показана на **рис. 1**, а минералогический состав – на **рис. 2**.

Таблица 1. Усредненный оксидный химический состав сырьевых материалов

Table 1. Average oxide chemical composition of raw materials

Компонент	Содержание оксидов, мас. %						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	R ₂ O	п.п.п.*
ГЦИ	59,59	22,43	6,74	1,28	1,54	1,58	7,04
Шамот из обожженной ГЦИ	61,88	25,18	7,58	1,54	1,89	1,93	–
Шлак от выплавки ферротитана	1,82	72,13	0,3	14,52	7,72	3,51	–

* п.п.п. – потери при прокаливании; R₂O=Na₂O+K₂O.

Таблица 2. Поэлементный химический состав сырьевых материалов

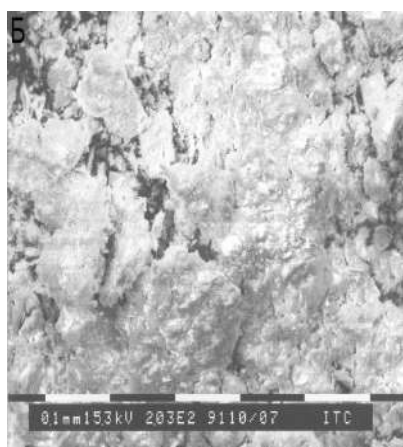
Table 2. Element-by-element chemical composition of raw materials

Компонент	Содержание элементов, мас. %								
	C	O	Na	Mg	Al+Ti	Si	K	Ca	Fe
ГЦИ	2,18	51,26	0,26	0,54	15,45	24,8	0,32	0,2	4,87
Шамот из обожженной ГЦИ	–	48,76	0,31	0,71	17,18	27,14	0,35	0,22	5,18
Шлак от выплавки ферротитана	–	35,08	2,35	5,68	36,48+6,32	1,28	0,89	11,78	0,21

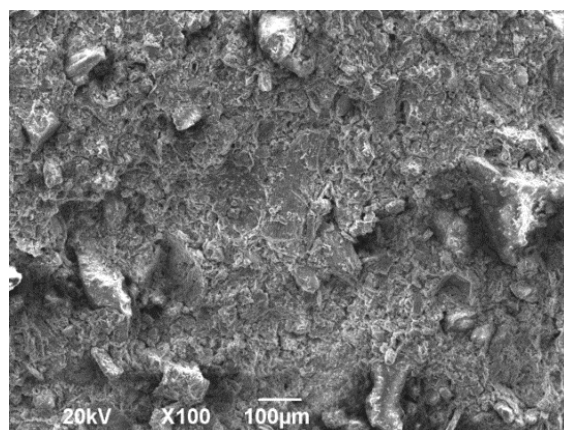
Таблица 3. Фракционный состав сырьевых материалов

Table 3. Fractional composition of raw materials

Компонент	Содержание фракций %, при размере частиц, мм				
	>0,063	0,063-0,01	0,01-0,005	0,005-0,001	<0,001
ГЦИ	0,8	8,1	12,1	21,0	58
Шлак от выплавки ферротитана	10,83	25,43	25,52	12,85	25,37



а



б

Рис. 1. Микроструктура отходов производств: а – ГЦИ, увеличение $\times 1000$; б – шлак от выплавки ферротитана, увеличение $\times 100$

Fig. 1. Microstructure of industrial waste: а is GZI, $\times 1000$; б is ferrotitanium slag, $\times 100$



Рис. 2. Минералогический состав отходов производств: а – ГЦИ; б – шлак от выплавки ферротитана
Fig. 2. Mineralogical composition of industrial waste: a is GZI; b is ferro-titanium slag

Глинистый компонент (ГЦИ). Получается ГЦИ после грохочения и дезинтеграции руды с влажностью 37-45% в виде суспензии. Цвет ГЦИ в зависимости от содержания оксида железа может меняться от светло-желтого до розового, плотность сырьевого материала 2,36-2,42 г/см³. В отличие от традиционных каолиновых глин, ГЦИ является более равномерным (однородным) по фракционному (гранулометрическому) и химическим составам благодаря использованию микрогравитационного способа обогащения. Большинство исследований показало, что более однородными являются каолины, обогащенные микрогравитационным способом. Кроме того, применение ГЦИ в производстве кислотоупоров обходится без дорогостоящих карьерных работ и обогащения, что значительно экономит финансовые средства предприятия.

ГЦИ по содержанию оксида алюминия Al_2O_3 является полукислым сырьевым компонентом с повышенным содержанием железистых оксидов (Fe_2O_3 – более 3%, (см. табл. 1)). По наличию фракций крупностью 0,001 мм ГЦИ классифицируется как дисперсное сырье (содержание фракций величиной <0,001 мм – 58% (см. табл. 3)), по пластичности классифицируется как среднепластичное (число пластичности 21-23), среднечувствительное – по чувствительности к сушке, тугоплавкое – по огнеупорности (огнеупорность 1580°C), сильноспекающееся – по спекаемости с интервалом спекания 120-150°C.

Шамот. При термообработке 1200°C ГЦИ получается шамот. Используется в кислотоупорах в качестве отошителя, который даже при обжиге не меняет усадку, поэтому способствует формированию механического каркаса, координирует пластичность керамической массы. Как видно из табл. 1, при обжиге ГЦИ на шамот его химический состав обогащается оксидом алюминия (Al_2O_3) – соответственно с 22,43 до 25,18%.

Шлак от выплавки ферротитана. Фундаментальным отличием шлака от выплавки ферротитана от практически всех аналогичных шлаков цветной и

черной металлургии, химической промышленности и теплоэнергетики является то, что его химическая основа – это глинозем, среднее содержание которого не менее 70%, содержание MgO – более 7%, CaO – более 12%, а SiO_2 не превышает 2-3 мас. % (см. табл. 1). Состав шлака от выплавки ферротитана рационально показать в трехкомпонентной системе $\text{MgO}-\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3$ [16]. В легированных сталях ферротитан используют для раскисления. Использование в составах керамических масс шлака предоставит возможность весомерно увеличить как кислотостойкость, так и термостойкость благодаря высокому содержанию в шлаке Al_2O_3 [5]. На рис. 2, б представлен минеральный состав шлака, а в табл. 4 свойства минералов шлака.

Как видно из табл. 4, все минералы (фазы) огнеупорные, за исключением стеклофазы. Исследуемый шлак имеет высокие термические показатели: температура размягчения – 1450-1500°C; разрушения – 1520-1580°C; плавления – 1650°C.

2. Получение кислотоупорных плиток. Для получения кислотоупорных плиток были разработаны составы керамических масс. Составы, основные показатели (дообжиговые свойства), пластичность и усадка керамических масс приведены в табл. 5.

Производство кислотоупорной плитки (квдратная плитка типа ПК-1 размером 100×100×20 мм) осуществлялось по классической технологии: компоненты (ГЦИ и отошители) измельчали до размера частиц крупностью менее 1 мм, затем согласно содержанию компонентов в составах (см. табл. 5) они тщательно перемешивались. Керамические образцы производили пластическим способом при влажности шихты 22-24%. Отпрессованные образцы высушивали до влажности не более 5%, затем подвергали термообработке при температурах 1250 и 1300°C.

В табл. 6 представлены технические показатели кислотоупорных плиток, обожженных при температурах 1250 и 1300°C.

Таблица 4. Свойства кристаллических фаз (минералов), входящих в шлак от выплавки ферротитана
Table 4. Properties of crystalline phases (minerals) included in ferrotitanium slag

Минерал	Температура плавления, °C	Плотность, г/см ³	Твердость по шкале Мооса	Микротвердость, кг/мм ²
Корунд Al ₂ O ₃	2050	3,9-4,1	9	2108
Бонит CaO·6Al ₂ O ₃	1850	3,38	6,5-7,0	1200-1300
Перовскит CaTiO ₃	1970	3,97-4,0	5,5	1120-1150
Стеклофаза (кварц с различными примесями железа, кальция и т.д.)	1300-1400	2,9	6,0-6,5	1150-1250
Магнезиальная шпинель MgAl ₂ O ₄ (MgO·Al ₂ O ₃)	2135	4,05	7,5-8,0	1378-1505

Таблица 5. Составы и показатели керамических масс
Table 5. Compositions and indicators of ceramic mixtures

Компонент	Составы		
	1	2	3
ГЦИ, мас. %	100	60	60
Шамот из обожженной ГЦИ, мас. %	–	40	–
Шлак от выплавки ферротитана, мас. %	–	–	40
Показатели керамической массы:			
– пластичность шихты	22	11	11
– усадка высушенной плитки, %	6,8	4,8	4,8

Таблица 6. Физико-механические показатели кислотоупорных плиток
Table 6. Physical and mechanical parameters of acid-resistant tiles

Показатели	Составы			Согласно ГОСТ 961-89 «Плитки кислотоупорные и термокислотоупорные керамические» (марка КШ (кислотоупорные шамотные))
	1	2	3	
Температура обжига 1250°C				
Водопоглощение, %	3,4	3,2	3,6	Менее 5,0
Кислотостойкость, %	96,5	96,8	97,7	Не менее 98,0
Предел прочности при сжатии, МПа	57,2	60,1	63,5	Не менее 50
Предел прочности при статическом изгибе, МПа	32,4	34,3	37,4	Не менее 25
Морозостойкость, циклы	42	47	57	Не менее 20
Термическая стойкость, теплосмены	3	4	6	Не менее 5
Температура обжига 1300°C				
Водопоглощение, %	2,3	2,2	1,9	Менее 5,0
Кислотостойкость, %	97,8	98,1	98,8	Не менее 98,0
Предел прочности при сжатии, МПа	63,8	69,4	73,3	Не менее 50
Предел прочности при статическом изгибе, МПа	38	42	48	Не менее 25
Морозостойкость, циклы	58	69	75	Не менее 20
Термическая стойкость, теплосмены	4	5	8	Не менее 5

Обсуждение полученных результатов

Как видно из **табл. 6**, образцы из состава №1, обожженные при температурах 1250 и 1300°C, не соответствуют требованию ГОСТ 961-89 по кислотостойкости, так как ГЦИ имеет повышенное содержание оксида железа ($\text{Fe}_2\text{O}_3 > 6\%$) (см. **табл. 1**). В работах [5, 16] было показано, что оксид железа снижает кислотостойкость.

Введение в ГЦИ оптимального количества шамота (40%) способствует производству кислотоупорных плиток, удовлетворяющих требованиям ГОСТ 961-89 практически по всем физико-механическим (техническим) показателям при термообработке 1300°C (см. **табл. 5, 6**). Следует отметить, что в представленной работе под оптимальным содержанием принимается такое количество отошителя, которое снижает до минимального число пластичности (с 22 до 11) керамической массы, но при дальнейшем уменьшении пластичности на исследуемых образцах появляются трещины.

Замена шамота на шлак от выплавки ферротитана в адекватном количестве увеличивает кислотостойкость в связи с повышенным содержанием оксида алюминия ($\text{Al}_2\text{O}_3 > 70\%$) (см. **табл. 1**), который способствует повышению кислотостойкости [17], но также повышает водопоглощение. Феррохромовый алюминотермический шлак имеет огнеупорность выше, чем ГЦИ, соответственно 1580 и 1650°C, поэтому чтобы снизить водопоглощение, необходимо поднять температуру обжига кислотоупорных плиток до 1300°C (см. **табл. 6**).

Выводы

Исследования показали, что образцы из ГЦИ, обожженные при температурах 1250 и 1300°C, не соответствуют требованиям ГОСТ 961-89 по кислотостойкости, из-за повышенного содержания в ГЦИ оксида железа ($\text{Fe}_2\text{O}_3 > 6\%$), который способствует заметному понижению кислотостойкости.

Установлено, что использование 40% шамота, которое идентифицируется как оптимальное, даёт возможность изготовить кислотоупорные изделия при термообработке 1300°C, отвечающие условиям ГОСТ. В представленной работе под оптимальным содержанием принимается такое количество отошителя, которое уменьшает до минимального число пластичности (с 22 до 11), так как при дальнейшем ухудшении пластичности на исследуемых образцах появляются трещины.

Таким образом, применение оптимального количества шлака (40%) с повышенным содержанием оксида алюминия при термообработке 1300°C дает возможность получить кислотоупорную плитку с высокими химическими и физико-механическими показателями.

Список источников

1. Волынкина Е.П. Анализ состояния и проблем переработки техногенных отходов в России // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2017. №2. С. 43-49.
2. Романов П.С., Романова И.П. Рециклинг отходов металлургической промышленности как способ сбережения природных ресурсов и снижения экологической напряженности // Синергия. 2016. №2. С. 94-99.
3. Романова И.П., Бегунов О.Б. Использование отходов металлургической промышленности в строительной индустрии как способ сбережения природных ресурсов и снижения экологической напряженности // Территория науки. 2016. №2. С. 53-57.
4. Бутин В.М., Мыска С.Ю. Направления развития системы переработки расходов промышленно-производственных подсистем АРК // Территория науки. 2015. №6. С. 91-97.
5. Абдрахимова Е.С. Рециклинг шлака от выплавки ферротитана в производство сейсмостойкого кирпича на основе бейделлитовой глины // Экология и промышленность России. 2021. Т. 25. №7. С. 32-36. DOI: 10.18412/1816-0395-2021-7-32-36
6. Кальнер В.Д. Экологически ориентированная среда обитания – интегральный критерий качества жизни // Экология и промышленность России. 2019. Т. 23. №11. С. 50-54.
7. Целлюлозно-бумажное производство: устойчивое развитие и формирование экономики замкнутого цикла / Кряжев А.М., Гусев Т.В., Тихонова И.О., Очеретенко Д.П., Алмгрен Р. // Экология и промышленность России. 2020. Т. 24. №11. С. 48-53.
8. Коряков В.Е., Шишкина А.А., Шишкина П.А. Влияние предприятий металлургической промышленности на окружающую среду и здоровье человека // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. №7. С. 275-278.
9. Крахт В.Б., Меркер Э.Э., Крахт Л.Н. Развитие металлургии и проблемы экологии // Фундаментальные исследования 2005. №2. С. 78-79.
10. Говорушко С.М. Влияние цветной металлургии на окружающую среду // География в школе. 2018. №6. С. 3-7.
11. Дадькин В.С., Дадькина О.В. Методика расчета необходимого прироста запасов в управлении воспроизводством минерально-сырьевой базы // Вестник Самарского государственного экономического университета. 2019. №3. С. 54-57.
12. Абдрахимова В.З., Абдрахимова Е.С. Пористый заполнитель на основе аспирационной пыли от феррохрома и жидкостеклянной композиции // Экология промышленного производства. 2023. №1. С. 3-6. DOI: 10.52190/2073-2589_2023_1_2
13. Дубовик О.Л. Реформа Европейского Законодательства об отходах // Российское право: образование, практика, наука. 2010. №5-6. С. 80-84.
14. Абдрахимова Е.С., Абдрахимов В.З. Исследование фазового состава керамического материала возрастом более ста лет // Химическая технология. 2023. №2. С. 42-48. DOI: 10.31044/1684-5811-2023-24-2-42-48

15. Абдрахимова Е.С., Абдрахимов В.З. Влияние отхода химического производства – алюмощелочно-го шлама на фазовый состав керамогранита // Новые огнеупоры. 2023. №1. С. 46-51.
16. Феррохромовые алюминотермические шлаки – техногенное сырье многофункционального применения. Ч. 1. Вещественный состав и свойства феррохромовых шлаков / Рытвин В.М., Перепелицын В.А., Понамаренко А.А., Гильванг С.И. // Новые огнеупоры. 2017. №10. С. 8-14.
17. Абдрахимова Е.С., Абдрахимов В.З. Физико-химические процессы при обжиге кислотоупоров. СПб.: Недра, 2003. 273 с.

References

1. Volynkina E.P. Analysis of the state and difficulties of processing industry-related waste in Russia. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrialnogo universiteta* [Bulletin of Siberian State Industrial University]. 2017;(2):43-49. (In Russ.)
2. Romanov P.S., Romanova I.P. Recycling of metallurgical industry waste as a way to save natural resources and reduce environmental tensions. *Sinergiya* [Synergy]. 2016;(2):94-99. (In Russ.)
3. Romanova I.P., Begunov O.B. The use of metallurgical industry waste in the construction industry as a way to save natural resources and reduce environmental tensions. *Territoriya nauki* [The Territory of Science]. 2016;(2): 53-57. (In Russ.)
4. Bautin V.M., Mychka S.Yu. Areas of development of the waste recycling system for industrial production subsystems of the agro-industrial complex. *Territoriya nauki* [The Territory of Science]. 2015;(6):91-97. (In Russ.)
5. Abdrakhimova E.S. Recycling of ferrotitanium slag into the production of earthquake-resistant bricks based on beidellite clay. *Ekologiya i promyshlennost Rossii* [Ecology and Industry of Russia]. 2021;25(7):32-36. DOI: 10.18412/1816-0395-2021-7-32-36
6. Kalner V.D. Ecologically oriented habitat is an integral criterion of the quality of life. *Ekologiya i promyshlennost Rossii* [Ecology and Industry of Russia]. 2019;23(11):50-54. (In Russ.)
7. Kryazhev A.M., Gusev T.V., Tikhonova I.O., Ocheretenko D.P., Almgren R. Pulp and paper production: sustainable development and the formation of a closed-loop economy. *Ekologiya i promyshlennost Rossii* [Ecology and Industry of Russia]. 2020;24(11):48-53. (In Russ.)
8. Koryakov V.E., Shishkina A.A., Shishkina P.A. Influence of metallurgical enterprises on the environment and human health. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of Tula State University. Engineering Sciences]. 2019;(7):275-278. (In Russ.)
9. Krakht V.B., Merker E.E., Krakht L.N. Development of metallurgy and problems of ecology. *Fundamentalnye issledovaniya* [Basic Research]. 2005;(2):78-79. (In Russ.)
10. Govorushko S.M. Influence of non-ferrous metallurgy on the environment. *Geografiya v shkole* [Geography at School]. 2018;(6):3-7. (In Russ.)
11. Dadykin V.S., Dadykina O.V. Methodology for calculating the necessary increase in reserves in the management of reproduction of the mineral resource base. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta* [Bulletin of Samara State Economic University]. 2019;(3):54-57. (In Russ.)
12. Abdrakhimova V.Z., Abdrakhimova E.S. A porous filler based on aspiration dust from ferrochrome and a liquid glass composition. *Ekologiya i promyshlennost Rossii* [Ecology and Industry of Russia]. 2023;(1):3-6. DOI: 10.52190/2073-2589_2023_1_2
13. Dubovik O.L. Reform of the European Legislation on waste. *Rossiyskoe pravo: obrazovanie, praktika, nauka* [Russian Law: Education, Practice, Science]. 2010;(5-6):80-84. (In Russ.)
14. Abdrakhimova E.S., Abdrakhimov V.Z. Study on a phase composition of a ceramic material of over a hundred years old. *Khimicheskaya tekhnologiya* [Chemical Technology]. 2023;(2):42-48. DOI: 10.31044/1684-5811-2023-24-2-42-48
15. Abdrakhimova E.S., Abdrakhimov V.Z. Influence of chemical production waste, aluminum-alkali sludge, on the phase composition of porcelain stoneware. *Novye огнеупоры* [New Refractories]. 2023;(1):46-51. (In Russ.)
16. Rytvin V.M., Perepelitsyn V.A., Ponomarenko A.A., Gilvang S.I. Ferrochrome aluminothermal slags are industry-related raw materials for a multifunctional use. Part 1. The material composition and properties of ferrochrome slags. *Novye огнеупоры* [New Refractories]. 2017;(10):8-14. (In Russ.)
17. Abdrakhimova E.S., Abdrakhimov V.Z. *Fiziko-khimicheskie protsessy pri obzhige kislotouporov* [Physical and chemical processes in firing acid-resistant materials]. Saint Petersburg: Nedra, 2003, 273 p. (In Russ.)

Поступила 17.03.2023; принята к публикации 28.04.2023; опубликована 27.06.2023
Submitted 17/03/2023; revised 28/04/2023; published 27/06/2023

Абдрахимов Владимир Закирович – доктор технических наук, профессор, почетный работник высшего профессионального образования РФ, профессор кафедры «Экология и землепользование», Самарский государственный экономический университет, Самара, Россия.
Email: 3375892@mail.ru. ORCID 0000-0002-1832-2572

Vladimir Z. Abdrakhimov – DrSc (Eng.), Professor, Honorary Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation, Professor of the Department of Ecology and Land Use, Samara State Economic University, Samara, Russia.
Email: 3375892@mail.ru. ORCID 0000-0002-1832-2572

ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

MATERIAL PROCESS ENGINEERING

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

УДК 621.771.07:621.787.6

DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-2-29-36



РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ШЕРОХОВАТОСТИ ПРИ ТЕКСТУРИРОВАНИИ ПОВЕРХНОСТИ ПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННЫМ МЕТОДОМ

Огарков Н.Н., Звягина Е.Ю.

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

Аннотация. В настоящее время разработка технологий обработки поверхности рабочих валков базируется на основе опыта эксплуатации существующих установок и промышленных экспериментов. Из существующих методов обработки рабочей поверхности валков, а именно дробебетное текстурирование, электроэрозионное текстурирование, лазерное текстурирование, электронно-лучевое текстурирование, был выбран и в настоящей работе рассмотрен способ электроэрозионного текстурирования, сущность которого заключается в том, что в результате него создаются эрозионные кратеры на поверхности вала. В данной работе получены теоретические зависимости между конструктивными параметрами установки для обработки поверхности валков методом электроэрозионного текстурирования (количество станций, количество электродов), технологическими режимами (ток, напряжение, частота и время действия разрядов), теплофизическими свойствами обрабатываемого материала (теплоемкость, теплопроводность) и параметрами текстурированного слоя (частотными и высотными). Это позволяет назначать новые и корректировать существующие режимы текстурирования поверхности валков дрессировочных станков с целью получения холоднокатаного листа в соответствии с требованиями потребителей. **Используемые методы.** В настоящей работе выполнено теоретическое исследование процесса электроэрозионного текстурирования прокатных валков, позволяющее установить количественную взаимосвязь между параметрами шероховатости текстурированной поверхности, конструктивными элементами установки, режимами текстурирования и энергоемкостью процесса. **Новизна.** Проведенные исследования позволяют установить взаимосвязь между конструктивными параметрами электроэрозионного текстурирования с учетом количества станций, одновременно участвующих в обработке поверхности валков, количества электродов в одной станции, количества электродов в одном ряду станции, режимами источника питания и параметрами шероховатости – частотными и высотными. **Практическая значимость.** Полученные результаты могут быть полезными для специалистов в области обработки металлов давлением, быть использованы операторами при настройке оборудования для обработки валков методом электроэрозионного текстурирования с сокращением пробных настроек.

Ключевые слова: шероховатость, электроэрозионное текстурирование, микрократер, электроды, поверхность прокатных валков

© Огарков Н.Н., Звягина Е.Ю., 2023

Для цитирования

Огарков Н.Н., Звягина Е.Ю. Расчет параметров шероховатости при текстурировании поверхности прокатных валков электроэрозионным методом // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №2. С. 29-36. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-2-29-36>



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

CALCULATION OF ROUGHNESS PARAMETERS DURING ELECTRICAL DISCHARGE TEXTURING OF THE SURFACE OF MILL ROLLS

Ogarkov N.N., Zvyagina E.Yu.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Current development of surface treatment technologies for work rolls is based on the experience of operating existing machines and industrial experiments. We chose electrical discharge texturing from the existing treatment methods for the roll working surface, namely texturing by blasting, electrical discharge texturing, laser texturing, and electron beam texturing, and described it in this paper. The principle of the method lies in making erosion craters on the roll surface. This paper presents the obtained theoretical dependences between the design parameters of the electrical discharge texturing machine for roll surface treatment (number of stations, number of electrodes), process modes (current, voltage, frequency and duration of spark discharges), thermophysical properties of the machined material (heat capacity, thermal conductivity) and the parameters of a textured layer (frequency and height). This contributes to assigning new modes and adjusting existing ones for texturing the surface of rolls of skin pass mills to produce cold rolled sheets in accordance with the consumers' requirements. **Methods Applied.** This paper describes a theoretical study conducted on the process of electrical discharge texturing of mill rolls to establish a quantitative relationship between the roughness parameters of the textured surface, the structural elements of the machine, texturing modes and energy intensity of the process. **Originality.** The conducted studies allow us to establish the relationship between the design parameters of electrical discharge texturing, taking into account the number of stations simultaneously involved in the roll surface treatment, the number of electrodes at one station, the number of electrodes in one row of the station, power modes and roughness parameters: frequency and height. **Practical Relevance.** The results obtained are useful for metal forming specialists, and operators, when setting up equipment for electrical discharge texturing of rolls, to reduce trial settings.

Keywords: roughness, electrical discharge texturing, microcrater, electrodes, mill roll surface

For citation

Ogarkov N.N., Zvyagina E.Yu. Calculation of Roughness Parameters During Electrical Discharge Texturing of the Surface of Mill Rolls. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 2, pp. 29-36. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-2-29-36>

Введение

Шероховатость поверхности холоднокатаной полосы обычно нормируется в соответствии с запросами потребителей. Требуемые параметры шероховатости поверхности полосы реализуются за счет формирования соответствующей шероховатости рабочей поверхности прокатных валков и репродукции ее на полосе в процессе дрессировки [1-9]. В зависимости от применяемого способа параметры микрогеометрии существенно отличаются друг от друга. Это обусловлено физическими явлениями процесса формирования профиля шероховатости, присущими каждому способу [10-16].

Наиболее распространенными способами получения требуемой шероховатости поверхности валков, в частности при производстве автолиста, являются насечка дробью и электроэрозионное текстурирование (ЭРТ) [17-22]. Насечка дробью используется преимущественно при отделке холоднокатаной полосы, из которой изготавливаются нелицевые кузовные детали автомобилей, а ЭРТ для отделки полосы является основным при изготовлении лицевых деталей [2, 11, 17].

В таблице представлены сравнительные характеристики основных способов формирования текстуры на поверхности прокатных валков [10].

Таблица. Сравнительные характеристики различных способов обработки поверхности прокатных валков
 Table. Performance comparison of different methods of the roll surface treatment

Параметр обработки	Способ обработки поверхности прокатных валков	
	ДМО (<i>SBT</i>)	ЭРТ (<i>EDT</i>)
Форма микронеровностей	Треугольные, трапецидальные	Кратеры
Характер расположения микровыступов	Случайный	Стохастический
Диапазон высотного параметра шероховатости Ra , мкм	1,5-6	0,5-10,0
Диапазон шагового параметра шероховатости P_c , см ⁻¹	50	50-150
Зависимость между Ra и P_c	Слабо зависят	Зависят
Производительность обработки	Высокая	Средняя
Протекание процесса	Ниже температуры рекристаллизации, происходит механический наклеп	Происходит перезакалка
Область применения	Нелицевые детали в автомобильной промышленности	Лицевые детали автомобилей

Методы исследования

В настоящей работе выполнено теоретическое исследование процесса электроэрозионного текстурирования прокатных валков, позволяющее установить количественную взаимосвязь между технологическими параметрами применяемого способа.

В процессе электроэрозионного текстурирования воздействию разрядов за секунду подвергается поверхность вала площадью

$$F = \pi D n_B S, \quad (1)$$

где D – диаметр текстурируемой поверхности; n_B – число оборотов вала; S – подача на один оборот вала.

Частота образования и разрывов дугового разряда на каждом электроде за единицу времени

$$f = \frac{1}{\tau}, \quad (2)$$

где τ – время действия дугового разряда.

Допуская, что в текстурировании этой площади последовательно участвуют все электроды, суммарное количество разрядов, приходящееся на эту площадь, составит

$$z = k_1 k_2 k_3 f, \quad (3)$$

где k_1 – количество станций, одновременно участвующих в текстурировании поверхности валков; k_2 – количество рядов электродов в одной станции; k_3 – количество электродов в одном ряду станций.

Площадь, подвергнутая эрозии от единичного разряда, определяется соотношением

$$F_{ед} = \frac{\pi D n_B S}{k_1 k_2 k_3 f}. \quad (4)$$

Согласно приведенной выше таблице каждый импульс разряда выплавляет микрократер в виде сферического сегмента с основанием радиусом r . Приравнявая площадь эрозии от единичного разряда (4) к площади основания сферического сегмента πr^2 и решая относительно радиуса этого основания, имеем

$$r = \sqrt{\frac{D n_B S}{k_1 k_2 k_3 f}}. \quad (5)$$

Анализ текстуры шероховатости, сформированной электроэрозионным методом, показывает, что углубления примыкают друг к другу с перекрытием на $1/3r$.

На **рис. 1** представлена схема образования микрократеров.

Зависимость (5) справедлива для обязательного совпадения микрократеров с импульсами разрядов при повторяющихся проходах станции установки текстурирования. Однако расположение микрократеров согласно той же таблице является стохастическим, подчиняется закону случайного распределения и поэтому этот процесс следует рассматривать как эргодический [11].

С учетом влияния числа проходов станции n на вероятность расположения кратеров с частичным их наложением друг на друга, на величину, составляющую некоторую долю от радиуса микрократера r , вводим в уравнение (5) функцию вида $\xi^{-n} n^{-1/n}$ для учета эргодичности процесса:

$$r = \sqrt{\frac{Dn_B S}{k_1 k_2 k_3 f}} \cdot \xi^{-n} \cdot n^{-1/n}, \quad (6)$$

где ξ – показатель эргодичности процесса; n – число проходов станции по поверхности вала при текстурировании.

Показатель эргодичности, определяющий вид функции, зависит от конструктивных параметров установки электроэрозионного текстурирования и точности ее настройки. Применительно к установке компании «Sarclad-Herkules» $\xi = 1,02$ [11].

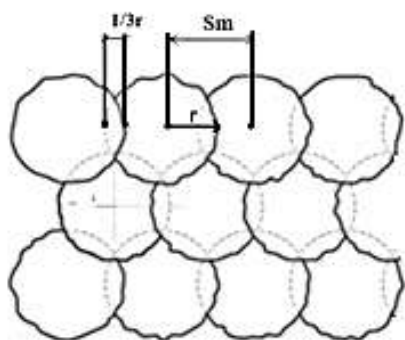


Рис. 1. Схема расположения микрократеров с перекрытием

Fig. 1. Layout of microcraters with an overlap

Анализ текстуры шероховатости, сформированной электроэрозионным методом, показывает, что микрократеры примыкают друг к другу с перекрытием в среднем на $1/3r$ (см. **рис. 1**). Поскольку шаг неровностей при таком расположении микрократеров $S_m = \frac{5}{3}r$, то частотный параметр, определяемый как $\frac{1}{S_m}$, равен

$$P_c = \frac{3}{5} \sqrt{\frac{k_1 k_2 k_3 f}{Dn_B S}} \xi^n n^{1/n}, \quad (7)$$

или, приводя к стандартной размерности см^{-1} , рекомендуется использовать следующее соотношение:

$$P_c = 6 \sqrt{\frac{k_1 k_2 k_3 f}{Dn_B S}} \xi^n n^{1/n}. \quad (8)$$

Высотный параметр текстурируемой поверхности определим по объему выплавленного микрократера в виде сегмента, который для сферической формы равен

$$V = \frac{\pi h r^2}{2} + \frac{\pi h^3}{6}, \quad (9)$$

где h – глубина выплавленного микрократера.

Поскольку шаговой параметр текстурированной поверхности намного больше высотного параметра, то вторым слагаемым при определении объема выплавленного микрократера можно пренебречь и считать, что уменьшение объема его на величину $\frac{\pi h^3}{6}$ компенсируется снижением объема реального микрократера за счет его перекрытия. В дальнейших расчетах объема микрократера принимаем его приближенное значение $\frac{\pi h r^2}{2}$.

На расплавление единичного углубления материала вала необходимо затратить энергию

$$q_{ед} = \frac{\pi}{2} [c\rho(\theta_{пл} - \theta_{о.с}) + a_o] h r^2, \quad (10)$$

где $c\rho$ – объемная теплоемкость материала вала; $\theta_{пл}$ – температура плавления материала вала; $\theta_{о.с}$ – температура окружающей среды; a_o – скрытая теплота плавления материала вала.

Допускаем, что распределение тепловых потоков между валком и электродом пропорционально теплопроводности их материалов, поэтому между ними имеется следующее соотношение:

$$q_B = q_{\lambda} \frac{\lambda_B}{\lambda_{\lambda}}, \quad (11)$$

где λ_B – коэффициент теплопроводности материала вала; λ_{λ} – коэффициент теплопроводности материала электрода.

Общие затраты энергии, необходимые для выплавления углублений в единицу времени, составляют

$$Q = \frac{\pi}{2} [c\rho(\theta_{пл} - \theta_{о.с}) + a_o] h r^2 k_1 k_2 k_3 f. \quad (12)$$

Полагаем, что энергия искрового разряда распределяется между поверхностью вала и электродом пропорционально их коэффициентам теплопроводности, тогда, выражая тепловую энергию через подводимую к установке электроэнергию и решая уравнение (12) относительно глубины выплавленного кратера с учетом коэффициента эргодичности и соотношения (2), имеем

$$h = \frac{2JU\eta_1\tau}{\pi[c\rho(\theta_{пл} - \theta_{о.с}) + a_o]r^2k_1k_2k_3f} \times \frac{\lambda_B}{(\lambda_B + \lambda_3)\xi^n n^{1/n}}, \quad (13)$$

где J и U – соответственно сила тока и напряжение источника питания; η_1 – коэффициент полезного действия силовой цепи установки.

Полученные результаты и их обсуждение

Сопоставление расчетных и экспериментальных параметров шероховатости прокатных валков, текстурированных электроэрозионным методом при различных числах проходов станций, иллюстрирует **рис. 2**.

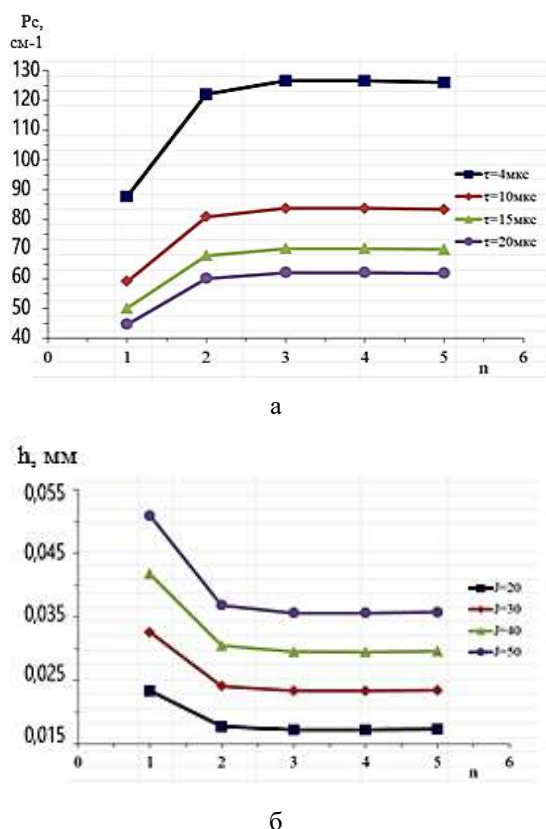


Рис. 2. Зависимость параметров шероховатого слоя от числа проходов: а – плотности пиков; б – высотного параметра шероховатости

Fig. 2. Dependence between the rough layer parameters and the number of passes: а is peak density; б is height of roughness

Из графиков, приведенных на **рис. 2**, видно, что параметры текстуры поверхности рабочих валков, подвергнутых процессу ЭРТ, полностью формируются при первых трех проходах станций текстурирующей установки.

Последующие проходы не изменяют параметры текстуры, сформированной этими тремя проходами. Это может быть объяснено тем, что при настроенных режимах текстурирующей установки первый проход формирует смешанную текстуру исходной шероховатости и шероховатости, полученной после этого прохода. Второй проход на базе смешанной текстуры формирует квазифинальную структуру текстурированного слоя, изменяя частотные и высотные параметры в 1,3-1,5 раза. Третий проход, изменяя параметры текстурированного слоя в значительно меньшей степени, не более чем на 5%, формирует окончательную текстуру обрабатываемой поверхности. Последующие проходы станций текстурирующей установки воспроизводят текстуру, полученную на предыдущих проходах.

Уменьшение времени действия дугового разряда в 5 раз с 20 до 4 мкс увеличивает плотность пиков P_c с 60 до 125 см⁻¹, то есть в 2,1 раза. Повышение силы тока с 20 до 50 мкА способствует увеличению высотного параметра с 0,017 до 0,037 мм, то есть в 2,2 раз.

Результаты влияния режимов обработки коррелируют с выводами назначения режимов текстурирования, рекомендованных в работе [20].

Заключение

Выполненные теоретические исследования позволяют установить взаимосвязь между конструктивными параметрами установки для обработки поверхности валков методом ЭРТ (количество станций, количество электродов), технологическими режимами (ток, напряжение, частота и время действия разрядов), теплофизическими свойствами обрабатываемого материала (теплоемкость, теплопроводность) и параметрами текстурированного слоя (частотными и высотными). Это позволяет назначать новые и корректировать существующие режимы текстурирования поверхности валков дрессировочных станков с целью получения холоднокатаного листа в соответствии с требованиями потребителей.

Полученные результаты могут быть полезными для специалистов в области обработки металлов давлением и использованы операторами при настройке оборудования для обработки валков методом ЭРТ с сокращением пробных настроек.

Список источников

1. Tang Jing Gang. Определение и анализ шероховатости поверхности холоднокатаных стальных листов // Iron Steel Vanadium Titanium. 2004, vol. 25, no. 2, pp. 66-70.

2. Choosing the materials performance and the form of an indenter for arrangement of texture at the surface of skin mill rolls / Ogarkov N.N., Platov S.I., Zvyagina E.Yu., Molochkova O.S., Makarova I.V. / IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019, vol. 5971, no. 1, p. 012195.
3. Адамек К.Х. Формирование микрогеометрии поверхности прокатных валков на текстурирующих станках // Сталь. 2001. №8. С. 48.
4. Research on Service Performances between Differernt Textured Cold Rolls / Sun Dale, Yao Lisong, Fan Qun and others // AIS Tech 2006 Proceedings, 2006, vol. II, pp. 285-289.
5. Оценка эффективности электроэрозионного текстурирования рабочих валков / А.М. Раимбеков, В.И. Тевс, С.Б. Заколюкин и др. // Сталь. 2006. № 2. С. 38-40.
6. Влияние электроэрозионно-обработанных рабочих валков дрессировочного стана на микротопографию поверхности проката / Ю.А. Бодяев, А.В. Горбунов, А.Ф. Радионов и др. // Сталь. 2006. №5. С. 90-94.
7. Influence of deformation and speed conditions of hot rolling in the finishing stands of wide hot strip mills on ST3SP steel structure / Mukhin Y.A., Solovyov V.N., Bobkov E.B. // Chernye Metallythis. 2018, no. 11, pp. 12-16.
8. Огарков Н.Н., Звягина Е.Ю., Залетов Ю.Д. Влияние способа обработки рабочей поверхности валка на качество холоднокатаного листа // Современные методы конструирования и технологии металлургического машиностроения: междунар. сб. науч. тр. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2006. С. 39-45.
9. Фрактальность структур как инструмент управления показателями качества металлопродукции / Г.Ш. Рубин, Э.М. Голубчик, К.С. Лукьянова и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т. 14. №4. С. 76-84.
10. Горбунов А.В. Совершенствование технологии производства холоднокатаной листовой стали с требуемыми характеристиками микротопографии поверхности для автомобильной промышленности: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.05 / Горбунов Андрей Викторович. Магнитогорск, 2011. 179 с.
11. Огарков Н.Н., Беляев А.И., Мухаметдинова Н.П. Формирование параметров поверхностного слоя прокатных валков. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. 89 с.
12. Flexural Forces of the Working Rollers and the Broadening of Thin Steel Strip in Hot Rolling / Koinov, T., Bel'skii, S.M., Mukhin, Y.A., Chuprov, V.B. // Steel in Translationthis link is disabled. 2018, vol. 48, no. 5, pp. 277-283.
13. Wilson G., Parker C. The Use of EDT Textured Rolls in a Wide Range of Application // 44th MWSP Conference Proceedings. 2002, vol. XL, pp. 889-898.
14. Utsch M, Vinke P. EDT – Roll Texturing Technology as a Base of Modern Surfaces in Automotive Cold Mill Flat Products // MS&T.: Conference Proceeding. 2004, pp. 599-607.
15. Paesold Dieter. Метод текстурирования при производстве холоднокатаных стальных полос. Texturverfahren bei der Herstellung kaltgewalzter Stahlbänder // Materialwissenschaft und Werkstofftechnik. 2006, vol. 37, no. 7, pp. 619-622.
16. Development of a scratch test method to determine adhesion and strength properties of coated steel sheets / Belov V.K., Gubarev E.V., Papshev A.V., Gofman N.G., Begletsov D.O. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019, vol. 597, no. 1, p. 012012.
17. Огарков Н.Н., Звягина Е.Ю., Исамагилов Р.Р. Теоретический анализ формирования шероховатости автомобильного листа при дрессировке в валках, обработанных дробью // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2019. Т. 62. №8. С. 600-605.
18. Лазерное текстурирование поверхности прокатных валков. Laser texturing of rolled surfaces / He Yunfeng, Du Dong, Liu Ying and others // XiongLi-juan Tsinghua Sei. and Technol. 2003, vol. 8, no. 2, pp. 236-240.
19. Wang Hong-bo, Jing Yu-an. Применение технологии лазерного текстурирования в производстве стальных полос // J. Anshan Inst. Iron and Steel Technol. 2000, vol. 23, no. 2, pp. 95-98.
20. О режимах текстурирования поверхности рабочих валков для производства листа с высококачественной микротопографией поверхности. Ч. 2. О выборе наиболее эффективных режимов текстурирования поверхности рабочих валков на установках ЭРТ HERKULES И PROFITEX 60S // Белов В.К., Беглецов Д.О., Дьякова М.В., Ласьков С.А., Жумагалиев Н.И., Журавлёв А.М. // Черная металлургия. 2017. №3 (1407). С. 83-88.
21. Польшин А.А., Бельский С.М., Мухин Ю.А. Особенности технологии текстурирования рабочих валков станов холодной прокатки // Вестник Липецкого государственного технического университета. 2017. №3 (33). С. 36-39.
22. Шацких И.И., Цымбал Т.В. Совершенствование метода электроэрозионной обработки валков станов холодной прокатки путем оптимизации режимов обработки // Современные материалы, техника и технологии. 2017. №2 (10). С. 139-147.

References

1. Tang Jing Gang. Test and analysis on surface roughness and micro-profile of cold rolled steel sheets. Iron Steel Vanadium Titanium. 2004;25(2):66-70.
2. Ogarkov N.N., Platov S.I., Zvyagina E.Yu., Molochkova O.S., Makarova I.V. Choosing the materials performance and the form of an indenter for arrangement of texture at the surface of skin mill rolls. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019;5971(1):012195.

3. Adamek K.Kh. Forming microgeometry of the mill roll surface on texturing machines. *Stal* [Steel]. 2001;(8):48. (In Russ.)
4. Sun Dale, Yao Lisong, Fan Qun et al. Research on service performances between different textured cold rolls. AIS Tech 2006 Proceedings. 2006;II:285-289.
5. Raimbekov A.M., Tevs V.I., Zakolyukin S.B. et al. Assessing efficiency of electrical discharge texturing of work rolls. *Stal* [Steel]. 2006;(2):38-40. (In Russ.)
6. Bodyaev Yu.A., Gorbunov A.V., Radionov A.F. et al. Effect of electrical discharge textured work rolls of a skin pass mill on surface microtopography of rolled products. *Stal* [Steel]. 2006;(5):90-94. (In Russ.)
7. Mukhin Yu.A., Solovyov V.N., Bobkov E.B. Influence of deformation and speed conditions of hot rolling in the finishing stands of wide hot strip mills on ST3SP steel structure. *Chernye Metally*. 2018;(11):12-16.
8. Ogarkov N.N., Zvyagina E.Yu., Zaletov Yu.D. Effect of a roll working surface treatment method on the quality of cold rolled sheets. *Sovremennye metody konstruirovaniya i tekhnologii metallurgicheskogo mashinostroeniya: mezhdunar. sb. nauch. tr.* [Current methods of design and technologies of metallurgical machine engineering: international proceedings]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2006, pp. 39-45. (In Russ.)
9. Rubin G.Sh., Golubchik E.M., Lukyanova K.S. et al. Fractality of structures as a tool of controlling quality parameters of steel products. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016;14(4):76-84. (In Russ.)
10. Gorbunov A.V. *Sovershenstvovanie tekhnologii proizvodstva kholodnokatanoy listovoy stali s trebuemyimi kharakteristikami mikrotopografii poverkhnosti dlya avtomobilnoy promyshlennosti: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Improving the manufacturing technology of cold rolled steel with the required parameters of surface microtopography for the automotive industry. PhD (Eng.) thesis]. Magnitogorsk, 2011. 179 p.
11. Ogarkov N.N., Belyaev A.I., Mukhametdinova N.P. *Formirovanie parametrov poverkhnostnogo sloya prokatnykh valkov* [Forming the parameters of the mill roll surface layer]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2012, 89 p. (In Russ.)
12. Koinov T., Belskii S.M., Mukhin Yu.A., Chuprov V.B. Flexural forces of the working rollers and the broadening of thin steel strip in hot rolling. *Steel in Translation*. 2018;48(5):277-283.
13. Wilson G., Parker C. The use of EDT textured rolls in a wide range of application. 44th MWSP Conference Proceedings. 2002;XL:889-898.
14. Utsch M., Vinke P. EDT – Roll texturing technology as a base of modern surfaces in automotive cold mill flat products. MS&T.: Conference Proceeding, 2004, pp. 599-607.
15. Paesold D. Texturiervfahren bei der Herstellung kaltgewalzter Stahlbänder. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*. 2006;37(7):619-622.
16. Belov V.K., Gubarev E.V., Papshev A.V., Gofman N.G., Begletsov D.O. Development of a scratch test method to determine adhesion and strength properties of coated steel sheets. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019;597(1):012012.
17. Ogarkov N.N., Zvyagina E.Yu., Ismagilov R.R. A theoretical analysis of forming roughness of automotive sheets during skin pass rolling in shotblast rolls. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya* [Izvestiya. Ferrous Metallurgy]. 2019;62(8):600-605. (In Russ.)
18. He Yunfeng, Du Dong, Liu Ying, Xiong Lijuan et al. Laser texturing of rolled surfaces. *Tsinghua Science and Technology*. 2003;8(2):236-240.
19. Wang Hong-bo, Jing Yu-an. Application of laser texturing technology in production of steel strip. *Journal of Anshan Institute of Iron and Steel Technology*. 2000;23(2):95-98.
20. Belov V.K., Begletsov D.O., Dyakova M.V., Laskov S.A., Zhumagaliev N.I., Zhuravlev A.M. Modes of the surface texturing of work rolls for manufacturing sheets with the high quality surface microtopography. Part 2. Selecting the most efficient modes of work roll surface texturing on the HERKULES and PROFITEX 60S electrical discharge texturing machines. *Chernaya metallurgiya* [Ferrous Metallurgy]. 2017;(3(1407)):83-88. (In Russ.)
21. Polshin A.A., Belskiy S.M., Mukhin Yu.A. Features of the texturing process of work rolls for cold rolling mills. *Vestnik Lipetskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Lipetsk State Technical University]. 2017;(3(33)):36-39. (In Russ.)
22. Shatskikh I.I., Tsymbal T.V. Improving an electrical discharge treatment method for cold rolling mill rolls by optimizing treatment modes. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii* [Current Materials, Engineering and Technologies]. 2017;(2(10)):139-147. (In Russ.)

Поступила 06.03.2023; принята к публикации 24.05.2023; опубликована 27.06.2023
Submitted 06/03/2023; revised 24/05/2023; published 27/06/2023

Огарков Николай Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры машин и технологий обработки давлением и машиностроения, член диссертационного совета, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: ogarkovnikolai@mail.ru.

Звягина Елена Юрьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры машин и технологий обработки давлением и машиностроения, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: zviagina_mmf@mail.ru. ORCID 0009-0001-4948-5366

Nikolai N. Ogarkov – DrSc (Eng.), Professor of the Department of Metal Forming Machines and Technologies and Mechanical Engineering, member of the thesis board, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: ogarkovnikolai@mail.ru.

Elena Yu. Zvyagina – PhD (Eng.), Associate Professor of the Department of Metal Forming Machines and Technologies and Mechanical Engineering, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: zviagina_mmf@mail.ru. ORCID 0009-0001-4948-5366

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.357.7
DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-2-37-46



ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ХРОМОВОГО ПОКРЫТИЯ ТИТАНОВЫХ ДЕТАЛЕЙ, ПОЛУЧЕННОГО ГАЛЬВАНИЧЕСКИМ СПОСОБОМ С ДИСКРЕТНЫМ ИЗМЕНЕНИЕМ ВРЕМЯТОКОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ХРОМИРОВАНИЯ

Галимов Д.М., Ардашев Д.В., Дегтярева-Кашутина А.С.

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет),
Челябинск, Россия

Аннотация. Нанесение гальванического хромового покрытия позволяет расширить области применения титановых деталей, например для конструкций морских газонефтяных платформ. Технология электрохимического осаждения хрома на поверхность титановых деталей имеет в своем основании особые подходы, заключающиеся в подготовке поверхности, использовании специальных составов электролитов, в создании токопроводящей пленки на поверхности детали. Ранее были описаны и внедрены технологии нанесения хромового покрытия на наружные и внутренние поверхности гидроцилиндров, изготовленных из стальных сплавов. В данной работе приведены результаты исследования качества хромового покрытия на титановых деталях, полученного с применением указанных ранее подходов при реализации технологий гальванического хромирования, внедренных для стальных деталей. Образцы, представленные для исследования, представляют собой диски, вырезанные из стержней из титанового сплава ВТ22 с нанесенным хромовым покрытием, полученным на установке гальванического осаждения хрома при четырех режимах. Представлены результаты исследования микротвердости хромового покрытия и материала основы деталей. Исследована морфология покрытий и их микроструктура. Для некоторых образцов определен слой окисленного материала основы при неплотном прилегании хромового покрытия к титановой детали. Для других образцов определено плотное прилегание и равномерное распределение покрытия по поверхности титанового сплава. Вероятной причиной присутствия подобного промежуточного слоя является применение режима «реверса» – обратного тока. Заключено, что микроструктура хромового покрытия определяется режимом электрохимического осаждения, при этом ступенчатое изменение плотности тока способствует формированию слоистой структуры покрытия.

Ключевые слова: электролитическое хромирование, титан, электролит, потенциал, плотность тока

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 22-29-00418, <https://rscf.ru/project/22-29-00418>.

© Галимов Д.М., Ардашев Д.В., Дегтярева-Кашутина А.С., 2023

Для цитирования

Галимов Д.М., Ардашев Д.В., Дегтярева-Кашутина А.С. Исследование качества хромового покрытия титановых деталей, полученного гальваническим способом с дискретным изменением времятоковых параметров процесса хромирования // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №2. С. 37-46. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-2-37-46>



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

STUDYING THE QUALITY OF A CHROMIUM COATING APPLIED ON TITANIUM PARTS BY ELECTROPLATING WITH DISCRETE CHANGES IN THE TIME AND CURRENT PARAMETERS OF CHROME PLATING

Galimov D.M., Ardashev D.V., Degtyareva-Kashutina A.S.

South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia

Abstract. The application of a galvanic chromium coating expands the use of titanium parts, for example, for offshore oil and gas platform structures. The technology of an electrochemical deposition of chromium on the surface of titanium parts is based on special approaches, consisting in the surface preparation, the use of special electrolyte compositions, and the formation of an electrically conductive film on the part surface. We previously described and implemented the technologies for applying chromium on the outer and inner surfaces of hydraulic cylinders made of steel alloys. This paper presents the results of studying the quality of a chromium coating on titanium parts applied by the previously mentioned approaches in the implementation of galvanic chromium plating technologies used for steel parts. The samples presented for the study are discs cut from VT22 titanium alloy rods with the chromium coating applied in an electroplating machine in four modes. The paper presents the studies on microhardness of the chromium coating and the part base material, and the morphology of the coatings and their microstructure. The layer of the oxidized base material was determined for some samples with a loose adhesion of the chromium coating on the titanium part. The other samples had a proper adhesion and a uniform distribution of the coating over the titanium alloy surface. The probable reason for such an intermediate layer is the use of the “reverse” current mode. The authors concluded that the chromium coating microstructure was determined by the electrochemical deposition mode, while the stepwise change in the current density contributed to the formation of a layered structure of the coating.

Keywords: electrolytic chromium plating, titanium, electrolyte, potential, current density

The research was supported by grant of the Russian Science Foundation No. 22-29-00418, <https://rscf.ru/project/22-29-00418>.

For citation

Galimov D.M., Ardashev D.V., Degtyareva-Kashutina A.S. Studying the Quality of a Chromium Coating Applied on Titanium Parts by Electroplating with Discrete Changes in the Time and Current Parameters of Chrome Plating. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 2, pp. 37-46. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-2-37-46>

Введение

Нанесение гальванического хромового покрытия является неотъемлемой частью технологии производства деталей с повышенной износостойкостью и превосходными триботехническими свойствами, которые обеспечивают применение хромированных деталей в гидроцилиндрах различного назначения. С другой стороны, титановые сплавы практически не имеют альтернатив в авиастроении при производстве лёгких и прочных деталей. Титановые сплавы VT22, VT22М, VT22И применяются для изготовления деталей и узлов ответственного назначения: сварные конструкции, турбины, штампованные узлы, высоконагруженные детали и конструкции. Указанные сплавы длительно работают при температуре до 400°C и кратковременно до 750°C. Сплав VT22 – свариваемый титановый сплав, для которого характерна высокая прокаливаемость. Указанный сплав широко применяется для изготовления крупногабаритных деталей внутреннего силового набора в отечественном авиастроении (например, балок,

лонжеронов, шпангоутов, нервюр, рельсов закрылков и предкрылков), а также для изготовления крупногабаритных силовых деталей и узлов шасси, в том числе сварных (траверс, балок основных шасси, тормозных рычагов) [1].

Нанесение гальванического хромового покрытия позволяет расширить области применения титановых деталей, например для конструкций морских газонефтяных платформ. Технология электрохимического осаждения хрома на поверхность титановых деталей имеет в своем основании особые подходы, заключающиеся в подготовке поверхности, использовании специальных составов электролитов, в создании токопроводящей пленки на поверхности детали [2].

Ранее были описаны и внедрены технологии нанесения хромового покрытия на наружные [3-5] и внутренние поверхности гидроцилиндров, изготовленных из стальных сплавов [6].

В данной работе приведены результаты исследования качества хромового покрытия на титановых деталях, полученного с применением указанных ранее подходов при реализации тех-

нологий гальванического хромирования, введенных для стальных деталей.

Материалы и методы исследования

Адгезия покрытия, наличие трещин, пористость покрытия и его механические свойства играют ключевую роль в эксплуатационных качествах детали с гальваническим хромовым покрытием [7-9]. Исследование поперечных микрошлифов таких деталей является высокоинформативным методом испытания качества покрытия [5, 10].

Образцы, представленные для исследования, представляют собой диски, вырезанные из титановых стержней с нанесенным хромовым покрытием.

Детали имеют единый чертеж, диаметр, равный 40 мм, длину, равную 280 мм. Исходные титановые детали механически обработаны: детали проходили обработку резцом на токарном станке, а также обработаны с помощью шлифовальной машины с абразивным наждачным полотном с номинальным размером зерна 50-63 мкм. Детали обработаны травлением в соляной кислоте на половину длины с выдержкой 2 ч при 20°C.

Электрохимическое осаждение титана производили в установке согласно патенту [11] с

расстоянием до анода 20 мм при режимах, описанных в табл. 1.

Режимы 1 и 3 проведены с последовательным увеличением плотности тока и выдержкой, время которой указано в соответствующем столбце. Режимы 2 и 4 проведены с предварительным окисляющим приложением обратного тока 50 А и последующим включением гальванического режима на 30 мин. После гальванического процесса титановые детали с хромовым покрытием промыты дистиллированной водой и высушены на воздухе.

Методами пробоподготовки, аналогичными примененным в работе [5], из деталей были получены микрошлифы, готовые для измерения микротвердости и структурных исследований. Измерения микротвердости и исследования морфологии проведены для образцов в радиальном и поперечном разрезе, при этом результаты исследований покрытий в двух сечениях соответствуют друг другу и представлены в виде усредненных значений.

Полученные результаты и их обсуждение

Исследование микротвердости покрытий.

В табл. 2 представлены результаты исследования микротвердости хромового покрытия и материала основы деталей.

Таблица 1. Время выдержки деталей в четырех режимах гальванического хромирования, мин

Table 1. Holding time of parts in four galvanic chromium plating modes, min

Электрохимические режимы хромирования	Ток, А											Итого, мин
	Реверс	50	75	100	125	150	175	200	225	250	300	
1	–	5	5	5	5	5	5	30	–	–	–	60
2	50А – 25 с	–	–	–	–	–	–	–	–	–	30	30
3	–	–	3	–	3	–	3	–	30	–	–	39
4	50А – 8 с	–	–	–	–	–	–	–	–	30	–	30

Таблица 2. Микротвердость, определенная при анализе сечений титановых деталей с гальваническим хромовым покрытием

Table 2. Microhardness determined by analyzing the sections of titanium parts with a galvanic chromium coating

Образец	Сечение	Микротвердость, НВ			
		Покрытие	Стандартное отклонение	Основа	Стандартное отклонение
1	А – вдоль оси	984	45	390	24
	Б – поперечное	888	76	399	18
	Среднее	940	80	395	25
2	А – вдоль оси	810	120	382	19
	Б – поперечное	841	131	418	17
	Среднее	825	130	400	20
3	А – вдоль оси	622	82	385	25
	Б – поперечное	810	70	379	28
	Среднее	720	80	380	30
4	А – вдоль оси	1075	110	380	33
	Б – поперечное	832	120	407	7
	Среднее	950	120	390	30
Средняя твердость материала основы				390	30

Результаты замеров микротвердости материала основы свидетельствуют о равномерном качестве титанового сплава и непосредственно титановых деталей. Среднее значение для всех образцов соответствует 390 HV, что в случае сплава BT22 является признаком закалки титановых деталей, так как в состоянии поставки твердость титановых прутков BT22 – HB 285 МПа, что соответствует приблизительно HV 280.

Режимы электрохимического осаждения неочевидным образом повлияли на усредненные значения микротвердости хромового покрытия, что требует дальнейшего изучения.

Исследование морфологии покрытий. Далее приведены изображения оптической инвертированной металлографии для образцов (табл. 3), соответствующих четырем режимам электрохимического осаждения (соответственно цифрам 1-4).

Таблица 3. Фотографии, полученные при измерении микротвердости
Table 3. Photomicrographs taken when measuring microhardness

Образец	Сечение	
	А – вдоль оси	Б – поперечное
1		
2		
3		
4		

Затем образцы были исследованы методами сканирующей (растровой) электронной микроскопии (далее – РЭМ).

Исследование проведено при ускоряющем напряжении 20 кВ, рабочем расстоянии 10 мм. Изображения РЭМ получены при регистрации

обратно-рассеянных электронов. Примеры изображений поверхности сечений образцов, включающие участки с покрытием, приведены в **табл. 4**.

Характер рельефа материала основы, равно как и рельефа поверхности покрытия, сходен для всех образцов.

Таблица 4. Характерные изображения РЭМ образцов хромового покрытия на титановых деталях при различных режимах электрохимического осаждения

Table 4. Typical SEM images of the samples of the chromium coating on titanium parts in various electrochemical deposition modes

Образец	Характерное изображения РЭМ	
1		
2		
3		
4		

Исследование толщины покрытий. Толщина покрытий определена в поперечном сечении. Исследована поверхность сечения, проведены замеры толщины слоя на нескольких участках (не менее 5 шт.) сечения образца в области покрытия, вычислены средние значения по участкам анализа и средние значения толщины покрытия для каждого из образцов. Результаты представлены в табл. 5.

Толщина покрытия составила значения от 22 мкм – в режимах 3 и 4 до 27 и 29 мкм – в режимах 1 и 2 соответственно. Первый режим с постепенным дискретным увеличением силы тока позволил получить достаточно твердое покрытие

с толщиной, равной 27 мкм в среднем.

Наибольшая толщина покрытия характерна для образца 2 с наибольшим значением тока, равным 300 А при выдержке 30 с.

Малое по времени и номиналу силы тока приложение гальванического тока приводит к меньшей толщине покрытия, как в случае режимов 3 и 4, что является подтверждением закона Фарадея.

Исследование микроструктуры покрытия. На изображении РЭМ представлен участок микрошлифа хромового покрытия образца 1 (рис. 1) на титановой основе, содержащий дефект, который, вероятно, возник при пробоподготовке.

Таблица 5. Размер слоя покрытий, определенный при анализе сечений титановых деталей с гальваническим хромовым покрытием

Table 5. The size of the coating layer determined by analyzing the sections of titanium parts with a galvanic chromium coating

Образец	Усреднение по участку анализа, мкм							Среднее, мкм	Стандартное отклонение
	1	2	3	4	5	6	7		
1	27,0	27,1	26,4	26,9	25,6	28,7	–	26,9	0,9
2	29,0	34,4	28,2	27,9	27,4	26,1	27,0	28,6	2,4
3	19,4	21,4	23,9	22,4	21,0	–	–	21,6	1,4
4	23,7	23,0	23,1	23,3	19,3	18,3	–	21,8	2,0

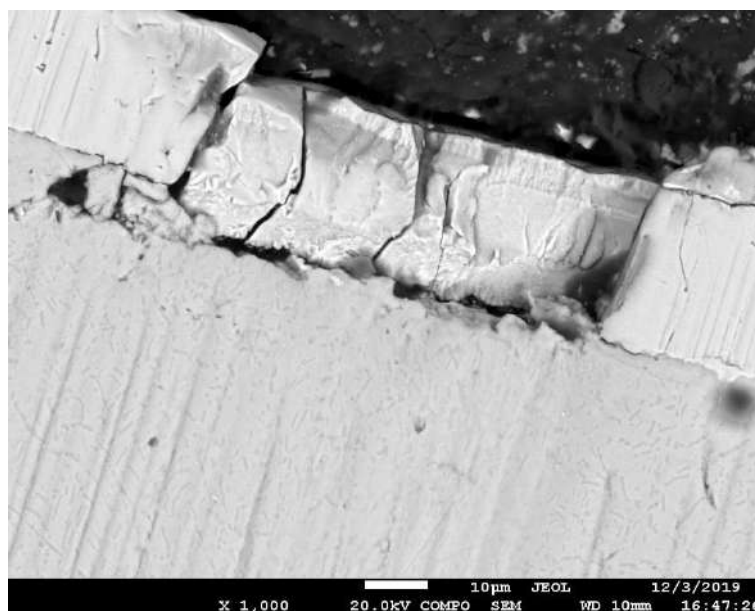


Рис. 1. Образец 1. Участок микрошлифа хромового покрытия

Fig. 1. Sample 1. A part of the polished microspecimen of the chromium coating

Особенностью данного участка является излом хромового покрытия, не затронутый микрошлиф-подготовкой. Различимы слои хромового покрытия: прилегающий к материалу основы – титану, основной (средний) слой, наружный слой хромового покрытия. Данные слои определены косвенно, по изображению РЭМ. Слои хромового покрытия связаны между собой в единый монолитный слой, однако характер рельефа скола слоев различен.

Слои соответствуют режимам гальванического процесса, которые поочерёдно были применены при нанесении данного покрытия.

Особенностью данного участка является излом хромового покрытия, не затронутый микрошлиф-подготовкой. Различимы слои хромового покрытия: прилегающий к материалу основы – титану, основной (средний) слой, наружный слой хромового покрытия. Данные слои определены косвенно, по изображению РЭМ. Слои хромового покрытия связаны между собой в единый монолитный слой, однако характер рельефа скола слоев различен.

Слои соответствуют режимам гальванического процесса, которые поочерёдно были применены при нанесении данного покрытия.

Можно заключить, что для образца 1 характерна превосходная адгезия, определяемая визуально методами РЭМ, как полное прилегание материалов покрытия и основы. Покрытие имеет микротрещины от наружной поверхности в глубину, шириной менее 1 мкм, не

приводящие к разрушению и отслоению покрытия. В целом покрытие стоит оценить как сплошное и равномерное.

Поверхность материала основы образца 2 (рис. 2) представляет собой отдельный слой толщиной 6 мкм, полученный, вероятно, при электрохимическом травлении титана в режиме обратного тока. На сколе хромового покрытия возможно определить по крайней мере два слоя, полученные, вероятно, при изменении электрохимического режима нанесения покрытия.

Для образца 2 характерно полное прилегание сплошного хромового покрытия к материалу указанного слоя. В результате измерений микротвердость данного покрытия определена как меньшая, чем при ступенчатом режиме 1, а статистический разброс значений оказался в два раза большим (стандартное отклонение в 120-130 единиц твердости при 45-70 единицах для образца 1). Возможной причиной небольшой разницы в значениях твердости и воспроизводимости результатов является вклад промежуточного слоя в образце 2, который распределяет нагрузку индентора, приложенную к хромовому слою, при слабом адгезионном взаимодействии между слоями. В результате значения микротвердости покрытия образца 2 на 100 единиц твердости ниже, чем в образце 1. Покрытие сложно отнести к равномерным, так как определен значительный разброс значений – от 26 до 34 мкм. Дефекты адгезии и неравномерность не позволяют отнести данное покрытие к качественным.

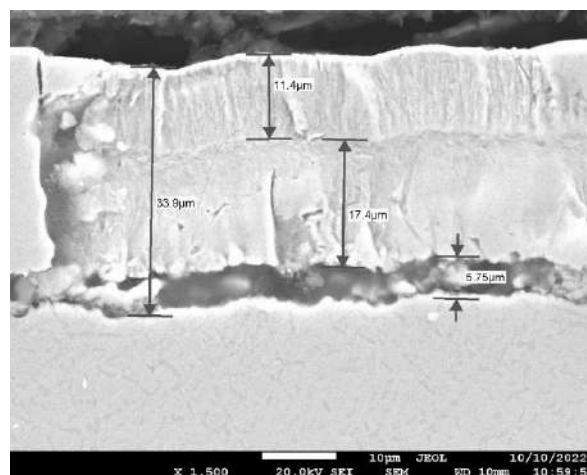
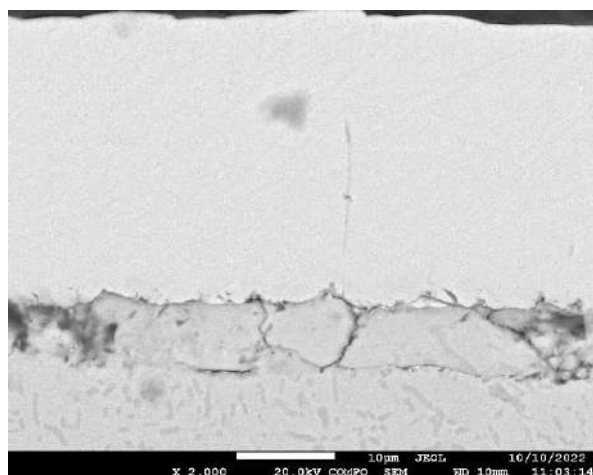


Рис. 2. Образец 2. Поверхность материала основы
Fig. 2. Sample 2. Base material surface

Для образца 3 (рис. 3) характерна превосходная адгезия, определяемая визуально методами РЭМ, как полное прилегание материалов покрытия и основы. Покрытие имеет микротрещины от наружной поверхности в глубину, шириной менее 1 мкм, не приводящие к разрушению и отслоению покрытия. В целом покрытие стоит оценить как сплошное и равномерное.

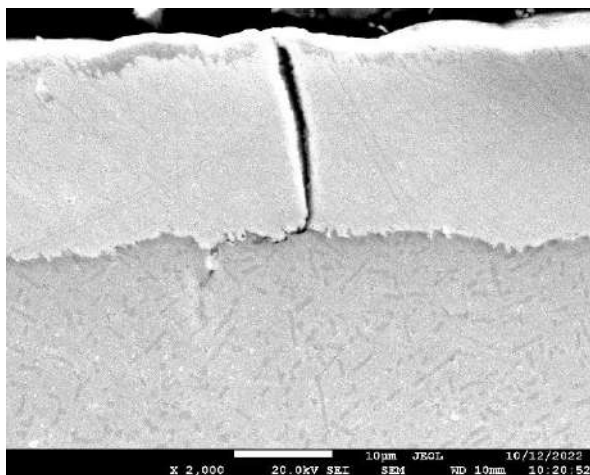


Рис. 3. Образец 3. Микротрещина
Fig. 3. Sample 3. Microcrack

В образце 4 (рис. 4) исследованы участки с превосходной адгезией покрытия, однако определены и другие участки, на которых можно наблюдать неплотное прилегание хрома к титану, что может приводить к отслоению покрытия. В остальном покрытие стоит оценить как сплошное и равномерное. Микротвердость образца 4, подобно микротвердости в образце 2, имеет заметный разброс значений, что, вероятно, также связано с наличием участков покрытия со слабым адгезионным взаимодействием с титановым материалом основы, то есть множественным отслоением покрытия.

На образцах 2 и 4 определен слой окисленного материала основы, который визуализируется как материал, отделяющий титановый сплав и осаждаемый хром, что приводит к неплотному прилеганию хромового покрытия к титановой детали. Вероятной причиной присутствия подобного промежуточного нежелательного слоя является применение режима «реверса» – обратного тока, что, по всей видимости, является излишней процедурой при условии предварительного травления деталей в соляной кислоте. Образцы 1 и 3, полученные в различных режимах электрохимического осаждения хрома без режима «реверса», отличаются плотным прилеганием хромового покрытия.

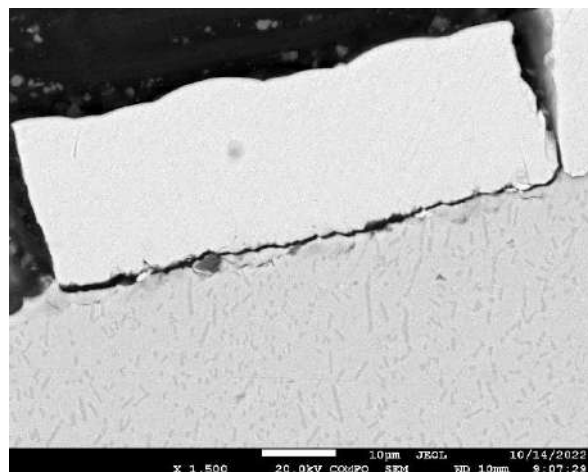


Рис. 4. Образец 4. Отслоение покрытия
Fig. 4. Sample 4. Peeling of the coating

При ступенчатом постепенном увеличении тока, реализованном в режимах 1 и 3, получена различная твердость: 940 и 720 HV соответственно. Толщина покрытий в связи с большим током и временем электрохимического процесса больше в образце 1. Однако хромовое покрытие, полученное и в режиме 1, и в режиме 3, следует признать качественным. Выбор режимов следует проводить в соответствии с требованиями к конкретному изделию: большая твердость необходима при большей нагруженности детали трением, а при ударных воздействиях необходимо применять более пластичное покрытие с меньшей твердостью. Декоративные покрытия не требуют большой толщины слоя, в отличие от деталей машин и оборудования. Важным фактором подбора режима является экономическая составляющая, так как расход электроэнергии и временные затраты являются ресурсами, определяющими как характеристики и качество покрытия, так и его стоимость.

Заключение

1. Подтверждена возможность применения методики и установки для хромирования стальных деталей энергоэффективным и экосберегающим способом для гальванического нанесения твердого хромового покрытия на титановые валы.
2. Для улучшения адгезионного взаимодействия хрома по отношению к титану рекомендуется проводить предварительную подготовку поверхности материала детали с травлением в соляной кислоте.
3. Режим подачи «обратного тока» приводит к появлению окисленного титанового слоя на поверхности детали, что является негативным фактором для качества хромового покрытия.

4. Микроструктура хромового покрытия определяется режимом электрохимического осаждения. Ступенчатое изменение плотности тока способствует формированию слоистой структуры покрытия.

5. Электрохимический режим осаждения твердого хромового покрытия с постепенным дискретным увеличением силы тока позволяет получить покрытие необходимой толщины с превосходными адгезионным прилеганием, равномерностью и требуемой твердостью.

6. Твердое хромовое покрытие, получаемое описываемым методом на запатентованной ранее установке гальванического нанесения при режимах без использования «обратного» тока, отличается плотным прилеганием к титановому сплаву ВТ22 основы детали и соответствует качественному покрытию с твердостью 720 и 940 HV.

7. Дальнейшая задача исследований заключается в установлении влияния режимов электрохимического осаждения на слоистую структуру хромового покрытия.

Список источников

1. Современные магниевые и титановые сплавы, применяемые в авиастроении / Морозова Е.А., Прокаев А.Е., Калужная С.А., Мамышев А.Р. // Актуальные исследования. 2022. №16 (95). С. 10-14.
2. Технология нанесения хромового покрытия на детали из титановых сплавов / Юркевич С.Н., Полякова Т.Л., Ващенко И.М., Андриенко К.Г., Аблажей Н.М. // Гальванотехника и обработка поверхности. 2017. Т. 25, № 3. С.48-53. doi: 10.47188/0869-5326_2017_25_3_48
3. Gruba O.N., Shmidt I.V., Gorodkova A.E. Influence of the Parameters of Galvanomechanical Chromium Plating on the Coating Quality and Process Productivity // Solid State Phenomena, 2018, vol. 284, pp. 1173-1177.
4. Zhrebtcov D.A., Gruba O.N., Smolyakova K.R. Effect of Abrasive Tools in Galvanomechanical Treatment on the Roughness of the Deposited Chromium Layer // Solid State Phenomena, 2018, vol. 284, pp. 1178-1183.
5. Galimov D.M., Ardashev D.V., Dyakonov A.A. Methods for determining the quality of galvanic chromium coating // Solid State Phenomena, 2018, vol. 284, pp. 1307-1312.
6. Ardashev D.V., Shipulin L.V., Degtyareva-Kashutina A.S. Aspects of Applying Hard Chromium Coatings on the Inner Surfaces of Components for Hydraulic Drives with Hydrostatic Guideways // Solid State Phenomena. 2021, vol. 316, pp. 827-832, doi: 10.4028/www.scientific.net/SSP.316.827
7. Podgornik B., Massler O., Kafexhiu F., Sedlacek M. Crack density and tribological performance of hard-chrome coatings // Tribology International, 2018, vol. 121, pp. 333-340, doi: 10.1016/j.triboint.2018.01.055.
8. Шлугер М.А. Гальванические покрытия в машиностроении. М.: Машиностроение, 1985. 240 с.
9. Mekicha M.A., de Rooij M.B., Matthews D.T.A., Pelletier C., Jacobs L., Schipper D.J. The effect of hard chrome plating on iron fines formation // Tribology International, 2020, vol. 142, p. 106003, doi: 10.1016/j.triboint.2019.106003.
10. ГОСТ 9.302-88. Покрытия металлические и неметаллические. Методы контроля. М.: Госстандарт, 1990. 50 с.
11. Патент на полезную модель № 186265 U1 Российская Федерация, МПК C25D 7/04. Установка для нанесения гальванических покрытий: № 2018132309: заявл. 10.09.2018: опубл. 15.01.2019 / Д.В. Ардашев, А.А. Дьяконов, Д.А. Жеребцов [и др.]; заявитель ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)».

References

1. Morozova E.A., Prokaev A.E., Kalyuzhnaya S.A., Mamyshv A.R. Modern magnesium and titanium alloys used in aircraft construction. Aktualnye issledovaniya [Current Research]. 2022;(16(95)):10-14. (In Russ.)
2. Yurkevich S.N., Polyakova T.L., Vashchenko I.M., Andrienok K.G., Ablazhei N.M. Process of chromium plating on parts made of titanium alloys. Galvanotekhnika i obrabotka poverkhnosti [Electroplating and Surface Treatment], 2017;25(3):48-53. DOI: 10.47188/0869-5326_2017_25_3_48
3. Gruba O.N., Shmidt I.V., Gorodkova A.E. Influence of the parameters of galvanomechanical chromium plating on the coating quality and process productivity. Solid State Phenomena. 2018;284:1173-1177.
4. Zhrebtcov D.A., Gruba O.N., Smolyakova K.R. Effect of abrasive tools in galvanomechanical treatment on the roughness of the deposited chromium layer. Solid State Phenomena. 2018;284:1178-1183.
5. Galimov D.M., Ardashev D.V., Dyakonov A.A. Methods for determining the quality of galvanic chromium coating. Solid State Phenomena. 2018;284:1307-1312.
6. Ardashev D.V., Shipulin L.V., Degtyareva-Kashutina A.S. Aspects of applying hard chromium coatings on the inner surfaces of components for hydraulic drives with hydrostatic guideways. Solid State Phenomena. 2021;316:827-832. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.316.827
7. Podgornik B., Massler O., Kafexhiu F., Sedlacek M. Crack density and tribological performance of hard-chrome coatings. Tribology International. 2018;121:333-340. DOI: 10.1016/j.triboint.2018.01.055
8. Shluger M.A. Galvanicheskie pokrytiya v mashinostroyenii [Galvanic coatings in mechanical engineering]. Moscow: Mashinostroyenie, 1985, 240 p. (In Russ.)
9. Mekicha M.A., de Rooij M.B., Matthews D.T.A., Pelletier C., Jacobs L., Schipper D.J. The effect of hard chrome plating on iron fines formation. Tribology Inter-

- national. 2020;142:106003. DOI: 10.1016/j.triboint.2019.106003
10. State Standard GOST 9.302-88. Pokrytiya metallicheskie i nemetallicheskie. Metody kontrolya [Metal and non-metal coatings. Control methods]. Moscow: Gosstandart, 1990, 50 p. (In Russ.)
11. Ardashev D.V., Dyakonov A.A., Zherebtsov D.A. et al. Ustanovka dlya naneseniya galvanicheskikh pokrytiy [Electroplating machine]. Utility model patent RU, no. 186265 U1, 2019.

Поступила 20.04.2023; принята к публикации 03.05.2023; опубликована 27.06.2023
Submitted 20/04/2023; revised 03/05/2023; published 27/06/23

Галимов Дамир Муратович – научный сотрудник, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия.
Email: galimovdm@susu.ru. ORCID 0000-0002-6060-5525

Ардашев Дмитрий Валерьевич – доктор технических наук, доцент, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия.
Email: ardashevdm@susu.ru. ORCID 0000-0002-8134-2525

Дегтярева-Кашутина Анастасия Сергеевна – старший преподаватель, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия.
Email: degtiareva-kashutinaas@susu.ru. ORCID 0000-0003-1781-0395

Damir M. Galimov – Researcher,
South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia.
Email: galimovdm@susu.ru. ORCID 0000-0002-6060-5525

Dmitry V. Ardashev – DrSc (Eng), Associate Professor,
South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia.
Email: ardashevdm@susu.ru. ORCID 0000-0002-8134-2525

Anastasia S. Degtyareva-Kashutina – Senior Lecturer,
South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia.
Email: degtiareva-kashutinaas@susu.ru. ORCID 0000-0003-1781-0395

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

УДК 620.17

DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-2-47-53



НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ НАКОПЛЕНИЯ УСТАЛОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В СТАЛИ Св-09Г2С, ПОЛУЧЕННОЙ 3D-ПЕЧАТЬЮ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ НАПЛАВКОЙ

Аносов М.С., Рябов Д.А., Чернигин М.А., Соловьев А.А.

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

Аннотация. Интенсивное развитие технологии аддитивного выращивания материалов, которые существенно отличаются от классических материалов по структуре и свойствам, требует изучения характера изменения информативных параметров структурной деградации данных групп сплавов для обеспечения их неразрушающего контроля при эксплуатации. В работе проведено исследование накопления структурных повреждений при усталостном нагружении стали 09Г2С, полученной на основе технологии WAAM с использованием комбинации неразрушающих методов контроля (физическая акустика, магнитный контроль, оптические исследования). В качестве информативных характеристик предложены такие показатели, как фрактальная размерность микроструктуры в рабочей зоне (D_F), акустический параметр (D), а также коэрцитивная сила (H_c). Показано, что в процессе усталостного нагружения в отдельных зернах материала уже на начальном этапе нагружения наблюдается появление большого количества полос скольжения с последующим увеличением как их количества, так и толщины. Установлено, что полученные зависимости характеристик неразрушающего контроля имеют определенную корреляцию и отражают структурные изменения в материале. Так, в процессе усталостного нагружения на этапе до образования макротрещины наблюдается монотонное уменьшение показателя фрактальной размерности микроструктуры и акустического параметра, а также увеличение коэрцитивной силы. После образования макротрещины характер зависимости указанных характеристик изменяется и наблюдается незначительное увеличение акустического параметра и снижение коэрцитивной силы до начальных значений. Установленные зависимости информативных параметров неразрушающих методов контроля позволяют однозначно судить о стадии разрушения материала и его остаточном ресурсе и могут быть использованы для диагностики материалов в процессе их испытаний и при эксплуатации.

Ключевые слова: 3D-печать, технология WAAM, усталостное нагружение, фрактальный анализ, неразрушающий контроль

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-00095 «Разработка научно-технологических основ структурообразования конструкционных материалов, полученных путем аддитивного электродугового выращивания для формирования механических свойств при усталости с использованием подходов искусственного интеллекта».

© Аносов М.С., Рябов Д.А., Чернигин М.А., Соловьев А.А., 2023

Для цитирования

Неразрушающий контроль накопления усталостных повреждений в стали Св-09Г2С, полученной 3D-печатью электродуговой наплавкой / Аносов М.С., Рябов Д.А., Чернигин М.А., Соловьев А.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №2. С. 47-53. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-2-47-53>



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

NON-DESTRUCTIVE TESTING OF THE ACCUMULATION OF FATIGUE DAMAGE IN STEEL Sv-09G2S PRODUCED BY WIRE ARC ADDITIVE MANUFACTURING

Anosov M.S., Ryabov D.A., Chernigin M.A., Solovyov A.A.

Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The rapid development of the technology of wire arc additive manufacturing of materials that differ significantly from conventional materials in their structure and properties entails studying the nature of changes in the informative parameters of the structural degradation of these groups of alloys to ensure their non-destructive testing during operation. The paper describes the studies on the accumulation of structural damage under fatigue loading of steel 09G2S produced by WAAM technology, using a combination of non-destructive testing methods (physical acoustics, magnetic particle inspection, optical studies). The proposed informative characteristics include such parameters as the fractal dimension of the microstructure in the operating area (D_F), the acoustic parameter (D), and coercive force (H_c). It is shown that during fatigue loading individual grains of the material show a large number of slip bands and a subsequent increase in both their number and thickness already at the starting stage of loading. It has been established that the obtained relationships of the non-destructive testing characteristics have a certain correlation and reflect structural changes in the material. Thus, during the fatigue loading process, before the macrocrack formation, there is a monotonic decrease in the fractal dimension of the microstructure and the acoustic parameter, as well as an increase in coercive force. After the macrocrack formation the nature of the relationship between these characteristics changes and there is a slight increase in the acoustic parameter and a decrease in coercive force to the initial values. The established relationships of the informative parameters of non-destructive testing methods contribute to shaping an unambiguous opinion about the stage of fracture of the material and its residual life and may be used to diagnose materials during their testing and operation.

Keywords: 3D printing, WAAM technology, fatigue loading, fractal analysis, non-destructive testing

The study was funded by grant of the Russian Science Foundation No. 22-79-00095 “Developing a scientific and technological framework for the structure formation of structural materials produced by wire arc additive manufacturing to form mechanical properties during fatigue, using artificial intelligence approaches”.

For citation

Anosov M.S., Ryabov D.A., Chernigin M.A., Solovyov A.A. Non-Destructive Testing of the Accumulation of Fatigue Damage in Steel Sv-09G2S Produced by Wire Arc Additive Manufacturing. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 2, pp. 47-53. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-2-47-53>

Введение

Интенсивное развитие современных технологий 3D-печати и их замещение классических способов получения деталей машин обуславливает разработку инструментов оценки их долговечности в процессе эксплуатации. Наиболее производительным и простым с точки зрения реализации является метод 3D-печати электродуговой наплавкой (WAAM) [1-3]. Сам процесс электродуговой наплавки – сложный процесс, зависящий прежде всего от режимов печати и параметров термического цикла, при этом микроструктура получаемого материала существенно отличается от структуры материала, полученного из проката. Разработанные критерии накопления структурных повреждений для материалов, полученных путем механической обработки из проката, для материалов, полученных

наплавкой, будут не актуальны, что связано в том числе и со значительной анизотропией таких материалов. Это, в свою очередь, требует получения базы информативных параметров, определяющих степень структурных повреждений в материале, полученном по технологии WAAM.

Наиболее интересным с точки зрения изучения накопления структурных повреждений является процесс усталостного нагружения материала. Это связано с тем, что большое количество деталей механизмов и конструкций работают в условиях усталостных нагрузок [4] и, как показывает статистика, около 80% поломок и аварий связаны с усталостным характером их нагружения [5].

Зарождение и развитие трещин при усталостном нагружении начинается, прежде всего, в поверхностном слое деталей [6]. Как показали проведенные ранее исследования, одним из эффективных инструментов оценки структурных изме-

нений в поверхностном слое детали является фрактальный анализ эволюции микроструктуры [7, 8], позволяющий проводить количественную оценку процессов деградации структуры металла.

Для повышения точности оценки структурной поврежденности материала необходимо использование комбинированных методов неразрушающего контроля. Сравнительный анализ современных методов неразрушающего контроля показывает, что к числу наиболее перспективных методов контроля структурного состояния материала на стадиях эксплуатации до появления макродефектов относятся методы физической акустики, а также магнитный метод контроля и диагностики материала.

Таким образом, целью настоящего исследования является оценка накопления усталостных повреждений в стали Св-09Г2С, полученной 3D-печатью электродуговой наплавкой с использованием комбинации методов неразрушающего контроля.

Материалы и методы исследования

В качестве материала для исследования выступает сталь 09Г2С, наиболее широко используемая для изготовления заготовок методом электродуговой наплавкой. Химический состав стали Св-09Г2С, %: С – 0,09; Si – 0,9; Mn – 1,9; Ni – 0,12; S – 0,008; P – 0,12; Cr – 0,14; Cu – 0,09; Fe – основа.

Образцы для испытания материала на растяжение и усталость изготавливались на специализированном стенде для аддитивной электродуговой наплавки [4]. Вырезка образцов из полученной заготовки в виде напавленной стенки толщиной порядка 10 мм осуществлялась вдоль и поперек относительно направления наплавки для оценки анизотропии механических свойств материала.

Для испытаний на растяжение изготавливались образцы в соответствии с требованиями ГОСТ 11150 с рабочим сечением 5×10 мм. Растяжение образцов проводили на разрывной силовой машине Tinius Olsen H100KU при скорости нагружения 10 мм/с.

Испытания образцов на усталость проводили по схеме консольного изгиба на образцах толщиной 3 мм и размером рабочей зоны 60×15 мм (тип IV) по ГОСТ 25.502) на частоте 8,3 Гц. Испытания проводили с учетом требований ГОСТ 25.502-79.

Оптические исследования материала в рабочей зоне проводили на микроскопе KYENCE-VHX 1000. Для предварительной обработки и оценки фрактальной размерности изображений микроструктур (D_F) и структурной поврежденности была использована специализированная программа (Свидетельство №2022666922 «Програм-

ма для оценки показателей микроструктуры и структурной поврежденности материалов»).

Для акустических измерений применяли измерительно-вычислительный акустический комплекс АИС НРК-3 [9]. Номинальная частота датчиков 5 МГц. В качестве информативного параметра в данном случае использовался безразмерный параметр D , определяемый по формуле

$$D = \frac{C_1 + C_2}{C_3},$$

где C_1 и C_2 – скорости распространения сдвиговых упругих волн с поляризацией (направлением колебания отдельных частиц) вдоль оси образца и поперек оси соответственно; C_3 – скорость распространения (задержка) продольной упругой волны.

Для оценки магнитных характеристик использовался магнитный анализатор металлов – коэрцитиметр МА-412ММ. В качестве магнитных характеристик оценивались: остаточная намагниченность B_r , коэрцитивная сила H_c , отношение H_c/B_r .

Оценку микротвердости материала проводили, используя микротвердомер ИТВ-1-АМ при нагрузке 1 кгс. На каждом этапе было проведено не менее 5-ти измерений (акустических, магнитных характеристик, микротвердости) с последующей статистической обработкой полученных данных.

Результаты испытаний и их обсуждение

По результатам испытаний на растяжение определены значения механических характеристик стали 09Г2С, полученной наплавкой в широком диапазоне пониженных температур испытания. Предел прочности сплава составил порядка $\sigma_b = 510$ МПа, условный предел текучести $\sigma_{0,2} = 365$ МПа, а относительное удлинение $\delta = 28\%$, что соизмеримо с характеристиками сплава 09Г2С, полученного из проката.

В соответствии с результатами испытаний на растяжение испытания на усталость проводили при амплитудах напряжений в цикле от 300 до 435 МПа. По результатам испытаний образцов на усталость построены кривые усталости для широкого диапазона амплитуд напряжений. При этом установлено незначительное (не выше 20%) увеличение долговечности образцов, полученных в продольном направлении относительно наплавки по сравнению с поперечными образцами.

Процесс эволюции структуры стали 09Г2С в рабочем сечении и в отдельном наиболее благоприятно расположенном зерне относительно направления нагружения показан на **рис. 1**.

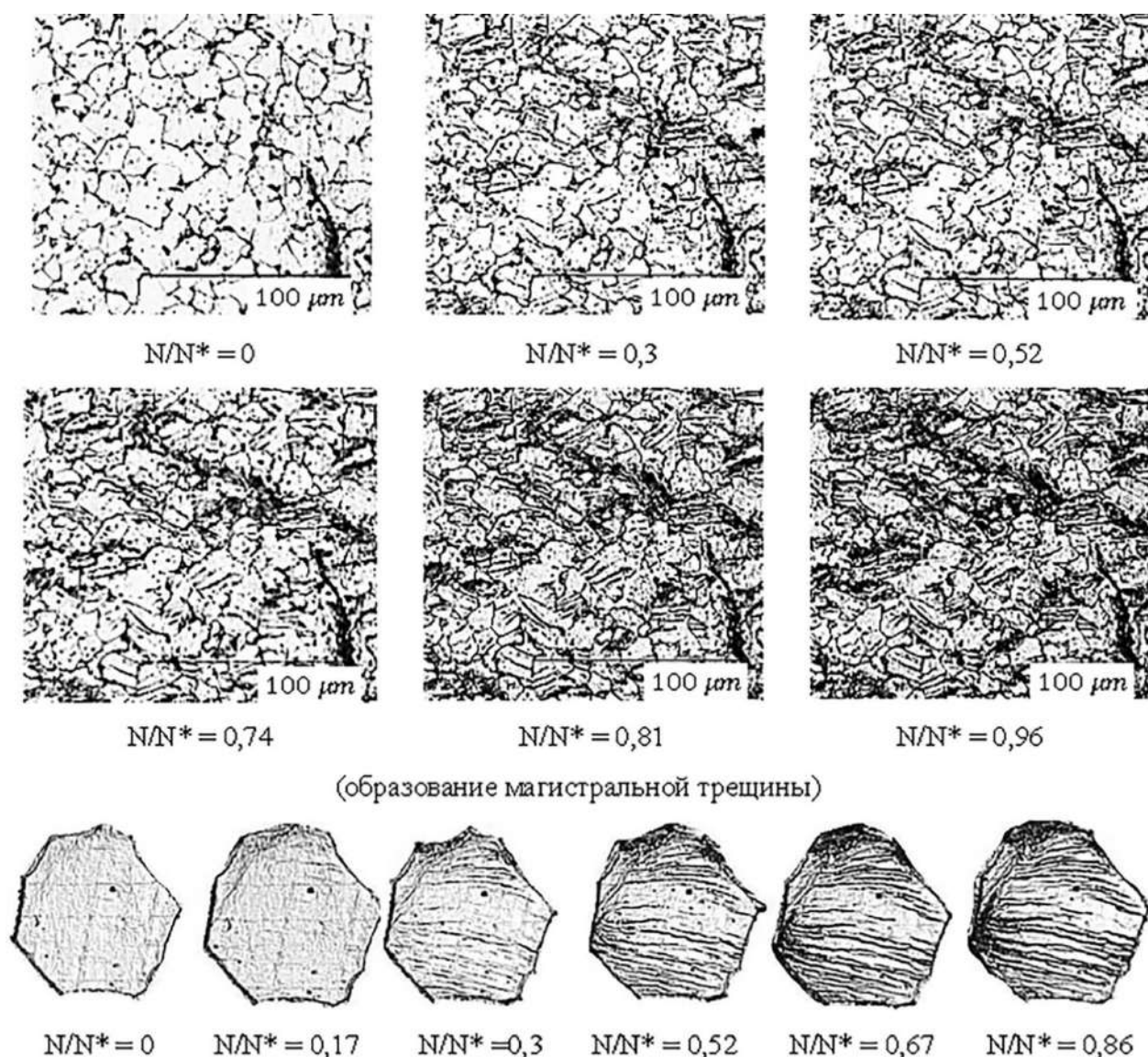


Рис. 1. Структурные изменения в процессе усталостного нагружения в рабочем сечении (сверху) и в отдельном наиболее благоприятно расположенном зерне (снизу) при различной наработке образца (N/N^*)

Fig. 1. Structural changes during fatigue loading in the test section (at the top) and in an individual, the most favorably located grain (on the bottom) at various running time of the sample (N/N^*)

Анализ **рис. 1** показывает, что в процессе усталостного нагружения уже на начальном этапе наблюдается появление большого количества устойчивых полос скольжения в отдельных зернах феррита в виде тонких линий. В процессе дальнейшего усталостного нагружения наблюдается увеличение концентрации полос скольжения и их ширины, а образование магистральной трещины наблюдалось в местах их наибольшей концентрации. В 80% зерен на этапе предразрушения обнаруживаются значительные структурные изменения. Данный характер структурных изменений наблюдается и при других амплитудах напряжений в цикле и аналогичен особенностям структур-

ного изменения для низкоуглеродистых сталей, полученных классическими методами [10].

Анализ микротвердости (HV) (**рис. 2**) в рабочей зоне образца показывает, что на начальном этапе нагружения (до 30% от N^*) микротвердость практически не изменяется, после чего наблюдается разупрочнение материала и снижение твердости с 157 HV до 148 HV, что связано с изменением полей внутренних напряжений и переход напряженно-деформированного состояния зоны контроля в область растягивающих напряжений. После появления магистральной трещины в рабочей зоне наблюдается рост микротвердости, вплоть до значений 167 HV.

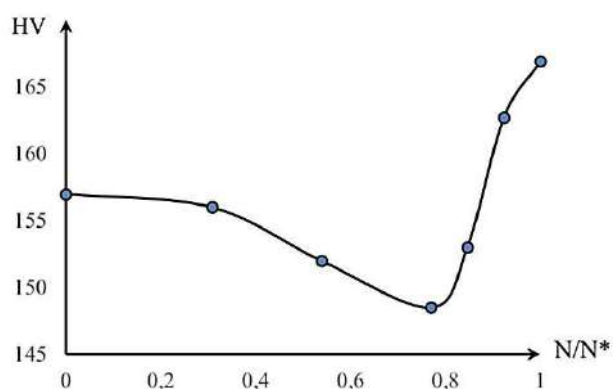


Рис. 2. Значения микротвердости HV в рабочей зоне образца при различной наработке образца N/N^* ($\sigma_{\max} = 350$ МПа)

Fig. 2. Microhardness, HV, in an operating area of the sample at various running time of the sample N/N^* ($\sigma_{\max} = 350$ MPa)

Процесс структурных изменений оказывает значительное влияние на показатель фрактальной размерности D_F изображения микроструктуры рабочей зоны сплава (рис. 3). Фактически при расчете фрактальной размерности ведется учет светлых участков микроструктуры (зерен феррита без значительных изменений и полос скольжения) и темных участков (полос скольжения, границ зерна и т.д.).

Анализ полученных зависимостей (рис. 3) показывает, что характер изменения фрактальной размерности микроструктуры рабочей зоны образца носит линейный характер на участке до появления магистральной трещины при достижении наработки порядка 0,82-0,9, после чего структурные изменения в рабочей зоне происходят наиболее интенсивно. Данный характер зависимостей наблюдается во всем диапазоне малоциклового усталостного нагружения образцов.

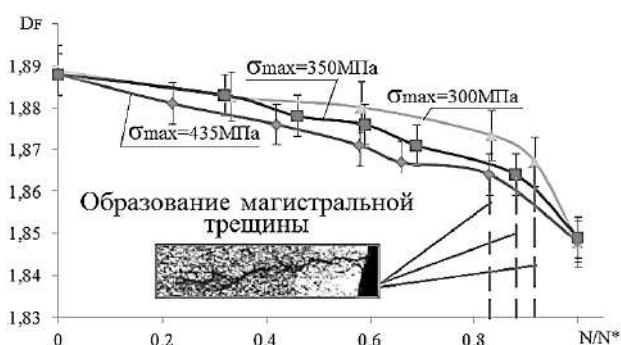


Рис. 3. Зависимости фрактальной размерности микроструктуры D_F от наработки N/N^* для стали 09Г2С, полученной на основе 3D-печати электродуговой наплавкой

Fig. 3. Relationship between fractal dimension D_F and running time N/N^* for steel 09G2A produced by wire arc additive manufacturing

При исследовании особенностей изменения параметров ультразвуковых волн (поверхностной, продольной и поперечной) установлено, что наиболее информативной является закономерность изменения акустического параметра D . Исследование данного параметра проводили до момента появления магистральной трещины. Полученные зависимости акустического параметра D от наработки образца при исследуемых амплитудах напряжений показаны на рис. 4.

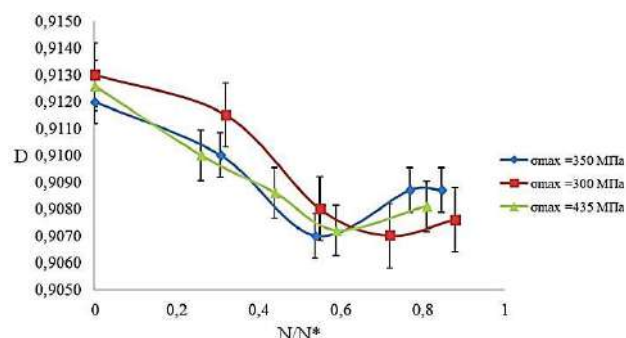


Рис. 4. Зависимость акустического параметра D от наработки образца (N/N^*) для стали 09Г2С, полученной на основе 3D-печати электродуговой наплавкой при различных амплитудах напряжений

Fig. 4. Relationship between acoustic parameter D and running time (N/N^*) for steel 09G2A produced by wire arc additive manufacturing at various ranges of stress

Анализ изменения акустического параметра показывает, что при наработке стали 09Г2С до 0,6, наблюдается монотонное снижение параметра D , что связано с явлением деформационного наклепа и накоплением значительного количества дефектов. Точку на графике (см. рис. 4), в которой происходит изменение характера кривой в сторону увеличения значений показателя D , следует считать началом развития системы трещин (см. рис. 1). Следует отметить, что точка изменения характера кривой смещается в сторону увеличения наработки N/N^* при снижении интенсивности напряжений в зоне деформирования, что согласуется с общей теорией усталостного разрушения материалов.

На рис. 5 показаны зависимости изменения магнитных характеристик для стали 09Г2С в процессе усталостного нагружения.

В целом зависимости коэрцитивной силы H_c и ее отношения к остаточной намагниченности (H_c/B_r) коррелируют между собой и с изменением акустического параметра. Характер зависимости практически не изменяется при изменении амплитуды напряжений. Так, при наработке ста-

ли до 0,6 наблюдается монотонное увеличение магнитных характеристик с последующим уменьшением до исходных значений на стадии перед образованием магистральной трещины.

Учет всех выявленных информативных показателей в комплексе позволит с большой долей вероятности выявить стадию деградации и разрушения материала и его остаточный ресурс.

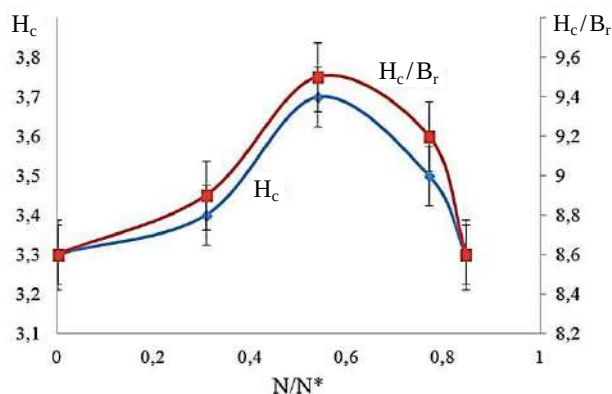


Рис. 5. Зависимость магнитных характеристик от наработки образца (N/N^*) для стали 09Г2С, полученной на основе 3D-печати электродуговой наплавкой при различных амплитудах напряжений

Fig. 5. Relationship between magnetic characteristics and running time (N/N^*) for steel 09G2A produced by wire arc additive manufacturing at various ranges of stress

Заключение

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Процесс усталостного разрушения стали 09Г2С, полученной путем аддитивной электродуговой наплавки по технологии WAAM, связан со структурной деградацией и накоплением дефектов в виде деформационных полос скольжения вплоть до появления магистральной трещины.

2. Усталостные свойства напечатанного металлического материала в объеме одной заготовки различны и, в первую очередь, зависят от направления вырезки образцов. При этом установлено, что все механические свойства (включая усталостные) напечатанной стали 09Г2С в продольном направлении (относительно направления наплавки) до 10% выше, чем у поперечных образцов.

3. Контроль текущего состояния исследуемого материала и степени наработки может быть осуществлен способами неразрушающего контроля, включая цифровой анализ микроструктуры и определение показателя D_F , а также средствами ультразвукового (через параметр D) и магнитного методов.

4. Полученные в рамках работы результаты могут быть применены для контроля ресурса реальных конструкций, изготовленных по технологии WAAM из стали 09Г2С.

Список источников

1. Energy consumption model for additive-subtractive manufacturing processes with case study / Jackson M.A., Van Asten A., Morrow J.D. et al. // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology. 2018, vol. 5(4), pp. 459-466. DOI: 10.1007/s40684-018-0049-y
2. Pinto-Lopera J.E., S.T. Motta J.M., Absi Alfaro S.C. Real-Time Measurement of Width and Height of Weld Beads in GMAW Processes // Sensors (Basel, Switzerland). 2016, vol. 16(9), pp. 1500. DOI: 10.3390/s16091500
3. Review of Wire Arc Additive Manufacturing for 3D Metal Printing / Li J., Alkahari M.R., Rosli N.A. et al. // International Journal of Automation Technology. 2019, vol. 13, no. 3, pp. 346-353. DOI: 10.20965/ijat.2019.p0346
4. Терентьев В.Ф., Кораблева С.А. Усталость металлов / Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской акад. наук. М.: Наука, 2015. 484 с.
5. Леденёв В.В., Скрылёв В.И. Аварии, разрушения и повреждения. Причины, последствия и предупреждения: монография. Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2017. 440 с.
6. Чернявский А.О. Развитие поверхностных систем трещин при механической нагрузке // Вестник ЮУрГУ. Серия: Математика. Механика. Физика. 2003. №4. С. 78-82.
7. Исследование влияния режимов 3D-печати на структуру и хладостойкость стали 08Г2С / Ю.Г. Кабалдин, М.С. Аносов, Д.А. Рябов и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №4. С. 64-70. DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-4-64-70
8. Fatigue life prediction of structural steel using acoustic birefringence and characteristics of persistent slip bands / Gonchar A.V., Kurashkin K.V., Klyushnikov V.A. et al. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. 2021, vol. 45, no. 1, pp. 101-102. DOI: 10.1111/ffe.13586
9. Разработка автоматизированной измерительной системы неразрушающего контроля для измерения параметров упругих волн в металлических материалах / А.А. Хлыбов, Ю.Г. Кабалдин, М.В. Желонкин и др. // Интеллектуальная электротехника. 2021. №4 (16). С. 101-114.
10. Гончар А.В., Мишакин В.В. Исследование процесса усталостного разрушения низкоуглеродистой стали 15ЮТА неразрушающими методами контроля // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2011. №3(90). С. 235-243.

References

1. Jackson M.A., Van Asten A., Morrow J.D. et al. Energy consumption model for additive-subtractive manufacturing processes with case study. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*. 2018;5(4):459-466. DOI: 10.1007/s40684-018-0049-y
2. Pinto-Lopera J.E., S.T. Motta J.M., Absi Alfaro S.C. Real-time measurement of width and height of weld beads in GMAW processes. *Sensors (Basel, Switzerland)*. 2016;16(9):1500. DOI: 10.3390/s16091500
3. Li J., Alkahari M.R., Rosli N.A. et al. Review of wire arc additive manufacturing for 3D metal printing. *International Journal of Automation Technology*. 2019;13(3):346-353. DOI: 10.20965/ijat.2019.p0346
4. Terentyev V.F., Korableva S.A. *Uсталост metallov* [Fatigue of metals]. Baykov Institute of Metallurgy and Materials Science of the Russian Academy of Sciences. Moscow: Nauka, 2015, 484 p. (In Russ.)
5. Ledenev V.V., Skrylev V.I. *Avarii, razrusheniya i povrezhdeniya. Prichiny, posledstviya i preduprezhdeniya: monografiya* [Failures, fracture and damage. Causes, consequences and prevention: a monograph]. Tambov: Publishing House of Tambov State Technical University, 2017, 440 p. (In Russ.)
6. Chernyavsky A.O. Development of surface systems of cracks under mechanical load. *Vestnik YuUrGU*. *Seriya: Matematika. Mekhanika. Fizika* [Bulletin of South Ural State University. Series: Mathematics. Mechanics. Physics]. 2003;(4):78-82. (In Russ.)
7. Kabaldin Yu.G., Anosov M.S., Ryabov D.A. et al. Study on of the influence of 3D printing modes on the structure and cold resistance of steel 08G2S. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I.Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021;19(4):64-70. DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-4-64-70
8. Gonchar A.V., Kurashkin K.V., Klyushnikov V.A. et al. Fatigue life prediction of structural steel using acoustic birefringence and characteristics of persistent slip bands. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 2021;45(1):101-102. DOI: 10.1111/ffe.13586
9. Khlybov A.A., Kabaldin Yu.G., Zhelonkin M.V. et al. Development of an automated measuring system of non-destructive testing for measuring the parameters of elastic waves in metallic materials. *Intellektualnaya elektrotehnika* [Smart Electrical Engineering]. 2021;(4(16)):101-114. (In Russ.)
10. Gonchar A.V., Mishakin V.V. Study on the fatigue failure process of low-carbon steel 15YuTA with non-destructive testing methods. *Trudy NGTU im. R.E.Alekseeva* [Proceedings of Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University]. 2011;(3):235-243. (In Russ.)

Поступила 02.03.2023; принята к публикации 10.04.2023; опубликована 27.06.2023
Submitted 02/03/2023; revised 10/04/2023; published 27/06/2023

Аносов Максим Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева, Нижний Новгород, Россия.
Email: anosov-maksim@list.ru. ORCID 0000-0001-8150-9332

Рябов Дмитрий Александрович – аспирант, научный сотрудник, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева, Нижний Новгород, Россия.
Email: ryabovdm1996@gmail.com. ORCID 0000-0002-0486-598X

Чернигин Михаил Алексеевич – аспирант, инженер, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева, Нижний Новгород, Россия.
Email: honeybadger52@yandex.ru.

Соловьев Александр Александрович – магистр, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева, Нижний Новгород, Россия.

Maksim S. Anosov – PhD (Eng.), Associate Professor, Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia.
Email: anosov-maksim@list.ru. ORCID 0000-0001-8150-9332

Dmitrii A. Ryabov – postgraduate student, researcher, Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia.
Email: ryabovdm1996@gmail.com. ORCID 0000-0002-0486-598X

Mikhail A. Chernigin – postgraduate student, engineer, Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia.
Email: honeybadger52@yandex.ru.

Aleksandr A. Solovyov – master, Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia.

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

MATERIALS SCIENCE AND HEAT TREATMENT OF METALS

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

УДК 621.771

DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-2-54-66



ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ ПОСЛЕ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ АСИММЕТРИЧНОГО ПРОЦЕССА ПРИ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКЕ

Горбунов К.С.¹, Щеренкова И.С.², Орехова Ю.Н.², Мазур И.П.^{1,3}¹ Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия² Новолипецкий металлургический комбинат, Липецк, Россия³ Лаборатория «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

Аннотация. Снижение себестоимости, веса современных изделий из металла с одновременным повышением их надежности и безопасности требует от металлургов поиска альтернативных решений при выборе технологии производства стали, отвечающих современным экологическим требованиям и политике безопасности. Одним из эффективных методов решения данной задачи является процесс асимметричной прокатки. В статье представлено физическое моделирование технологии производства горячекатаной полосы с использованием как симметричного, так и асимметричного деформирования на лабораторном реверсивном стане дуо листовой прокатки с индивидуальным приводом рабочих валков в лаборатории МГТУ им. Г.И. Носова «Механика градиентных наноматериалов имени А.П. Жилиева». Для изменения текстуры металла использовали разность скоростей рабочих валков. Представленные результаты анализа оптическим методом, текстурным анализом, EBSD-методом и сканирующим электронным микроскопом свидетельствуют о возможности получения ультрамелкозернистой структуры низкоуглеродистой стали. Определено, что углеродосодержащая фаза после закалки в исходном состоянии, прокатки симметричным способом с суммарным обжатием 60%, асимметричным способом с суммарными обжатием 50% представляет собой бейнит с участками МА-фазы по границам или в участках размером менее 5-10 мкм. В образцах после реверсивной прокатки наряду с закалочными структурами (МА-фаза и бейнит) выявлены участки перлита. Увеличение суммарного обжатия приводит к измельчению структуры, а его повышение до 80% приводит к протеканию полной рекристаллизации и превращению углеродосодержащей фазы в карбидные (цементитные) строчки, располагающиеся по границам ферритных зерен. Размер рекристаллизованных зерен в среднем составляет 5 и 8 мкм по средневысшему значению.

Ключевые слова: горячая прокатка, физическое моделирование, асимметрия, стан, текстура, закалка, электро-техническая сталь, скорость, фазы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-30015.

Авторы статьи выражают благодарность сотрудникам лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева» Песину А.М., Пустовойтову Д.О., Носову Л.В. и Грачеву Д.В. за консультации, а также техническую помощь в организации и проведении научных экспериментов.

© Горбунов К.С., Щеренкова И.С., Орехова Ю.Н., Мазур И.П., 2023

Для цитирования

Исследование структуры низкоуглеродистой стали после физического моделирования асимметричного процесса при горячей прокатке / Горбунов К.С., Щеренкова И.С., Орехова Ю.Н., Мазур И.П. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №2. С. 54-66. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-2-54-66>



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

INVESTIGATION OF THE STRUCTURE OF LOW-CARBON STEEL AFTER PHYSICAL MODELING OF AN ASYMMETRIC PROCESS DURING HOT ROLLING

Gorbunov K.S.¹, Shcherenkova I.S.², Orekhova Yu.N.², Mazur I.P.^{1,3}

¹ Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

² Novolipetsk Steel, Lipetsk, Russia

³ Zhilyaev Laboratory of Mechanics of Gradient Nanomaterials, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Reduction of cost and weight, while increasing reliability and safety of currently manufactured steel products, requires metallurgists to seek for alternative solutions, when choosing steelmaking technology meeting the applicable environmental requirements and safety policy. One of the efficient methods for solving this problem is an asymmetric rolling process. The paper presents a physical modeling of a manufacturing process of hot rolled strips, using both symmetric and asymmetric forming on the laboratory reversing two-high rolling mill with individually driven work rolls at the Zhilyaev Laboratory of Mechanics of Gradient Nanomaterials of Nosov Magnitogorsk State Technical University. To change the texture of steel, we applied mismatching velocities of work rolls. The presented results of the optical analysis, EBSD and SEM analysis show that it is possible to form an ultrafine-grained structure of low-carbon steel. It was determined that a carbon-containing phase after hardening in an original state, symmetric rolling with a total reduction of 60%, asymmetric rolling with a total reduction of 50% was bainite, containing areas of a martensite-austenite phase (MA) phase along boundaries, or in areas, 5-10 μm or less in size. The specimens after reversing rolling showed hardened structures (MA-phase and bainite), as well as pearlite areas. Increased total reduction results in a structure refinement; an increase to 80% entails complete recrystallization and transformation of a carbon-containing phase into carbide (cementite) lines along boundaries of ferrite grains. The size of recrystallized grains is 5 μm on average and 8 μm on weighted average.

Keywords: hot rolling, physical modeling, asymmetry, mill, texture, hardening, electrical steel, speed, phases

The research was funded by the grant of the Russian Science Foundation, No. 23-79-30015.

The authors of the paper thank the research staff of the Zhilyaev Laboratory of Mechanics of Gradient Nanomaterials: Pesin A.M., Pustovoytov D.O., Nosov L.V., and Grachev D.V., for their consultations and technical support in organizing and conducting the research experiments.

For citation

Gorbunov K.S., Shcherenkova I.S., Orekhova Yu.N., Mazur I.P. Investigation of the Structure of Low-Carbon Steel after Physical Modeling of an Asymmetric Process During Hot Rolling. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 2, pp. 54-66. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-2-54-66>

Введение

Снижение себестоимости, веса и одновременное повышение надежности, безопасности современного изделия из металла требует от металлургов поиска альтернативных решений при выборе технологии производства стали, отвечающих современным экологическим требованиям и политике безопасности. Одним из эффективных методов решения данной задачи является процесс асимметричной прокатки [1-3]. Асимметричная прокатка – одна из перспективных технологий, обладающая большим потенциалом и эффективностью для производства листов с ультрамелкозернистой структурой [4-8].

Материалы и методы исследования

Особую популярность набирают низкоуглеродистые стали, сочетающие в себе достаточную пластичность, высокую прочность, легкость, что, в свою очередь, позволяет эффективно их применять

для изготовления отдельных деталей методом холодной штамповки. Однако стоит учесть, что для современного промышленного оборудования необходимо изготовить более сотни отдельных частей, а затем соединить их в единую конструкцию [9-13].

Целью данной работы является исследование влияния асимметричного процесса на структуру низкоуглеродистых сталей при горячей прокатке.

Экспериментальные исследования были выполнены на лабораторном реверсивном стане дуо листовой прокатки с индивидуальным приводом рабочих валков в научно-исследовательской лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева» в МГТУ им. Г.И. Носова (рис. 1).

Образцы из исследуемых сталей нагревались в печи до температуры 1000°C с последующей прокаткой и подвергались закалке для фиксации структуры после прокатки. План экспериментальных прокаток представлен в табл. 1.

Структуру и текстуру образцов исследовали на оборудовании, представленном в табл. 2.



Рис. 1. Реверсивный стан дуо листовой прокатки с индивидуальным приводом рабочих валков

Fig. 1. Reversing two-high rolling mill with individually driven work rolls

Таблица 1. План эксперимента

Table 1. Plan of the experiment

Номер образца	V, об/мин	ϵ , %	Примечание
1	—	—	Закалка (исходная структура)
2	10:10	30/30	Симметрия (контрольная структура)
3	5:10	50	Асимметрия (изгиб полосы вверх)
4	2:10	30/30	Асимметрия в два прохода (первый проход изгиб вниз, второй проход изгиб полосы вверх)
5	2:10	80	Асимметрия (изгиб полосы вверх)

Таблица 2. Оборудование и методы исследования

Table 2. Equipment and research methods

Тип оборудования	Модель	Метод и условия проведения
Сканирующий электронный микроскоп	Scios II EBSD BRUKER eFlash	Снятие карт EBSD Анализ данных с помощью программы AZtecCrystal
Сканирующий электронный микроскоп	Tescan MIRA 3	Исследование углеродосодержащей фазы
Оптический инвертированный металлографический микроскоп	Leica	Исследование микроструктуры, составление панорамных снимков

Полученные результаты и их обсуждение

Образец №1 был закален с температуры 1000°C в воде, и после закалки его структура имеет крупнозернистое строение с размером зерна 2-10 мм с вкраплениями углеродосодержащей фазы игольчатого вида по границам и внутри зерен (рис. 2).

Исследование углеродосодержащей фазы с

применением сканирующей электронной микроскопии показало, что она представляет собой участки бейнита и МА-фазы. При этом следует отметить, что участки углеродосодержащей фазы размером более 10-20 мкм имеют бейнитное строение, а участки с МА-фазой расположены по границам бейнитных зерен или представляют собой отдельные зерна размером не более 5 мкм (рис. 3).



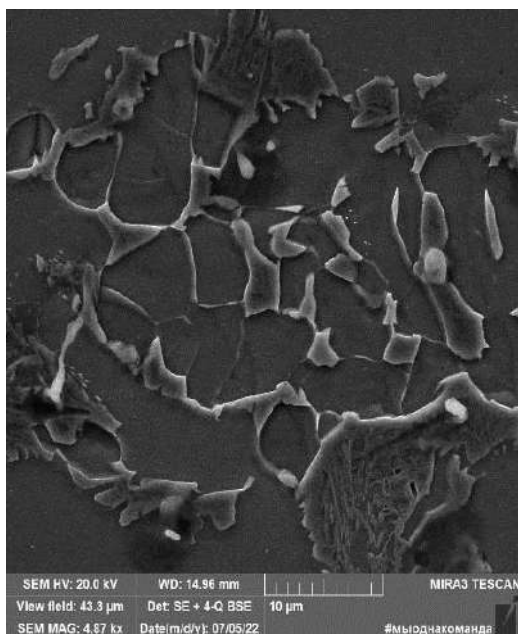
×50



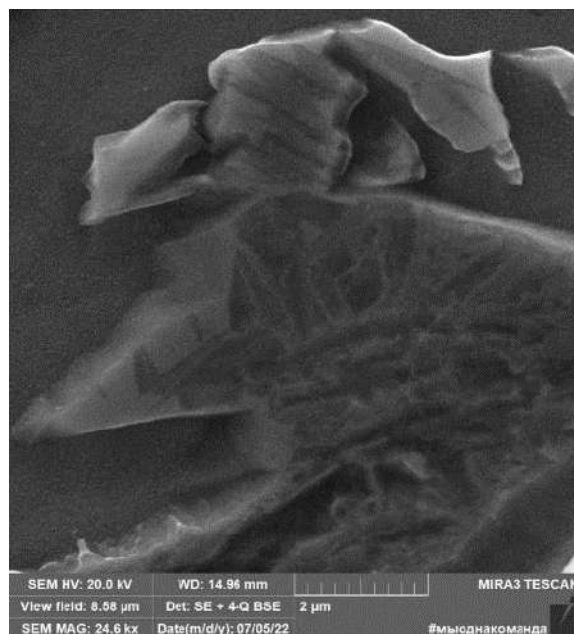
×200

Рис. 2. Структура исходного образца (оптическая микроскопия)

Fig. 2. Structure of the initial sample (optical microscopy)



×4870



×24600

Рис. 3. Структура углеродосодержащей фазы (растровая микроскопия)

Fig. 3. Structure of the carbon-containing phase (scanning microscopy)

Необходимо отметить равномерное распределение структурных компонентов в малоразмерных областях в виде МА-фазы за счёт бездиффузионного превращения, что при тех же температурно-временных условиях в больших областях может привести только к формированию подобных структурных компонентов по границам крупной области (более 10 мкм), а в центральной его части уже выявляются структуры бейнитного характера, вероятно полученные по смешанному типу превращения.

В образце №2 после прокатки симметричным способом в два прохода и последующей заковки наблюдается не полностью рекристалли-

зованная структура (рис. 4).

Структура поверхностного слоя представляет собой крупное ферритное зерно с вкраплениями углеродосодержащей фазы внутри тела зерна. Глубина распространения подобных структур составляет $\frac{1}{4}$ от общей толщины образца. Серцевина образца представляет собой нерекристаллизованную структуру, сохранившуюся после деформационных процессов прокатки. Углеродосодержащая фаза ориентирована по направлению прокатки. Отмечаются очаги начала первичной рекристаллизации, располагающиеся вокруг участков второй фазы (рис. 5).



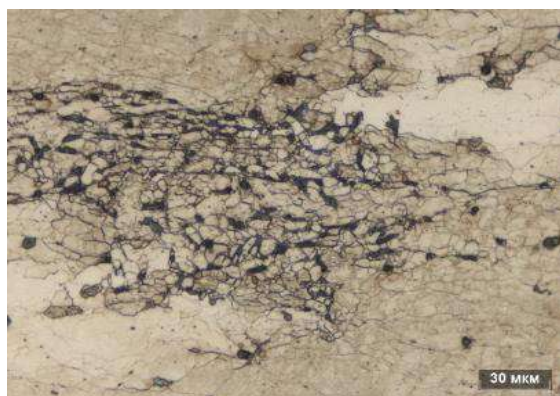
×50



×50

Рис. 4. Структура образца №2 (оптическая микроскопия)

Fig. 4. Structure of sample 2 (optical microscopy)



×500



×200

Рис. 5. Очаги рекристаллизации в образце №2 (оптическая микроскопия)

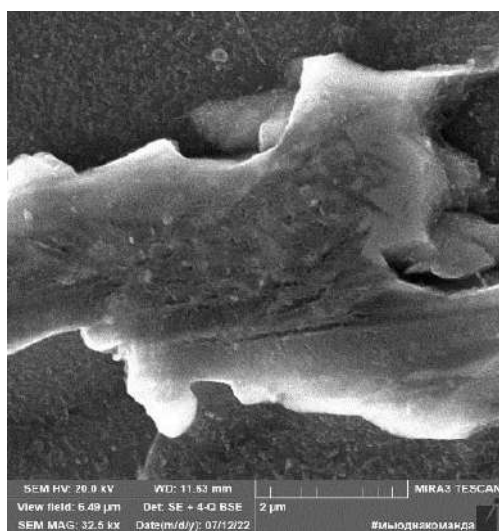
Fig. 5. Recrystallization nuclei in sample 2 (optical microscopy)

Данное явление объясняется более дефектным состоянием металла вблизи участков углеродосодержащей фазы, следовательно, металл в данных областях имеет более напряженное состояние и большее количество внутренней энергии, накопленной при деформации. Это способствует началу процесса первичной рекристаллизации в температурных условиях, создающихся при прокатке. Кроме того, повышению температуры в данных областях содействует повышенное внутреннее трение металла при деформации. Данные дефектные области являются энергетически выгодными центрами зародышей для рекристаллизационных процессов.

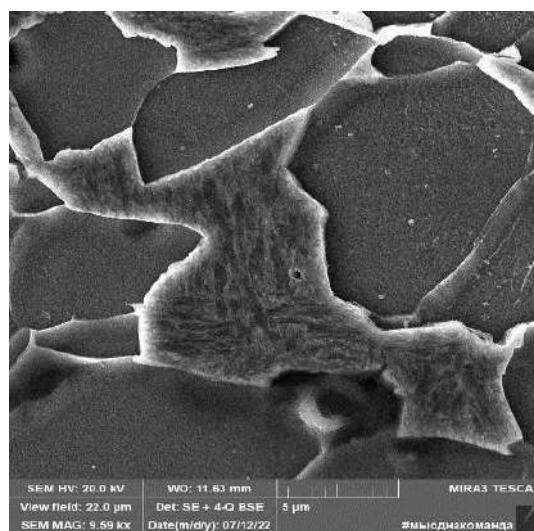
Остальной металл имеет текстурированную субструктуру, возникшую в результате деформационных процессов, не подвергшуюся рекристаллизации из-за недостатка дополнительной внутренней энергии от нагрева, необходимой для начала перекристаллизации.

При исследовании структуры углеродосодержащей фазы с помощью растровой электронной микроскопии установлено, что она представляет собой зерна бейнита в участках более 10-20 мкм или МА-фазы в участках менее 5 мкм, также МА-фаза может располагаться по границам бейнитных зерен (рис. 6). Механизм формирования структурных компонентов аналогичен ранее рассмотренному на исходном образце.

Образец №3 был подвергнут асимметричной прокатке с суммарным обжатием 50%. Исследование структуры на оптическом инвентированном микроскопе показывает распределение цепочек зерен углеродосодержащей фазы в центральной зоне образца. Ширина зоны концентрации второй фазы составляет $\frac{1}{3}$ от общей толщины проката, отдельные перьевидные участки второй фазы наблюдаются в поверхностных слоях, которые представляют собой крупные зерна феррита (рис. 7).



×32500



×24600

Рис. 6. Строение углеродосодержащей фазы в образце №2 (растровая микроскопия)
Fig. 6. Structure of the carbon-containing phase in sample 2 (scanning microscopy)



×50

Рис. 7. Общий вид сечения проката образца №3 (оптическая микроскопия)
Fig. 7. General view of the section of rolled sample 3 (optical microscopy)

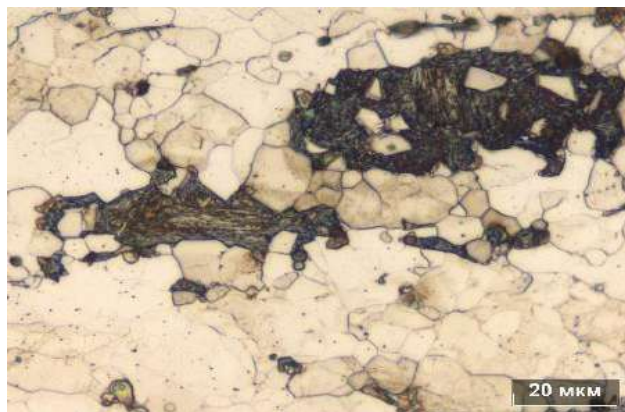
Структура образца №3 аналогична образцу №2, не рекристаллизована полностью, очаги рекристаллизации наблюдаются рядом с участками второй фазы, остальные области представляют собой деформированные крупные ферритные зерна с субструктурой, возникшей в результате деформационных процессов кристаллической

решетки металла и одиночными включениями углеродосодержащей фазы (рис. 8).

Механизм формирования структуры и распределения структурных составляющих в образце аналогичен механизмам в образцах, описанных выше. Структура углеродосодержащей фазы также аналогична образцу №2 и представляет собой бейнит и МА-фазу (рис. 9).



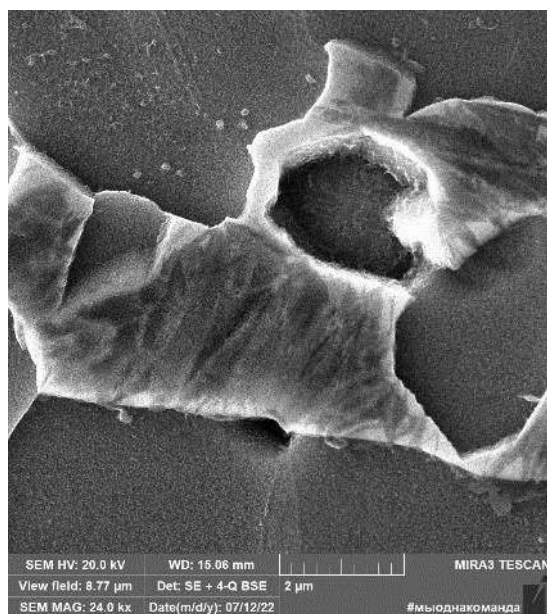
×200



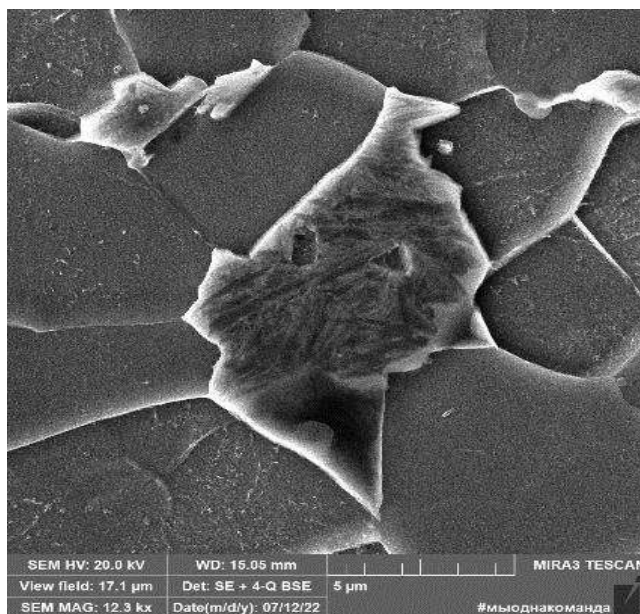
×1000

Рис. 8. Структура сердцевины образца №3 (оптическая микроскопия)

Fig. 8. A core structure of sample 3 (optical microscopy)



×24000



×12300

Рис. 9. Структура углеродосодержащей фазы образца №3 (растровая микроскопия)

Fig. 9. Structure of the carbon-containing phase of sample 3 (scanning microscopy)

Образец №4 прокатан на стане асимметричным способом, реверсивным методом с суммарным обжатием 60%. Концентрация цепочек углеродосодержащей фазы смещена относительно центральной оси образца к одной стороне (поверхности полосы относительно её оси) и занимает расстояние от $\frac{1}{2}$ до $\frac{1}{3}$ части глубины образца. В остальных частях образца по сечению наблюдается присутствие отдельных перьевидных островков второй фазы (**рис. 10**).

Данный образец имеет более волокнистое строение по сравнению с описанными выше

образцами №1-3 (**рис. 11**), что свидетельствует о более высокой степени деформации, но при этом рекристаллизация также не прошла полностью. Аналогично предыдущим образцам, концентрация рекристаллизованных зёрен приходится на области возле участков углеродосодержащей фазы. При этом наблюдается тенденция к измельчению участков второй фазы, диаметры которой не превышают 10 мкм. Это объясняется интенсификацией процессов деформации и большим измельчением зерна в процессе прокатки.

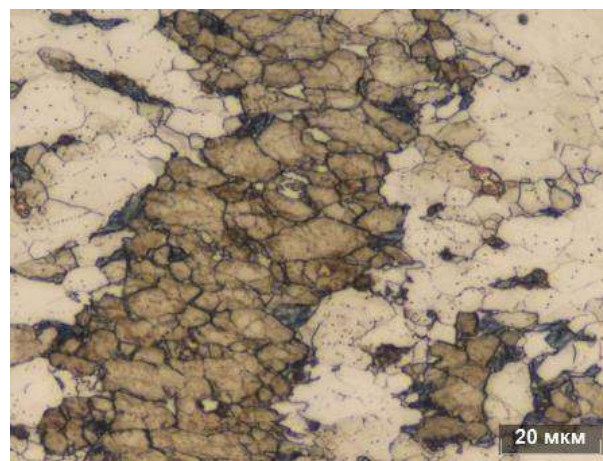


×50

Рис. 10. Общий вид сечения проката образца №4 (оптическая микроскопия)
Fig. 10. General view of the section of rolled sample 4 (optical microscopy)



×200

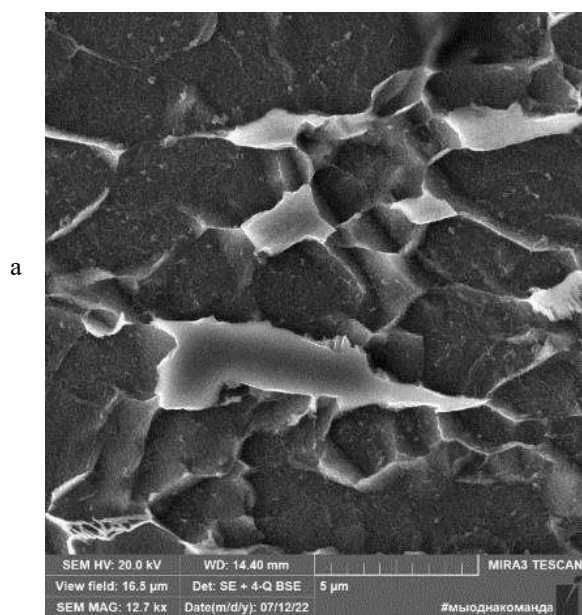


×1000

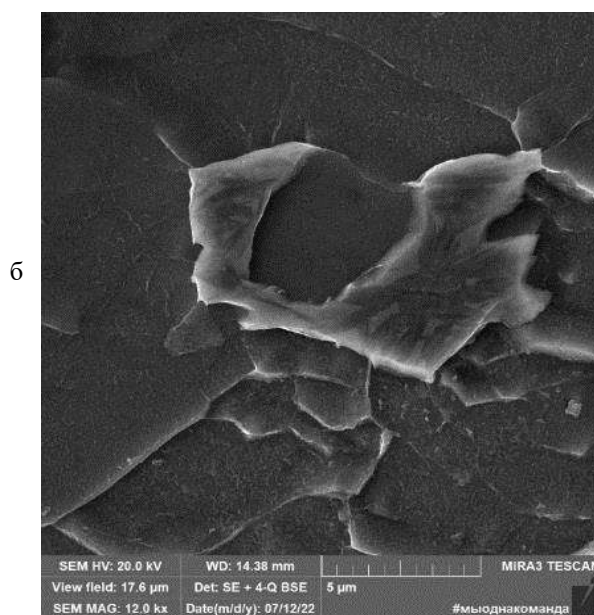
Рис. 11. Структура образца №4 (оптическая микроскопия)
Fig. 11. Structure of sample 4 (optical microscopy)

Остальные области представляют собой вытянутые зерна феррита с признаками деформирования (субструктура, возникшая в результате деформационных процессов).

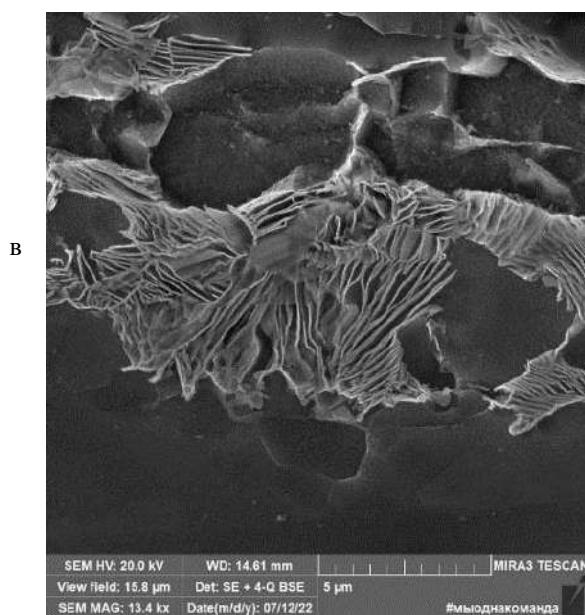
Исследование типа углеродосодержащей фазы показало, что она представляет собой одновременно участки бейнита, МА-фазы и перлита (рис. 12).



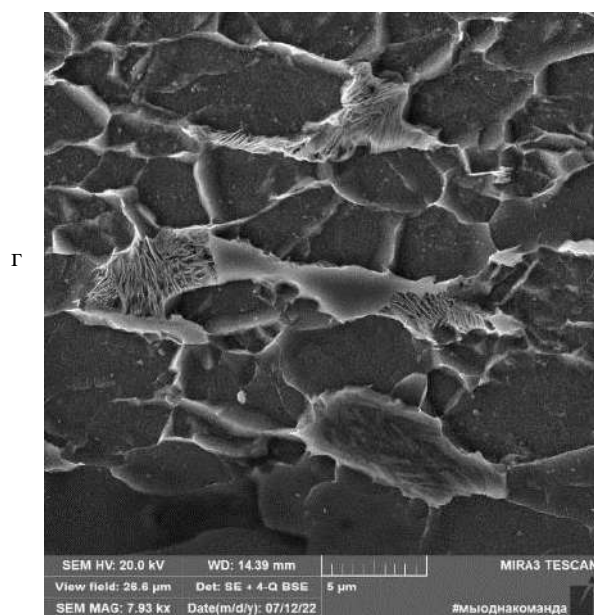
×12700



×12000



×13400



×7930

Рис. 12. Строение углеродосодержащей фазы образца №4 (растровая микроскопия): а – МА-фаза; б – бейнит; в – перлит; г – совмещение нескольких типов углеродосодержащей фазы

Fig. 12. Structure of the carbon-containing phase of sample No. 4 (scanning microscopy): a is MA-phase; б is bainite; в is pearlite; г is a combination of several types of the carbon-containing phase

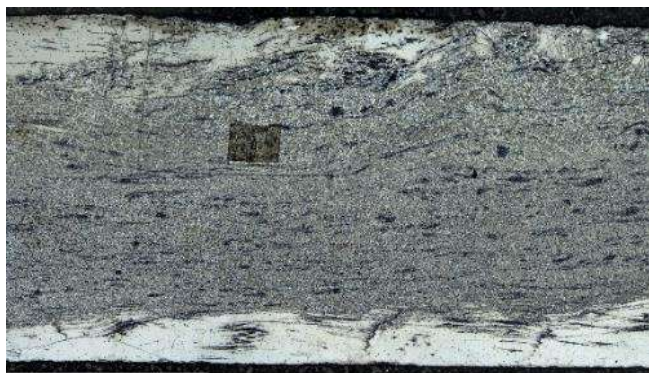
Наличие в структуре перлитных участков, образующихся по диффузионному механизму, наряду с бейнитной и МА-фазой свидетельствует об отличающихся первичных условиях в сравнении с ранее рассмотренными пробами. Это, вероятно, связано с такими факторами, как недостаточная температура перед закалкой – ниже температуры мартенситного превращения (температурные потери при увеличенном процессе прокатки, множественные проходы и перевороты заготовки), так и потери скоростных закалочных процессов за счет иных факторов (локальные содержания элементов, сдвигающие критический уровень начала мартенситного превращения, неравномерность микронапряжений, изменяющие локальные условия за счет искажения кристаллической решетки).

Образец №5 был прокатан асимметричным способом с суммарным обжатием 80%. Его центр состоит из полностью рекристаллизованной структуры, представляющей собой феррит, поверхность образца – вытянутые крупные ферритные зерна с участками углеродосодержащей фазы внутри зерна и очагами рекристаллизации вокруг них (**рис. 13**). Данное состояние образца говорит о том, что повышение температуры, вызванное внутренним трением решетки при искажении образца с заданным обжатием,

достаточно для протекания процесса рекристаллизации, причем процесс прошел в центральной части полосы.

Исследование структуры углеродосодержащей фазы с помощью растрового электронного микроскопа показало, что вся карбидная составляющая представляет собой цепочки карбидных (цементитных) включений, расположенных по границам рекристаллизованных ферритных зерен, сформированных в процессе динамической рекристаллизации. Данное состояние второй фазы объясняется интенсивным протеканием деформационно-рекристаллизационных процессов и связанным с этим измельчением зерна таким образом, что полноценные зерна второй фазы не успевают сформироваться и выделяются в виде карбидных строчек по границам и в направлении прокатки. Имеются редкие перлитные зерна, не превышающие в диаметре 1-2 мкм (**рис. 14**).

Так как структура образца рекристаллизована, было проведено исследование ее текстурных составляющих методом дифракции обратно отраженных электронов (EBSD анализ). Установлено, что средний размер зерна в образце составляет 5,5 или 8,1 мкм по средневзвешенному (**рис. 15**). При этом количество зерен с текстурой Госсса составляет 0,04%, а γ -волокна – 6,99% (угол разориентировки 7° в обоих случаях).



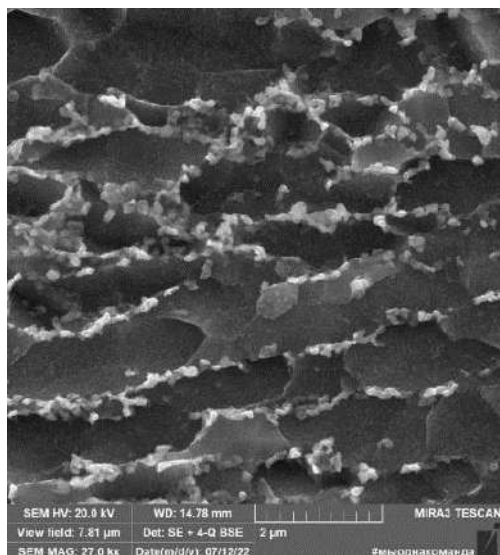
×50



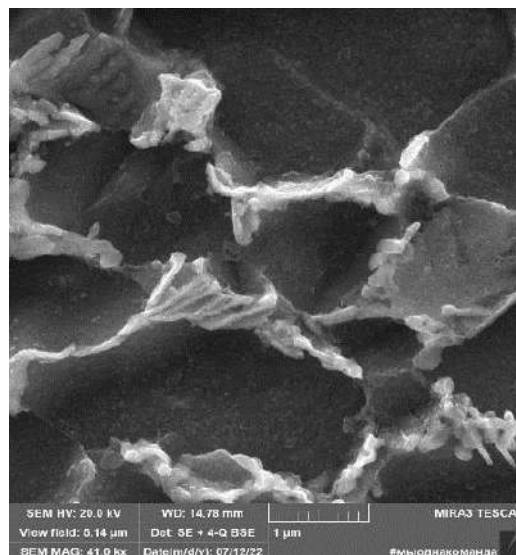
×200

Рис. 13. Структура сечения образца №5 (оптическая микроскопия)

Fig. 13. A cross-section structure of sample 5 (optical microscopy)



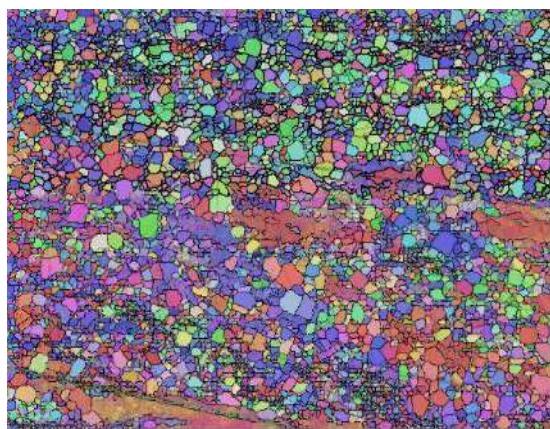
×27000



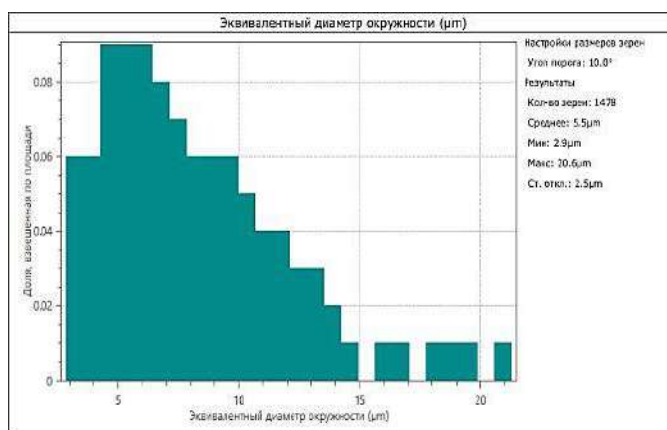
×41000

Рис. 14. Структура образца №5 (растровая микроскопия)

Fig. 14. Structure of sample 5 (scanning microscopy)



а



б

Рис. 15. Результаты исследования образца №5 методом EBSD: а – зеренная структура в цветах треугольника;

б – распределение зерен по размерам

Fig. 15. Results of the study on sample 5 by the EBSD method: a is a grain structure in triangle colors;

б is a grain size distribution

Заключение

Таким образом, структура исследованных образцов после асимметричной и симметричной прокатки не полностью рекристаллизована. Выявлены только очаги рекристаллизации непосредственно вблизи участков, содержащих углеродосодержащую фазу. Определено, что углеродосодержащая фаза после закалки в исходном состоянии, прокатки симметричным способом с суммарным обжатием 60%, асимметричным способом с суммарным обжатием 50% представляет собой бейнит с участками МА-фазы по границам или в участках размером менее 5-10 мкм. В образцах

после реверсивной прокатки наряду с закалочными структурами (МА-фаза и бейнит) выявлены участки перлита. Увеличение суммарного обжатия приводит к измельчению структуры (образцы №3, 4), а его повышение до 80% (образец №5) приводит к протеканию полной рекристаллизации и превращению углеродосодержащей фазы в карбидные (цементитные) строчки, располагающиеся по границам ферритных зерен. Установлено, что присутствие текстуры Госса в рекристаллизованном образце составляет 0,04% и его возникновение носит случайно статистический характер. Размер рекристаллизованных зерен в среднем составляет 5 и 8 мкм по средневзвешенному значению.

Список источников

1. Казаджан Л.Б. Магнитные свойства электротехнических сталей и сплавов / под ред. В.Д. Дурнева. М.: Наука и технологии, 2000. 223 с.
2. Моделирование влияния температуры на сопротивление пластической деформации электротехнических сталей при горячей прокатке / Сафронов А.А., Бельский С.М., Черный В.А., Мазур И.П. // Физический журнал: Серия конференций. 2018. Т. 1134. №1. С. 012050. DOI: 10.1088/1742-6596/1134/1/012050 (на английском языке)
3. Пузанов М.П. Исследование напряженно-деформированного состояния процесса листовой прокатки трансформаторной стали с учетом анизотропии свойств [Issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya processa listovoy prokatki transformatornoj stalis uchetoм anizotropii svoystv]. дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2019. 134 с.
4. Песин А.М., Салганик В.М. Асимметричная тонколистовая прокатка: развитие теории, технологии и новые решения: учеб. пособие для вузов. М.: МИСиС, 1997. 191 с.: ил. ISBN 5-87623-040-5.
5. Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Сverdlik M.K. Развитие теории и технологии процесса асимметричной тонколистовой прокатки как метода интенсивной пластической деформации: монография. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2017. 151 с.
6. Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Сverdlik M.K. Моделирование температурных полей в зоне деформации при асимметричной прокатке алюминиевых сплавов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. №1. С. 71-78.
7. Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Вафин Р.К. Моделирование температурных полей в очаге деформации при асимметричной прокатке алюминиевых сплавов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №4. С. 75-81.
8. Влияние малых микроскопических канавок рабочих валков на градиент деформации, индуцируемый в металлических листах при симметричной и асимметричной прокатке / Д.О. Пустовойтов, А.М. Песин, Н.М. Локотунина, А.Е. Кожемякина // 28-я международная конференция по металлургии и материаловедению «Производство металла». 2019. Т. 1. С. 265-270.
9. Олссон К., Сперле Дж. Новые усовершенствованные сверхвысокопрочные стали для автомобильной промышленности // Автомобильные технологии. 2006. №6(5). С. 46-49.
10. Дэвис Г. Материалы для автомобильных кузовов. Оксфорд: Линакр Хаус, Джордан Хилл, 2003. 368 с.
11. Левыкина А.Г., Соловьев В.Н., Мазур И.П. Оценка возможности получения горячекатаной полосы из двухфазной стали на существующем отводящем рольганге широкополосного стана горячей прокатки // Черные металлы. 2020. №8. С. 10-14.
12. Исследование теплового состояния металла при производстве горячекатаных полос в программе «Deform 3D» / Левыкина А.Г., Чабоненко А.А., Шкатов В.В., Мазур И.П. // IOP Conf. Физический журнал: Серия конференций. 2018. Т. 1134. №1. С. 012034. (на английском языке)

References

1. Kazadzhan L.B. *Magnitnye svoystva elektrotekhnicheskikh staley i splavov* [Magnetic properties of electrical steels and alloys]. Moscow: Science and Technology, 2000, 223 p. (In Russ.)
2. Safronov A.A., Belsky S.M., Cherny V.A., Mazur I.P. Modeling of temperature influence on resistance of electrical steels to plastic deformation during hot rolling. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018;1134(1). Article No. 012050. DOI: 10.1088/1742-6596/1134/1/012050
3. Puzanov M.P. *Issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya protsessa listovoy prokatki transformatornoj stali s uchetoм anizotropii svoystv: dis. ...kand. tekhn.nauk* [Study on the stress and strain state of the process of sheet rolling of transformer steel factoring into anisotropy of properties: PhD (Eng.) thesis]. Yekaterinburg, 2019. 134 p.
4. Pesin A.M. Salganik V.M. *Asimmetrichnaya tonkolistovaya prokatka: razvitie teorii, tekhnologii i novye resheniya: ucheb. posobie dlya vuzov* [Asymmetric rolling: development of theory, technology and new solutions: Study guide for universities]. Moscow: Moscow Institute of Steel and Alloys, 1997, 191 p. (In Russ.)
5. Pesin A.M., Pustovoytov D.O., Sverdlik M.K. *Razvitiye teorii i tekhnologii protsessa asimmetrichnoy tonkolistovoy prokatki kak metoda intensivnoy plasticheskoy deformatsii: monografiya* [Development of theory and technology of the asymmetric rolling process as a method of severe plastic deformation: Monograph]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2017, 151 p. (In Russ.)
6. Pesin A.M., Pustovoytov D.O., Sverdlik M.K. Modeling of temperature fields in the deformation zone during asymmetric rolling of aluminum alloys. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2014;(1):71-78. (In Russ.)
7. Pesin A.M., Pustovoytov D.O., Vafin R.K. Modeling of temperature fields in the deformation region during asymmetric rolling of aluminum alloys. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015;(4):75-81. (In Russ.)
8. Pustovoytov D.O., Pesin A.M., Lokotunina N.M., Kozhemyakina A.E. Influence of small microscopic grooves of work rolls on the deformation gradient induced in metal sheets during symmetric and asymmetric rolling. *28-ya mezhdunarodnaya konferentsiya po metallurgii i materialovedeniyu "Proizvodstvo metalla"*

- [The 28th International Conference on Metallurgy and Materials Science. Metal Production]. 2019, vol. 1, pp. 265-270. (In Russ.)
9. Olsson K., Sperle J. New advanced ultra-high strength steels for the automotive industry. *AutoTechnology*. 2006;6(5):46-49.
10. Davies G. *Materials for automobile bodies*. Oxford: Linacre House, Jordan Hill, 2003, 368 p.
11. Levykina A.G., Soloviev V.N., Mazur I.P. Assessment of the possibility of producing hot rolled strips from dual-phase steel on the existing discharge rolling table of the hot strip mill. *Chernye metally* [Ferrous Metals]. 2020;(8):10-14. (In Russ.)
12. Levykina A.G., Chabanenko A.A., Shkatov V.V., Mazur I.P. The study on the thermal state of steel in the production of hot rolled strips in Deform 3D. *IOP Conf. Journal of Physics: Conference Series*. 2018;1134(1). Article No. 012034.

Поступила 08.06.2023; принята к публикации 21.06.2023; опубликована 27.06.2023
Submitted 08/06/2023; revised 21/06/2023; published 27/06/2023

Горбунов Кирилл Сергеевич – аспирант,
Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия.
Email: beluivolk96@mail.ru. ORCID 0000-0002-5965-766X

Щеренкова Ирина Сергеевна – кандидат технических наук, старший инженер,
дирекция по исследованиям и разработкам новых продуктов,
Новолипецкий металлургический комбинат, Липецк, Россия.
Email: scherenkova_is@nlmk.com.

Орехова Юлия Николаевна – начальник отдела по микроскопии и металлографии,
дирекция по исследованиям и разработкам новых продуктов,
Новолипецкий металлургический комбинат, Липецк, Россия.
Email: orehova_yn@nlmk.com.

Мазур Игорь Петрович – доктор технических наук, профессор,
Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия.
Лаборатория «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева»,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.
Email: mazur@stu.lipetsk.ru. ORCID 0000-0002-1492-1500

Kirill S. Gorbunov – postgraduate student,
Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia.
Email: beluivolk96@mail.ru. ORCID 0000-0002-5965-766X

Irina S. Shcherenkova – PhD (Eng.), Senior Engineer, Directorate for R&D of New Products,
Novolipetsk Steel, Lipetsk, Russia.
Email: scherenkova_is@nlmk.com.

Yuliya N. Orekhova – Head of the Microscopy and Metallography Department,
Directorate for R&D of New Products, Novolipetsk Steel, Lipetsk, Russia.
Email: orehova_yn@nlmk.com.

Igor P. Mazur – DrSc (Eng.), Professor, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia.
Zhilyaev Laboratory of Mechanics of Gradient Nanomaterials,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: mazur@stu.lipetsk.ru. ORCID 0000-0002-1492-1500

СТАНДАРТИЗАЦИЯ, СЕРТИФИКАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ

STANDARDIZATION, CERTIFICATION AND QUALITY MANAGEMENT

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

УДК 657.6:519.866

DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-2-67-75



ОСОБЕННОСТИ ДОСТИЖЕНИЯ КОНСЕНСУСА В ГРУППЕ АУДИТОРОВ

Максимова О.В.^{1,2}, Аронов И.З.³¹ Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля, Москва, Россия² Университет науки и технологий МИСиС, Москва, Россия³ МГИМО (У), Москва, Россия

Аннотация. Аудиты системы менеджмента качества (СМК) организации – важные инструменты оценки СМК. Взаимодействие при аудите отличает группу аудиторов от простого скопления людей. Поэтому задачи изучения взаимодействия людей в группе являются актуальными для специалистов в области менеджмента. Результатом взаимодействия аудиторов является групповое суждение (согласованное решение, консенсус). Целью работы служит исследование особенностей достижения согласованного решения в команде аудиторов. Для достижения цели впервые построена теоретическая модель консенсуса для группы лояльных и авторитарных экспертов, основанная на регулярных цепях Маркова. Для анализа этой модели проведено моделирование для групп с численностью 2, 3, 4 и 5 экспертов. Впервые продемонстрировано, что динамика малых групп с числом экспертов менее 5 человек и низкой авторитарностью обладает значимой спецификой по сравнению с большими группами обычных экспертов. Показано, что прийти к консенсусу в диадах (2 человека) очень сложно, время достижения консенсуса может вырасти более чем в 10 (и даже в 100 и более) раз по сравнению с группой из 5 членов. Выявлено, что в диаде из двух абсолютно лояльных экспертов консенсус недостижим. Это позволяет сформулировать практическое правило формирования группы аудиторов: в условиях неопределенности нижняя граница числа аудиторов – триада (три человека). Построенные регрессионные зависимости среднего времени достижения согласованного решения от средней авторитарности для групп авторитарных и лояльных аудиторов выявили принципиальное различие процессов достижения группового решения в обоих типах групп: чем меньше численность группы аудиторов, тем больше разница между временем достижения консенсуса в группах. С ростом числа аудиторов затягивание переговорного процесса можно ожидать в условиях высокой авторитарности членов, с уменьшением числа аудиторов затягивание принятия согласованного решения можно прогнозировать для группы лояльных экспертов. Одна из практических рекомендаций для недопущения затягивания согласованного решения, вытекающая из результатов исследования, следующая: увеличение числа членов в группе требует включения менее авторитарных экспертов, а при уменьшении числа членов – более авторитарных.

Ключевые слова: консенсус, аудит, группа аудиторов, моделирование, марковские цепи, время достижения консенсуса

© Максимова О.В., Аронов И.З., 2023

Для цитирования

Максимова О.В., Аронов И.З. Особенности достижения консенсуса в группе аудиторов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №2. С. 67-75. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-2-67-75>



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

PECULIARITIES OF ACHIEVING CONSENSUS AMONG A GROUP OF AUDITORS

Maksimova O.V.^{1,2}, Aronov I.Z.³

¹ Izrael Institute of Global Climate and Ecology, Moscow, Russia

² University of Science and Technology MISIS (Moscow Institute of Steel and Alloys), Moscow, Russia

³ MGIMO University (Moscow State Institute of International Relations), Moscow, Russia

Abstract. Audits of the quality management system (QMS) of an organization are important tools for assessing the QMS. Audit interaction distinguishes a group of auditors from a mere collection of people. Therefore, the objectives of studying the interaction among people in a group are relevant for specialists in management. The result of the interaction among auditors is a group judgment (an agreed decision, consensus). The research is aimed at studying peculiarities of reaching an agreed decision in a team of auditors. To achieve the goal, we built a novel theoretical consensus model for a group of loyal and autocratic experts based on the regular Markov chains. To analyze this model, we carried out the simulation for groups of 2, 3, 4, and 5 experts. It was demonstrated for the first time that dynamics of small groups, consisting of 5 experts or less and showing low authority, had a significant specific nature compared with large groups of ordinary experts. It was shown that it was very difficult to reach consensus in dyads (2 people), the time to reach consensus might increase by 10 and even by 100 times or more compared with a group of 5 members. It was revealed that in a dyad of two absolutely loyal experts, consensus was unattainable. This allows us to formulate a practical rule for forming a group of auditors: in conditions of uncertainty, the lower limit of the number of auditors is a triad (three people). The built regression dependencies between the average time to reach an agreed decision and the average authority for groups of autocratic and loyal auditors revealed a fundamental difference in the processes of achieving a group decision in both types of groups: the smaller the size of the group of auditors, the greater the difference between the time to reach consensus in the groups. With an increase in the number of auditors, a delay in the negotiation process may be expected in case of high authority of members; with a decrease in the number of auditors, a delay in making an agreed decision may be predicted for a group of loyal experts. One of the practical recommendations to avoid delaying the agreed decision, which follows from the study results, is to include less autocratic experts, when increasing the number of members in the group, and more autocratic ones, when decreasing the number of members.

Keywords: consensus, audit, group of auditors, simulation, Markov chains, time to reach consensus

For citation

Maksimova O.V., Aronov I.Z. Peculiarities of Achieving Consensus Among a Group of Auditors. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 2, pp. 67-75. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-2-67-75>

Введение

Аудиты системы менеджмента качества (СМК) организации являются важными инструментами оценки СМК [1]. Как правило, аудит СМК осуществляется группой аудиторов. Наличие взаимодействия для решения поставленной задачи при аудите отличает группу аудиторов от простого скопления людей. Поэтому задачи изучения взаимодействия людей в группе являются актуальными для специалистов в области менеджмента. Результатом взаимодействия аудиторов является групповое решение (групповое суждение), качество которого меряется характеристикой «групповая сплоченность», введенной в 40-х годах Л. Фестингером [2]. В свою очередь, Т. Ньюком связал групповую сплоченность с понятием «групповое согласие», или «консенсус» [3].

С увеличением размера группы взаимодействие между ее членами становится реже и формальнее, что приводит к ослаблению чувства принадлежности, и это является препятствием для формирования групповой сплоченности при аудите [4].

Исходя из этой посылки, очевидно, что группа аудиторов не должна быть велика с тем, чтобы можно было обеспечить непосредственное взаимодействие аудиторов, что отвечает определению малой группы в социологии [4, 5].

Анализируя численность малой группы с точки зрения эффективности взаимодействия ее членов, социальные психологи полагают, что число членов такой группы должно быть не более 5 человек. При этом научное обоснование этого числа отсутствует, что привело к формированию следующего суждения: «Основной принцип оптимального состава группы – ис-

пользовать наименьшее число людей, которые в состоянии максимально успешно выполнять стоящие перед группой задачи» [6].

Таким образом, формулируется основная цель статьи – исследовать особенности достижения групповой сплоченности, или консенсуса, в команде аудиторов и тем самым теоретически обосновать нижнюю границу числа аудиторов.

Отметим, что вопросы достижения консенсуса, в основе которого лежит, как правило, возможность и способность его членов к компромиссу, в настоящее время исследованы слабо, сложность формализации самой процедуры переговоров ведет к поиску принципиально новых подходов для построения математических моделей [7]. Необходимость построения таких моделей для изучения особенностей взаимодействия в группах и факторов, влияющих на время достижения консенсуса, обуславливается возможностью затягивания длительности процесса [7, 8]. Представленная ДеГроотом модель описания процесса достижения консенсуса на основе регулярных цепей Маркова показала свою работоспособность [9, 10]. Модель построена на предположении, что участники обмениваются мнениями и могут влиять на мнение других членов группы в процессе дискуссии. Основными преимуществами такой модели являются возможность выделять и изучать ключевые характеристики группы и формирование практических рекомендаций для недопущения затягивания процесса принятия согласованного решения. Несмотря на эти достоинства, модель не выявляет проблему соотношения консенсуса и истины, когда намеренное формирование группы «невежд» приводит к консенсусу, далекому от истины [11]. Поэтому проблема приближения к истине коллективного решения заслуживает отдельного внимания и анализа опыта применения консенсусных процедур и выходит за рамки текущего исследования.

Материалы и методы исследования

Опишем кратко общую модель консенсуса в процессе достижения согласия, основанную на регулярных цепях Маркова [10]. Пусть группа из n аудиторов обсуждает некоторый вопрос. Каждый из них придерживается своего первоначального мнения, который описывается вектором $S(0) = (S_{01}, S_{02}, \dots, S_{0n})$, где S_{0i} – мнение i -го эксперта (аудитора), $i = 1, \dots, n$. Члены группы обмениваются мнениями относительно вектора $S(0)$. В результате каждый из них может

как изменить свое мнение, так и оставить прежним на любом этапе согласования. Пусть $0 < p_{ij} < 1$ ($i = 1, \dots, n$; $j = 1, \dots, n$) задает вероятность доверия i -го члена группы к мнению j -го эксперта. При этом i -й аудитор доверяет и себе с определенной вероятностью $0 < p_{ii} < 1$, которая интерпретируется как уровень авторитарности i -го члена группы: чем выше значение p_{ii} , тем выше его авторитарность¹. Полученная матрица доверия $\mathbf{P} = (p_{ij})$ является стохастической

(выполняется условие $\forall i \in \overline{1, n} \left[\sum_{j=1}^n p_{ij} = 1 \right]$). На

первом шаге согласований получаем вектор $S^T(1) = \mathbf{P} \cdot S^T(0) = (S_{11}, S_{12}, \dots, S_{1n})^T$, а после k -х шагов

$$S^T(k) = (S_{k1}, S_{k2}, \dots, S_{kn})^T = \mathbf{P} \cdot S^T(k-1) = \mathbf{P}^k \cdot S^T(0).$$

Процесс завершается на m -м шаге, когда все строки матрицы $\mathbf{P}^m$ становятся одинаковыми, то есть достигнута групповая сплоченность. Матрица доверия $\mathbf{P}$ после m итераций достигает финальной матрицы $\mathbf{F}$, в которой все соответствующие построчные элементы равны. Таким образом, при последующих обсуждениях матрица $\mathbf{P}$ не будет меняться, следовательно, не будет изменяться и вектор мнений аудиторов $S^T(m) = \mathbf{P}^m \cdot S^T(0) = (S_{m1}, S_{m2}, \dots, S_{mn})^T$. Таким образом, после m итераций наступает консенсус. Из теории сходимости начальной матрицы $\mathbf{P}$ к финальной матрице $\mathbf{F}$ (необходимым и достаточным условием достижения консенсуса) при любом векторе $S(0)$ является регулярность² матрицы $\mathbf{P}$. Для регулярности матрицы достаточно³, чтобы суммы по строкам матрицы $\mathbf{P}$ были равны 1 и для каких-либо вероятностей p_{ij} выполнялось строгое неравенство $0 < p_{ij} < 1$. Таким образом, если матрица доверия $\mathbf{P}$ регулярна, то каковы бы ни были начальные мнения аудиторов, консенсус достигим, хотя может и за значительное число согласований.

Построим модель достижения групповой сплоченности в группе из $n \leq 5$ аудиторов (экспертов) и проанализируем влияние численности груп-

¹ Авторитарность [от лат. *autoritas* – влияние, власть] – социально-психологическая характеристика личности, отражающая ее стремление максимально подчинить своему влиянию партнеров по взаимодействию и общению.

² Матрицы, суммы элементов всех строк которых равны единице, называются *стохастическими*. Если при некотором n все элементы матрицы $\mathbf{P}^n$ не равны нулю, то такая матрица переходов называется *регулярной*.

³ Теорема 4.1.2 из Kemeny J.G., Snell J.L. *Finite Markov chains*. Princeton: The University Series in Undergraduate Mathematics, 1960, 238 p.

пы и авторитарности ее членов на время достижения группового согласия. На практике значение t определяет время достижения консенсуса. Для исследования этого вопроса было проведено моделирование, состоящее из нескольких шагов.

Предпосылки. Пусть $(S_{01}, S_{02}, \dots, S_{0n})$ – вектор начальных мнений, а $(S_{m1}, S_{m2}, \dots, S_{mn})$ – вектор мнений после времени t . Рассмотрим два возможных варианта формирования группы аудиторов:

1. В группе присутствуют только лояльные⁴ аудиторы, каждый из которых доверяет своему мнению меньше, чем мнению любого из остальных:

$$\forall i = \overline{1, n} \quad \forall j \neq i \quad [p_{ij} \geq p_{ii}]. \quad (1)$$

Легко видеть, что это условие равносильно следующему: $\forall i = \overline{1, n} \quad [p_{ii} < \frac{1}{n}]$.

2. В группе присутствуют только авторитарные аудиторы, то есть $\forall i = \overline{1, n} \quad [p_{ii} > \frac{1}{n}]$. Авторитарные аудиторы доверяют своему мнению больше, чем мнению некоторых других аудиторов группы, что отвечает следующему условию:

$$\forall i = \overline{1, n} \quad \exists j = \overline{1, n}; \quad [p_{ii} > p_{ij}]. \quad (2)$$

$$j \neq i$$

Может показаться странным первый вариант формирования группы. Однако известно [10], что члены группы, которые работают вместе давно, которые ценят свою причастность к группе, как раз отвечают условию (1).

1-й шаг для моделирования: выбор числа членов группы. Рассмотрим группы из $n = 2; 3; 4; 5$ членов.

Далее опишем процесс моделирования для группы лояльных экспертов. Для группы авторитарных экспертов моделирование проводилось аналогично.

2-й шаг для моделирования: выбор уровней авторитарности p_{ii} ($i = \overline{1, n}$). Исходя из оценки (1), для разных по численности групп обеспечивается разная верхняя граница для членов (для $n = 5$ она равна 0,2; для $n = 4$ получаем 0,2; для $n = 3$ имеем 0,3(3); для $n = 2$ соответственно 0,5).

3-й шаг моделирования: симуляция вероятностей доверия p_{ij} ($i \neq j; i, j = \overline{1, n}$) из равномерного закона распределения при выполнении

⁴ Лояльность – социально-психологическая характеристика личности, противоположная авторитарности.

условия (1). Для этого моделирование проводилось в три этапа:

1) моделирование элементов вспомогательной матрицы Δ равномерным законом распределения на отрезке $[0, 1]$, получение исходных элементов матрицы Δ_{ij} ($i, j = \overline{1, n}$);

2) формирование матрицы Δ^0 с помощью корректировки элементов матрицы Δ : элементы каждой строки $\Delta_{ij}^0 = \frac{\Delta_{ij}}{\sum_{j=1, i \neq j}^n (\Delta_{ij})} \cdot (1 - np_{ii})$;

3) моделирование матрицы доверия $\mathbf{P}$: для элементов каждой строки $p_{ij} = p_{ii} + \Delta_{ij}^0$ ($i \neq j$). Очевидно, что тем самым выполнено условие моделирования (1).

Для получения устойчивых выводов в отношении среднего времени достижения консенсуса при изменении других параметров, при каждом фиксированном уровне факторов проводилось 100 моделирований в среде Excel [12]. В результате проводилось 38 серий по 100 моделирований в каждой. Дополнительно выполнены контрольные 3 серии по 100 моделирований в условиях абсолютной лояльности (авторитарности всех аудиторов равны нулю). Отметим, что для $n = 2$ при авторитарностях $p_{11} = p_{22} = 0$ получается разложимая матрица⁵

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

В теории марковских цепей показано, что соответствующая переходная матрица не сходится к финальной матрице [9]. В этой ситуации консенсус аудиторов недостижим.

Полученные результаты и их обсуждение

Проведена оценка сходимости матрицы мнений аудиторов $\mathbf{P}$ к финальной матрице $\mathbf{F} = \mathbf{P}^m$. Математически время t определяется как степень матрицы $\mathbf{P}$, при которой в финальной матрице $\mathbf{F}$ элементы внутри каждого столбца j удовлетворяют условию $|p_{ij} - p_{kj}| < \delta$ для всех i, k ($j, i, k = \overline{1, n}$). Величина t находится из условия $\delta = 0,001$ (что обеспечивает необходимую точность вычисления t).

⁵ Матрица A называется разложимой, если перестановкой рядов она может быть приведена к виду $A = \begin{pmatrix} B & 0 \\ C & D \end{pmatrix}$, где B и D – квадратные матрицы.

На рис. 1, 2 представлены результаты моделирования для каждого варианта формирования группы аудиторов. Для интерпретации результатов моделирования введем понятие средней авторитарности p группы как среднее арифметическое

значение авторитарности членов группы.

В табл. 1 представлены регрессионные зависимости времени t от средней авторитарности p в группах лояльных и авторитарных аудиторов с численностью $n = 5; 4; 3; 2$.

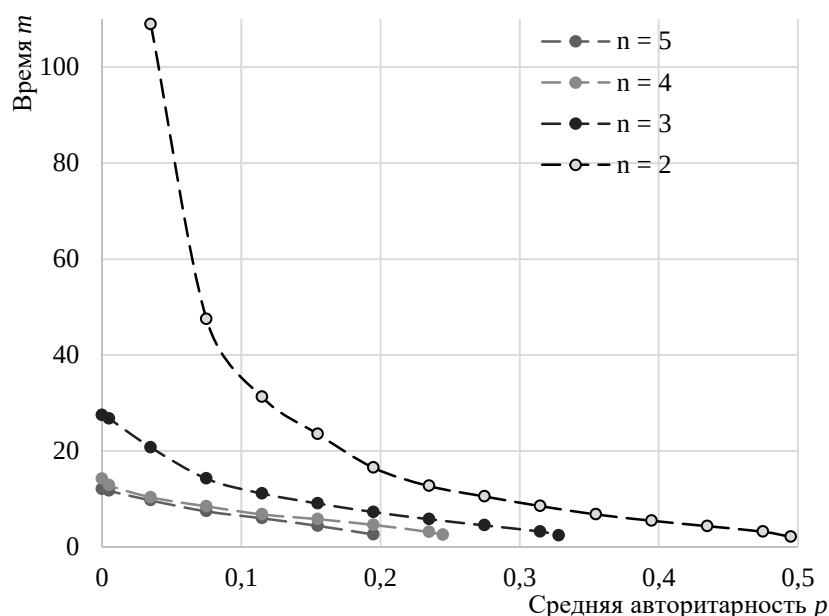


Рис. 1. Зависимость времени t от средней авторитарности p в группе лояльных аудиторов численностью $n = 5; 4; 3; 2$

Fig. 1. Dependence between time t and average authority p in the group of loyal auditors of number $n = 5; 4; 3; 2$

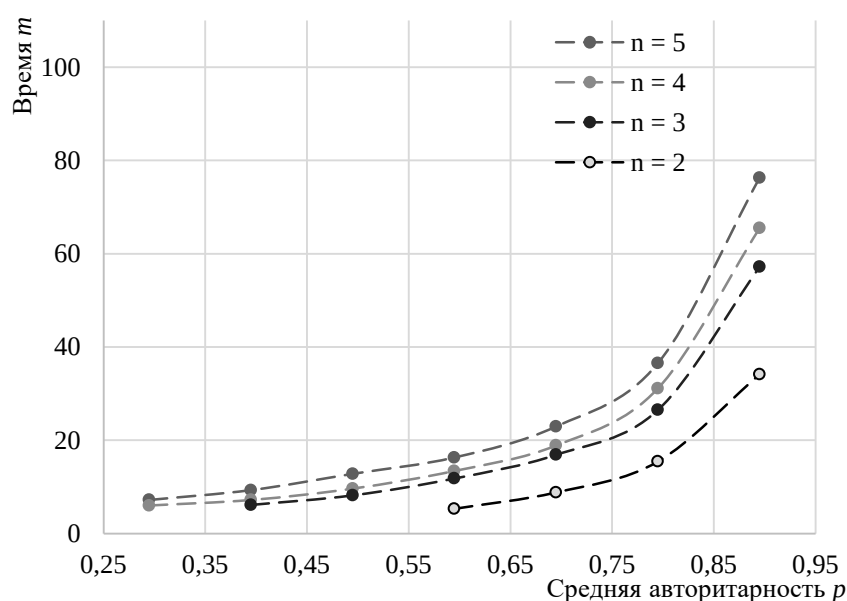


Рис. 2. Зависимость времени t от средней авторитарности p в группе авторитарных аудиторов численностью $n = 5; 4; 3; 2$

Fig. 2. Dependence between time t and average authority p in the group of autocratic auditors of number $n = 5; 4; 3; 2$

Таблица 1. Регрессионные зависимости времени m от средней авторитарности p в группах лояльных и авторитарных аудиторов с численностью $n = 5; 4; 3; 2$

Table 1. Regression dependencies between time m and average authority p in the groups of loyal and autocratic auditors of number $n = 5; 4; 3; 2$

Число членов	Среднее число согласований				
	Лояльные члены группы			Авторитарные члены группы	
	уравнение	$p = 0$	$p = 1/n$	уравнение	$p = 0,9$
5	$m = 12,542e^{-7,385p}$	13	3	$m = 1/(0,129p^2 - 0,357p + 0,228)$	89
4	$m = 13,788e^{-6,347p}$	14	2	$m = 1/(0,131p^2 - 0,403p + 0,270)$	75
3	$m = 26,450e^{-6,862p}$	26	2	$m = 1/(0,225p^2 - 0,575p + 0,350)$	68
2	—	∞	0	—	∞

Анализ **рис. 1** и **2** и данных **табл. 1** позволяет сделать следующие выводы:

1) Для группы лояльных членов зависимости среднего времени m от средней авторитарности группы p достаточно хорошо описываются экспоненциальными кривыми (коэффициенты детерминации⁶ $R^2 \geq 0,978$). Несмотря на внешнюю схожесть форм кривых на **рис. 1** и **2**, регрессии для группы авторитарных экспертов и лояльных экспертов описываются разными формами: для группы авторитарных экспертов наилучшей зависимостью служит дробно-рациональная (соответствующие им коэффициенты детерминации $R^2 \geq 0,998$). Это указывает на различие процессов достижения групповой сплоченности, происходящих в двух типах групп. Выявлено, что для группы из двух членов зависимости не сохраняют свой вид и, как было отмечено ранее, для этого случая консенсус недостижим при $p = 0$, а также при $p = 1$.

2) С уменьшением авторитарности членов группы лояльных экспертов (то есть с ростом их лояльности) число согласований увеличивается (см. **рис. 1**). Консенсус, как способ решения проблемы, делает необходимым членов группы «рисковать собственной шкурой», по мысли Н. Талеба, формируя симметричную ответственность в группе [13], что для лояльных экспертов неприемлемо! Поэтому уменьшение авторитарности членов группы свидетельствует о возможности перекладывания принятия решения на других, каждый эксперт не желает принимать ответственность за решение, вследствие чего наблюдается рост числа согласований. Эффект «безбилетного проезда» будет возрастать по мере увеличения числа ауди-

торов в группе. В группе же авторитарных экспертов наблюдается противоположная зависимость: с увеличением авторитарности число согласований увеличивается (см. **рис. 2**).

3) При приближении к верхнему пороговому среднему значению авторитарностей $p = \frac{1}{n}$ среднее время m для групп с лояльными экспертами медленно убывает по сравнению с группой авторитарных аудиторов (см. **табл. 1**). В условиях абсолютной лояльности $p = 0$ членов группы наблюдается увеличение времени достижения консенсуса при уменьшении числа членов группы. Как отмечает известный американский социолог Д. Майерс, по мере того как численность группы растет, каждый дополнительный член-конформист все меньше добавляет группе «силы» [14]. Тем самым при уменьшении числа аудиторов становится более ощутимой разница во времени между этими двумя типами групп (см. **рис. 1, 2**). Полученный вывод соответствует результатам исследования в социальной психологии: рассогласования в группе можно ожидать в большей мере с численностью из 2-4 человек, где может возникнуть конфликт при принятии решения, чем в группе из 5 аудиторов и более. Увеличение количества аудиторов в таких группах от трех до четырех имеет больший эффект, чем увеличение, к примеру, от 20 до 21 эксперта [15]. Для такой группы из двух экспертов при $p = 0,005$ (очень высокая лояльность) среднее время достигает $m = 878$ (см. **рис. 1**), поскольку каждый аудитор перекладывает принятие решения на другого, каждый не желает подвергать себя риску за принятое решение, что вызывает затягивание самого процесса принятия решения [13]. В группе же авторитарных экспертов при $p = 0,895$ (очень высокая авторитарность) среднее время для группы из двух членов достигает лишь $m = 34$, а для группы из пяти членов уже

⁶ Коэффициент детерминации (R^2) — это доля дисперсии зависимой переменной, обусловленная рассматриваемой зависимостью, то есть объясняющими переменными.

$m = 77$ (см. рис. 2). Причем при стремлении к абсолютной авторитарности ($p \rightarrow 1$) число согласований стремится к бесконечности во всех группах с авторитарными аудиторами.

Тем самым становится понятно, что для группы из двух экспертов именно в условиях высокой лояльности членов может наблюдаться затягивание процесса переговоров. А с ростом числа членов в малой группе затягивание процесса можно ожидать в условиях высокой авторитарности членов.

4) В ходе проведения моделирования выявлено, что при средней авторитарности, стремящейся к $1/n$, качество принимаемого решения становится «равновесным» для обоих типов групп аудиторов. Это означает, что мнение каждого члена группы учитывается в равной доле в консенсусном решении.

5) Результаты моделирования принятия согласованного решения – предложить рекомендации по формированию групп аудиторов. В табл. 2 представлены значения средних авторитарностей аудиторов для обоих типов групп для среднего времени согласованного решения $m = 10$. Видно, что при уменьшении числа аудиторов в группе граница возможных средних авторитарностей членов смещается вправо. Другими словами, при увеличении числа членов в малой группе целесообразно включать менее авторитарных экспертов, а при уменьшении числа членов – более авторитарных.

Таблица 2. Границы средних авторитарностей p при фиксированном времени $m = 10$ в группах лояльных и авторитарных аудиторов с численностью $n = 5; 4; 3; 2$

Table 2. The boundaries of average authority p at fixed time $m = 10$ in the group of loyal and autocratic auditors of number $n = 5; 4; 3; 2$

Число членов	Группа лояльных аудиторов	Группа авторитарных аудиторов
$n = 2$	$p > 0,27$	$p < 0,70$
$n = 3$	$p > 0,14$	$p < 0,56$
$n = 4$	$p > 0,05$	$p < 0,50$
$n = 5$	$p > 0,03$	$p < 0,40$

Закключение

В работе построена теоретическая модель согласованного решения для групп лояльных и авторитарных аудиторов, основанная на регулярных цепях Маркова. Для анализа этой модели проведено моделирование для групп с численностью 2, 3, 4 и 5 экспертов. Динамика малых групп

с числом экспертов менее 5 человек и низкой авторитарностью обладает значимой спецификой по сравнению с большими группами обычных аудиторов [16].

Проблема определения нижней границы численности группы остается дискуссионной на протяжении многих лет: одни исследователи считают, что наименьшее число членов группы – два человека (диада), а другие – три человека (триада). Отстаивающие первую точку зрения полагают, что диада – это уже социальная общность, которая обладает особенностями, отличными от характеристик отдельных людей. В исследовании доказано, что при решении поставленной задачи прийти к консенсусу в диадах очень сложно, время достижения консенсуса может вырасти более чем в 10 (и даже в 100) раз по сравнению с группой из 5 членов, поскольку происходит взаимное перекладывание ответственности за принятие решения, что вызывает затягивание самого процесса переговоров по известной притче «Иван кивает на Петра». Выявлено, что в случае наличия группы из двух абсолютно лояльных экспертов консенсус недостижим.

Сравнительный анализ группы лояльных с группой авторитарных аудиторов показал следующие результаты:

а) для группы лояльных аудиторов численностью более двух человек с ростом лояльности (уменьшением авторитарности) членов время достижения консенсуса экспоненциально растет; для группы авторитарных экспертов с ростом авторитарности число согласований увеличивается не экспоненциально, а имеет более сложную форму связи (описывается дробно-рациональными функциями);

б) различия между числом согласований в разных типах групп тем больше, чем меньше численность группы. Это фиксирует рассогласованность группы лояльных аудиторов в условиях отсутствия желания брать ответственность за принимаемое решение;

в) для группы из двух экспертов в условиях высокой лояльности членов может наблюдаться существенное затягивание процесса принятия согласованного решения, а с ростом числа членов в группе затягивание обсуждения можно ожидать в условиях высокой авторитарности членов.

Одна из практических рекомендаций для недопущения затягивания процесса принятия согласованного решения, вытекающая из результатов исследования: увеличение числа членов в группе требует включения в нее менее авторитарных аудиторов, а при уменьшении числа членов – более авторитарных.

Список источников

1. Ибрагимова П.А., Алиомарова П.А. Аудит систем менеджмента качества на предприятии // Региональные проблемы преобразования экономики. 2018. №12. С. 339-346.
2. Корнилович В.А., Холин А.Н. Коммуникативная динамика малой группы: информационное сопровождение управленческих решений (на примере группового ситуационного анализа) // Коммунология. 2017. Т. 5. №1. С. 99-110.
3. Ньюком Т. Исследование согласия // Социология сегодня. Проблемы и перспективы. Американская буржуазная социология середины XX века. М., 1965. 683 с.
4. Кричевский Р.Л., Дубовская Е.М. Социальная психология малой группы: учеб. пособие для вузов. М.: Аспект Пресс, 2001.
5. Почебут Л.Г., Мейзис И.А. Социальная психология. СПб.: Питер, 2010. 462 с.
6. Шапиро С.И. Об одной математической модели малых групп. (К вопросу об оптимальном объеме группы) // Социально-психологические вопросы общественной активности школьников и студентов / под ред. И.А. Френкеля. Курск: Изд-во КГПИ, 1971. С. 38-51.
7. Полякова М.А. Особенности применения математических моделей для оценки степени достижения консенсуса при разработке требований стандартов // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. №11(53). Ч. 4. С. 104-109.
8. Полякова М.А., Данилова Ю.В. Использование математических моделей при согласовании требований стандарта // Компетентность. 2016. №9-10 (140-141). С. 68-72.
9. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. М.: Физматлит, 2004. 581 с.
10. Аронов И.З., Максимова О.В. Теория консенсуса: учеб. пособие. М.: МГИМО (У), 2022.
11. Орлов А.И. Консенсус и истина (комментарий к опубликованной выше статье И.З. Аронова и О.В. Максимовой) // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83. №3. С. 78-79.
12. Efron B. and Tibshirani R. Statistical data analysis in the computer age. Sci. NewSer. 1991, vol. 253, no. 5018, pp. 390-395.
13. Талеб Н.Н. Рискую собственной шкурой: Скрытая асимметрия повседневной жизни. М.: КоЛибри, Азбука-Аттикус, 2022. 384 с.
14. Майерс Д. Социальная психология. СПб.: Питер, 2019. 277 с.
15. Kerr N.L. Illusions of efficacy: The effects of group size on perceived efficacy in social dilemmas. Journal of Experimental Social Psychology. 1989, no. 25, pp. 287-313.
16. Zazhigalkin A.V., Aronov I.Z., Maksimova O.V., Papic L. Control of consensus convergence in technical committees of standardization on the basis of regular Markov chains model. Springer India: International

Journal of Systems Assurance Engineering and Management. 2019, vol. 10, pp. 29-36. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13198-019-00765-1>

References

1. Ibragimova P.A., Aliomarova P.A. Audit of quality management systems at an enterprise. *Regionalnye problemy preobrazovaniya ekonomiki* [Regional Difficulties of Economic Transformation]. 2018;(12):339-346. (In Russ.)
2. Kornilovich V.A., Kholin A.N. Communicative dynamics of small groups: information support for management decisions (on the example of group situational analysis). *Kommunikologiya* [Communicology]. 2017;5(1):99-110. (In Russ.)
3. Newcomb T. *Issledovanie soglasiya. Sotsiologiya segodnya. Problemy i perspektivy. Amerikanskaya burzhuanaya sotsiologiya sere diny XX veka* [The study on consent. Sociology today. Difficulties and prospects. American bourgeois sociology of the mid-twentieth century]. Moscow: 1965, 683 p. (In Russ.)
4. Krichevsky R.L., Dubovskaya E.M. *Sotsialnaya psikhologiya maloy gruppy: ucheb. posobie dlya vuzov* [Social psychology of small groups: study guide for universities]. Moscow: Aspect Press, 2001. (In Russ.)
5. Pochebut L.G., Meizhis I.A. *Sotsialnaya psikhologiya* [Social psychology]. Saint Petersburg: Piter, 2010, 462 p. (In Russ.)
6. Shapiro S.I. A mathematical model of small groups (Optimal group size). *Sotsialno-psikhologicheskie voprosy obshchestvennoy aktivnosti shkolnikov i studentov* [Social and psychological issues of social activity of schoolchildren and students]. Kursk: Kursk State Teacher Training Institute, 1971, pp. 38-51. (In Russ.)
7. Polyakova M.A. Features of the use of mathematical models to assess the degree of achieved consensus in the development of standards' requirements]. *Mezhdunarodny nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International Research Journal]. 2016;(11(53)):104-109. (In Russ.)
8. Polyakova M.A., Danilova Yu.V. The use of mathematical models, when agreeing upon requirements of standards. *Kompetentnost* [Competence]. 2016; (9-10(140-141)):68-72. (In Russ.)
9. Gantmakher F.R. *Teoriya matrits* [Matrix theory]. Moscow: Fizmatlit, 2004, 581 p. (In Russ.)
10. Aronov I.Z., Maksimova O.V. *Teoriya konsensusa: uchebnoe posobie* [Consensus theory: study guide]. Moscow: MGIMO (U), 2022. (In Russ.)
11. Orlov A.I. Consensus and truth. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov* [Industrial laboratory. Diagnostics of Materials]. 2017;83(3):78-79. (In Russ.)
12. Efron B., Tibshirani R. Statistical data analysis in the computer age. *Science*. 1991;253(5018):390-395.
13. Taleb N.N. *Riskuya sobstvennoy shkuroy: Skrytaya asimetriya povsednevnoy zhizni* [Risking your own

- skin: The hidden asymmetries of everyday life]. Moscow: KoLibri, Azbuka-Attikus, 2022, 384 p. (In Russ.)
14. Myers D. *Sotsialnaya psikhologiya* [Social psychology]. Saint Petersburg: Piter, 2019, 277 p. (In Russ.)
15. Kerr N.L. Illusions of efficacy: The effects of group size on perceived efficacy in social dilemmas. *Journal of Experimental Social Psychology*. 1989;(25):287-313.
16. Zazhigalkin A.V., Aronov I.Z., Maksimova O.V., Papic L. Control of consensus convergence in technical committees of standardization on the basis of regular Markov chains model. Springer India: *International Journal of Systems Assurance Engineering and Management*. 2019;10:29-36. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13198-019-00765-1>

Поступила 19.04.2023; принята к публикации 28.04.2023; опубликована 27.06.2023
Submitted 19/04/2023; revised 28/04/2023; published 27/06/2023

Максимова Ольга Владимировна – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля, Москва, Россия; доцент кафедры математики, доцент кафедры сертификации и аналитического контроля, Университет науки и технологий МИСиС, Москва, Россия.
Email: o-maximova@yandex.ru. ORCID 0000-0002-0569-8650

Аронов Иосиф Зиновьевич – доктор технических наук, профессор МГИМО (У), Москва, Россия.
E-mail: aronoviz48@gmail.com. ORCID 0000-0003-0251-1958

Olga V. Maksimova – PhD (Eng.), Lead Researcher, Izrael Institute of Global Climate and Ecology, Moscow, Russia; Associate Professor of the Department of Mathematics, Associate Professor of the Department of Certification and Analytical Control, University of Science and Technology MISIS (Moscow Institute of Steel and Alloys), Moscow, Russia. E-mail: o-maximova@yandex.ru. ORCID 0000-0002-0569-8650

Iosif Z. Aronov – DrSc (Eng.), Professor of MGIMO University (Moscow State Institute of International Relations), Moscow, Russia. E-mail: aronoviz48@gmail.com. ORCID 0000-0003-0251-1958

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

УДК 658.284:681.2

DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-2-76-84



МЕТОД ОЦЕНКИ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ СИСТЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ ПРИБОРОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОИЗВОДСТВ

Туманов А.Ю.

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Приборостроительные производства нуждаются в совершенствовании оценки результативности автоматизированной информационной системы обеспечения устойчивости (АЙСОУ) функционирования производственного объекта, так как имеют ряд особенностей, которые не учитываются в существующих нормативных документах. **Цель работы.** Разработка метода оценки результативности автоматизированной информационной системы обеспечения устойчивости функционирования производственного объекта в целях повышения качества. **Используемые методы.** Методы исследования операций. **Новизна.** Разработка метода оценки результативности автоматизированной информационной системы обеспечения устойчивости функционирования производственного объекта в целях повышения качества представляет собой разработку способов, приемов, общих и частных методик, моделей и средств для достижения цели по повышению качества АЙСОУ. Метод в отличие от существующих позволяет оценить, насколько улучшения в области ряда факторов, таких как влияние информационных технологий, совершенствование методик оценки устойчивости, подготовки специалистов и пользователей, более детализированного и объективного описания и представления опасности на объектовом уровне, снижают затраты ручного труда, повышают качество оценки, тем самым повышая результативность, и либо прямо, либо косвенно влияют на эффективность всей системы управления производственным предприятием. **Результат.** Впервые предложен метод оценки результативности показателей процесса АЙСОУ на этапе жизненного цикла системы «проектирование». **Практическая значимость** заключается в возможности пользователей АЙСОУ более объективно оценить качество изменений в разрабатываемой системе на основе ряда показателей. Особенно показательным в данном контексте снижение трудозатрат. Проведена апробация метода расчета результативности АЙСОУ.

Ключевые слова: приборостроение, производство, устойчивость, система менеджмента качества, результативность

© Туманов А.Ю., 2023

Для цитирования

Туманов А.Ю. Метод оценки результативности систем обеспечения устойчивости функционирования объектов приборостроительных производств // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №2. С. 76-84. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-2-76-84>



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

A METHOD FOR ASSESSING THE EFFECTIVENESS OF SYSTEMS USED TO ENSURE THE STABILITY OF THE FUNCTIONING OF INSTRUMENT-MAKING FACILITIES

Tumanov A.Yu.

Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). Instrument-making industries need to improve the assessment of the effectiveness of the automated information system for ensuring the stability of the functioning (AISES) of the production facility, as they have a number of features that are not taken into account in the existing regulatory documents. **Objectives.** Development of a method for assessing the effectiveness of an automated information system used to ensure the stability of the functioning of a production facility to improve the quality. **Methods Applied.** Operations research methods. **Originality.** The development of the method for assessing the effectiveness of an automated information system used to ensure the stability of the functioning of a production facility to improve the quality is the development of methods, techniques, general and particular procedures, models and means to achieve the goal of improving the quality of AISES. The method, in contrast to the existing ones, allows us to assess how much improvement in the field of a number of factors, such as the impact of information technologies, the improvement of methods for assessing the stability, training of specialists and users, a more detailed and impartial description and presentation of hazards at the facility-based level, reduces manual labor costs, improves the quality of the assessment entailing an increase in the effectiveness, and has either a direct, or indirect influence on the efficiency of the entire plant management system. **Result.** The paper proposes a novel method for assessing the effectiveness of the AISES process indicators at the stage of the life cycle of the “design” system. **Practical Relevance.** It consists in the ability of users of AISES to more objectively assess the quality of changes in the system being developed based on a number of indicators. The reduction of labor costs is especially indicative in this context. We tested the method for calculating the effectiveness of AISES.

Keywords: instrument-making, manufacturing, stability, quality management system, effectiveness

For citation

Tumanov A.Yu. A Method for Assessing the Effectiveness of Systems Used to Ensure the Stability of the Functioning of Instrument-Making Facilities. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 2, pp. 76-84. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-2-76-84>

Введение

Результативность системы менеджмента качества определяется степенью достижения результатов, адекватных поставленным целям, удовлетворяющих определенные потребности всех заинтересованных сторон.

Известно, что одним из основных инструментов совершенствования деятельности предприятия в области качества, согласно стандартам ISO серии 9000, является измерение результативности системы менеджмента качества.

Согласно нормативным документам в области качества понятие «результативность» можно охарактеризовать как «степень реализации запланированной деятельности и запланированных результатов, которые достигнуты», поэтому при оценке результативности системы менеджмента качества есть два уровня оценки:

- оценка по степени реализации запланированной деятельности;

- оценка по степени достижения запланированных результатов в области качества.

Первая оценка дает представление о степени выполнения требований документов по планированию и осуществлению процессов жизненного цикла продукции. Анализ этой оценки производится на основе определения степени достижения установленных выходов процессов, а также степени выполнения требований стандарта ISO 9001 и характеристик процессов.

Вторая оценка характеризует степень достижения поставленных целей в области качества на различных уровнях организации, в том числе в подразделениях.

Анализ ГОСТов [1-3, 6] и методов расчета результативности и эффективности системы менеджмента качества [7, 11, 12] позволил обобщить и сгруппировать эти методы по основным группам:

- 1) на основе оценки достижения установленных числовых значений показателей целей;

2) на основе оценки результативности составляющих ее процессов;

3) на основе оценки функционирования выделенных объектов, включая процессы различной природы;

4) на основе анализа работы структурных подразделений предприятия;

5) на основе выполнения пунктов стандарта, предъявляющего требования;

6) на основе анализа и оценки работ в определенных областях;

7) на основе результатов внутреннего аудита.

Таким образом, на данный момент существует широкий спектр подходов к оценке результативности систем и процессов, который свидетельствует о понимании важности данной оценки для успешного функционирования объектов и предприятия в целом. Проведенный анализ показал, что:

- существенная часть представленных методов разрабатывается как локальные методы для конкретной области деятельности;

- весьма распространены методы оценки СМК на основе оценки только входящих процессов, не учитывают особенности предметной области;

- при разработке методов результативности часто не проводится обоснование важности выбора того или иного процесса для оценки;

- разработанные методы не учитывают особенностей оценки результативности для объектов предприятий приборостроения.

Фактор сложности производства является очень важной особенностью приборостроительного производства. «В современном мире производство становится все более и более сложным. Происходит усложнение применяемых машин и агрегатов, также самих технических и технологических систем. В подобных условиях возможный отказ или неисправность какого-либо одного элемента может привести к краху деятельности предприятия» [12]. Из-за сложности систем проведение мероприятий по повышению устойчивости функционирования объектов, особенно в условиях чрезвычайной ситуации (ЧС), становится все более затруднительным и затратным. Поэтому в настоящее время главный приоритет в области управления смещается в область обеспечения качества деятельности предприятия.

Не менее важен и фактор объективного описания и представления опасности и уязвимости на объектовом уровне, особенно в условиях ЧС [9, 10]. Ни один из существующих методов оценки результативности этого в полной мере не учитывает.

Следует учитывать сопряженность СМК и систем управления промышленной безопасно-

стью, которые обеспечивают:

- идентификацию, анализ и прогнозирование риска аварий на опасных производственных объектах и связанных с такими авариями угроз;

- планирование и реализацию мер по снижению риска аварий на опасных производственных объектах, в том числе при выполнении работ или оказании услуг на опасных производственных объектах сторонними организациями либо индивидуальными предпринимателями;

- координацию работ по предупреждению аварий и инцидентов на опасных производственных объектах;

- своевременную корректировку мер по снижению риска аварий на опасных производственных объектах;

- информационное обеспечение осуществления деятельности в области промышленной безопасности [5].

Актуальность исследования заключается в том, что существующие методы недостаточно учитывают особенности создания систем обеспечения устойчивости функционирования приборостроительных производств, таких как сложность процессов производства, уязвимость и устойчивость функционирования объектов в условиях ЧС. Необходимо создать метод оценки результативности, который должен включать элементы 1, 2 и 3-й групп с учетом входящих процессов и особенностей исследуемых объектов (комбинированная модель). Таким образом, для приборостроительных производств существует необходимость в совершенствовании оценки результативности систем обеспечения устойчивости, так как они имеют ряд особенностей, которые не учитываются в существующих нормативных документах и недостаточно рассмотрены в научных работах.

Целью работы является разработка метода оценки результативности систем обеспечения устойчивости функционирования объектов приборостроительных производств.

Задачи работы:

- 1) анализ предлагаемых ГОСТов и методов к оценке результативности систем менеджмента качества процессов и предприятий;

- 2) анализ уязвимости объектов приборостроительных производств;

- 3) разработка метода оценки результативности систем обеспечения устойчивости функционирования объектов приборостроительных производств;

- 4) обсуждение полученных результатов.

Выдвинута гипотеза исследования, что метод оценки результативности систем обеспечения устойчивости функционирования объектов при-

боростроительных производств позволит более детализировано с учетом составляющих ее процессов и особенностей жизненного цикла разработки системы обеспечения устойчивости произвести многокритериальную оценку результативности системы за счет определения степени достижения установленных выходов процессов установленным планируемыми требованиями.

Методы исследования

Рассмотрим оценку результативности как оценку по степени реализации запланированной деятельности и оценку по степени достижения запланированных результатов в области качества с применением математических моделей. Универсальная математическая модель оценки уровня качества

$$K_s = \varphi(\{P_1, P_2, \dots, P_n\})_s; (\{P_1, P_2, \dots, P_n\})_s, \quad (1)$$

где K_s ($K_s > 0$) – комплексный показатель качества, а $P_1, P_2, \dots, P_n$ – значения совокупности единичных показателей качества продукции P_8 по отдельным факторам в сравнении с базовыми показателями, принадлежащими некоторому базовому образцу.

Для оценки результативности, то есть сравнения полученных результатов оценки качества с запланированными, обычно поступают следующим образом. Результат сравнения j -го показателя качества P_{js} продукции P_8 с соответствующим показателем $P_{jб}$ выражают в виде некоторой безразмерной величины. Функцию $q_{js} = \gamma(P_{js}, P_{jб})$ (обычно $q_{js} > 0$), которая конструируется таким образом, чтобы она соответствовала физическому смыслу и была бы достаточно простой, выражают как

$$q_{js} = J = \frac{P_{js}}{P_{jб}}. \quad (2)$$

Если диапазон изменения показателя P_{js} ограничен каким-то предельно допустимым значением $P_{jдоп}$, то вместо вышепредставленных оценок используют формулу

$$q_{js} = J = \frac{(P_{js} - P_{jдоп})}{(P_{jб} - P_{jдоп})}. \quad (3)$$

Для целей данного исследования будет произведена оценка результативности по первому этапу – степени реализации запланированной деятельности, характеризующаяся как степень достижения уровня устойчивости функционирования объектов приборостроения в условиях чрезвычайной ситуации. Под объектами приборостроительных производств будем в рамках данного исследования понимать такие элементы инфраструктуры производственного предприятия, как:

- производственное здание (цех);
- технологическое оборудование, установленное в цеху.

Разработка метода оценки результативности автоматизированной информационной системы обеспечения устойчивости функционирования производственного объекта в целях повышения качества представляет собой разработку способов, приемов, общих и частных методик, моделей и средств для достижения цели по повышению качества СОУ. Метод позволяет оценить, насколько улучшения в области ряда факторов, таких как влияние информационных технологий, совершенствование методик оценки устойчивости, подготовки специалистов и пользователей, более детализированного и объективного описания и представления опасности на объектовом уровне, снижают затраты ручного труда, повышают качество оценки, тем самым повышая результативность, и либо прямо, либо косвенно влияют на эффективность всей системы управления производственным предприятием.

Ниже представлена совокупность операций и этапов оценки результативности, составляющих основу предлагаемой частной методики оценки как одного из составных частей метода оценки результативности АИСОУ функционирования объекта приборостроительных производств.

В работе сравнение качества версий системы и процессов, входящих в АИСОУ осуществляется через расчет результативности системы. Каждый отдельный процесс АИСОУ (PR_i) характеризуется соответствующими показателями, приведенными в документах АИСОУ, указанными в нормативных документах, по оценке устойчивости функционирования объектов. Основную информацию по оценке результативности можно почерпнуть из анализа уязвимости объектов приборостроительных производств, представляющего собой описание действий при оценке уязвимости и устойчивости производственного объекта и их взаимосвязей, которые представлены на рисунке.



Взаимосвязь процессов анализа уязвимости и оценки устойчивости
Relations between the vulnerability analysis and stability assessment processes

Полученные результаты и их обсуждение

На основе проведенного анализа уязвимости объектов приборостроительных производств и анализа нормативных документов и методов к оценке результативности систем менеджмента качества процессов и предприятий был предложен метод оценки результативности показателей процесса АИСОУ, описание которого приведено ниже.

Приведем краткое описание содержания этапов предлагаемого метода.

1 этап. На исследуемом предприятии приборостроения при оценке результативности процессов АИСОУ сначала определяются показатели процессов $\Pi_{iпрj}$, где i – номер показателя процесса от 1 до n , j – порядковый номер процесса АИСОУ, m – количество процессов АИСОУ. Затем на основании них рассчитывается величина результативности показателя процесса ($R(\Pi_{iпрj})$).

Так как основное исследование СОУ и разрабатываемой АИСОУ происходит на одном из этапов ЖЦ – проектировании системы, то расчет результативности происходит двух видов:

- количественно путем сравнения достигнутого значения по процессу планируемой результирующей версии системы к предыдущей версии в виде отношения достигнутого значения к предыдущему;

- качественно в виде бинарной оценки – «достигнут» или «не достигнут». Так, если результат показателя процесса определяется качественной оценкой «достигнут» или «не достигнут», то величина результативности показателя процесса $R(\Pi_{iпрj})$ устанавливается с учетом недостигнутого результата в процентах. Оценка производится либо экспертным путем, либо с применением методов нечеткой логики с введением так называемой лингвистической переменной и шкалированием.

2 этап. Применяя метод простой аддитивной свертки показателей без учета весов, рассчитаем результативность процесса $R(\Pi_j)$ в целом:

$$R(\Pi_j) = \frac{P(\Pi_{1j}) + P(\Pi_{2j}) + \dots + P(\Pi_{nj})}{n}, \quad (4)$$

где i – порядковый номер показателя процесса АИСОУ; n – количество показателей j -го процесса АИСОУ; j – порядковый номер процесса АИСОУ.

Процесс «результативен» при оценке процесса АИСОУ $85\% < R(\Pi_j) < 100\%$.

Процесс «достаточно результативен» – при $75\% < R(\Pi_j) < 85\%$.

Процесс «недостаточно результативен» – при $65\% < R(\Pi_j) < 75\%$.

Процесс «не результативен» – при $R(\Pi_j) \leq 65\%$.

3 этап. После расчёта результативности всех процессов АИСОУ проводится расчёт результативности всех процессов АИСОУ предприятия $R_{\text{АИСОУ}}$ по формуле

$$R_{\text{АИСОУ}} = \frac{R(\Pi_j) + R(\Pi_{j+1}) + \dots + R(\Pi_m)}{m}, \quad (5)$$

где j – порядковый номер процесса АИСОУ; m – количество процессов АИСОУ.

После подсчета данных делается вывод о результативности $R_{\text{АИСОУ}}$:

$R_{\text{АИСОУ}} \geq 85\%$ – АИСОУ «результативна»;

$75\% < R_{\text{АИСОУ}} < 85\%$ – АИСОУ «достаточно результативна»;

$65\% < R_{\text{АИСОУ}} < 75\%$ – АИСОУ «недостаточно результативна»;

$R_{\text{АИСОУ}} \leq 65\%$ – АИСОУ «не результативна».

Рассмотрим один из ключевых процессов АИСОУ – «Обеспечение устойчивости функционирования объекта в условиях ЧС» [8, 9].

В табл. 1 приведено представление определяемых показателей по процессу «Оценка устойчивости функционирования объекта в условиях ЧС» для текущей и результирующей версии АИСОУ на этапе ЖЦ (проектирование).

Расчет результативности каждого процесса, в том числе «Оценка устойчивости функционирования объекта в условиях ЧС», осуществлялся по формуле (4). Для других процессов АИСОУ расчеты аналогичны. Окончательная результативность процессов АИСОУ организации рассчитывается по формуле (5) и в символьном виде приведена в табл. 2.

Таблица 1. Показатели процесса «Оценка устойчивости функционирования объекта в условиях ЧС» для текущей и результирующей версии системы

Table 1. Indicators of the process “Assessment of the stability of the facility operation in an emergency” for the current and resulting version of the system

Наименование показателя процесса «Оценка устойчивости функционирования объекта в условиях ЧС»	АИСОУ _т	АИСОУ _р	$R(\Pi_{\text{юу}})$
Трудозатраты по оценке уязвимости зданий и сооружений к воздействию ударной волны (ч)	$\Pi_{1\text{юу}}$	$\Pi_{1\text{юу}}$	$R(\Pi_1)$
Трудозатраты на проведение работ по оценке уязвимости зданий и сооружений к воздействию осколков конструкций (ч)	$\Pi_{2\text{юу}}$	$\Pi_{2\text{юу}}$	$R(\Pi_2)$
Трудозатраты на проведение работ по оценке уязвимости зданий и сооружений к воздействию теплового излучения (ч)	$\Pi_{3\text{юу}}$	$\Pi_{3\text{юу}}$	$R(\Pi_3)$
Трудозатраты на изучение внутренней планировки объекта и на изучение района расположения объекта (ч)	$\Pi_{4\text{юу}}$	$\Pi_{4\text{юу}}$	$R(\Pi_4)$
Трудозатраты на анализ системы управления (ч)	$\Pi_{5\text{юу}}$	$\Pi_{5\text{юу}}$	$R(\Pi_5)$
Защищенность конструкций и оборудования от механических воздействий: осколков, ударной волны, падений, обрушений	$\Pi_{6\text{юу}}$	$\Pi_{6\text{юу}}$	$R(\Pi_6)$

Таблица 2. Результативность процессов системы обеспечения устойчивости объекта
Table 2. Process effectiveness of the system used to ensure the stability of the facility

Процесс АИСОУ в условиях ЧС	Результативность процесса $R(PP_j)$
Подготовка объектов к восстановлению производства	$R(PP_1)$
Обеспечение устойчивости функционирования объекта	$R(PP_2)$
Обеспеченность производственного персонала защитой	$R(PP_3)$
Обеспечение устойчивости производственного комплекса	$R(PP_4)$
Материально-техническое обеспечение производства при временном нарушении поставок	$R(PP_5)$
Готовность объекта к выполнению восстановительных работ	$R(PP_6)$
Обеспеченность надежным управлением	$R(PP_7)$

На последнем этапе проводится оценка результативности всей АИСОУ, которая осуществляется по формуле (5).

Результат. Разработан метод оценки результативности показателей процесса АИСОУ на этапе жизненного цикла системы «Проектирование», который позволяет итеративно, за несколько шагов оценить результативность улучшения АИСОУ за счет сравнения показателей процессов текущей и планируемой версии системы как по одному частному процессу, так и для всей системы в целом.

В состав разрабатываемого метода оценки результативности систем обеспечения устойчивости функционирования объектов приборостроительных производств входят несколько элементов, основу которых составляют:

- математическая модель оценки результативности СОУ;
- методика оценки результативности СОУ в целях повышения качества, представляющая собой совокупность основных операций;
- программное средство автоматизации расчета результативности процессов и результативности СОУ в целом.

Метод оценки результативности систем обеспечения устойчивости функционирования объектов приборостроительных производств является частью научного инструментария методологии управления качеством СОУ производственных объектов приборостроения.

Практическая значимость заключается в возможности пользователей АИСОУ более объективно оценить качество изменений в разрабатываемой системе на основе ряда показателей. Проведена апробация метода расчета результативности АИСОУ.

Заключение

Таким образом, для предприятий приборостроения, деятельность которых обладает рядом особенностей, метод расчета результативности АИСОУ не регламентирован государственными стандартами. В ходе проделанной работы был разработан метод расчета результативности АИСОУ, адаптированной к особенностям приборостроения. Специфика метода заключается в поэтапном расчете показателей результативности процессов, результативности процесса и АИСОУ в целом.

Метод позволяет оценить, насколько улучшения в области ряда факторов, таких как влияние информационных технологий, совершенствование методик оценки устойчивости, подготовки специалистов и пользователей, более детализированного и объективного описания и представления опасности на объектовом уровне, снижают затраты ручного труда, повышают качество оценки, тем самым повышая результативность, и либо прямо, либо косвенно влияют на эффективность всей системы управления производственным предприятием. Направление дальнейших исследований – в процессе оценки результативности учитывать важность факторов, влияющих на результативность процессов АИСОУ.

Список источников

1. ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Системы менеджмента качества. Требования. Введ. 2015-11-01. М.: Стандартиформ, 2015. 43 с.
2. ГОСТ Р ИСО 14001-2016. Системы экологического менеджмента. Требования и руководство по применению. М.: Стандартиформ, 2018.

3. ГОСТ Р ИСО 45001-2020. Системы менеджмента безопасности труда и охраны здоровья. Требования и руководство по применению. М.: Стандартинформ, 2020.
4. Постановление Правительства РФ от 17.08.2020 № 1243 «Об утверждении требований к документационному обеспечению систем управления промышленной безопасностью» / Официальный интернет-портал правовой информации. 19.08.2020. № 0001202008190014. ИКБ: www.pravo.gov.ru.
5. Федеральный закон от 21.07.1997 № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» // Собрание законодательства Российской Федерации. 1997. №30. Ст. 3588.
6. ГОСТ Р 57189-2016/ISO/TS 9002:2016 (ISO 9001:2015 (ISO/TS 9002:2016, IDT). Системы менеджмента качества. Руководство по применению. Введ. 2017-11-01. М.: Стандартинформ, 2016. 47 с.
7. Возчикова К.О., Спиридонов Д.М., Евсеева Д.М. Расчет результативности системы менеджмента качества атомной станции // Физика. Технологии. Инновации: тезисы докладов VI Международной молодежной научной конференции, посвященной 70-летию основания Физико-технологического института УрФУ (Екатеринбург, 20-24 мая 2019 г.). Екатеринбург: ООО «Издательство Учебно-методический центр УПИ», 2019. С. 1128-1129.
8. Туманов А.Ю. Научно-методическая концепция управления безопасностью радиоэлектронных и приборостроительных производств в условиях чрезвычайных ситуаций // Наука и бизнес: пути развития. 2021. №8 (122). С. 71-74.
9. Туманов А.Ю. Управление качеством информационно-измерительной и управляющей системы радиационного мониторинга // Наука и бизнес: пути развития. 2022. №10 (136). С. 145-147.
10. ГОСТ Р 42.2.01-2014. Национальный стандарт Российской Федерации. Гражданская оборона. Оценка состояния потенциально опасных объектов, объектов обороны и безопасности в условиях воздействия поражающих факторов обычных средств поражения. Методы расчета. Введ. 22.08.2014. М.: Стандартинформ, 2014. 9 с.
11. Дранкова Н.А., Денисова Я.В. Проблемы эффективности системы менеджмента качества и пути их решения в условиях новой экономической среды // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №1. С. 65-73. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-1-65-73>
12. Черкасов Д.А. Разработка методики оценки системы менеджмента качества предприятия с применением квалиметрических методов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т.18. №1. С. 63-70. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-1-63-70>

References

1. State standard GOST R ISO 9001-2015. Quality management systems. Requirements. Moscow: Standartinform, 2015, 43 p. (In Russ.)
2. State standard GOST R ISO 14001-2016. Environmental management systems. Requirements with guidance for use. Moscow: Standartinform, 2018. (In Russ.)
3. State standard GOST R ISO 45001-2020. Occupational health and safety management systems. Requirements with guidance for use. Moscow: Standartinform, 2020. (In Russ.)
4. Resolution of the Government of the Russian Federation No. 1243 dated August 17, 2020 "On approval of requirements for documentation support of industrial safety management systems". Available at: www.pravo.gov.ru.
5. Federal law No. 116-FZ dated July 21, 1997 "On industrial safety of hazardous industrial facilities". Collected Legislation of the Russian Federation. 1997;(30). Article 3588.
6. State standard GOST R 57189-2016/ISO/TS 9002:2016 (ISO 9001:2015 (ISO/TS 9002:2016, IDT). Quality management systems. Guidelines for the application of ISO 9001:2015. Moscow: Standartinform, 2016, 47 p. (In Russ.)
7. Vozchikova K.O., Spiridonov D.M., Evseeva D.M. Calculating the effectiveness of the quality management system of the nuclear power plant. *Fizika. Tekhnologii. Innovatsii: tezisy dokladov VI Mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchnoy konferentsii, posvyashchennoy 70-letiyu osnovaniya Fiziko-tekhnologicheskogo instituta UrFU* [Physics. Technologies. Innovations: Abstracts of the 6th International Youth Scientific Conference devoted to the 70th anniversary of the Physics and Technology Institute of Ural Federal University]. Yekaterinburg: LLC Publishing House of the Training Center of Ural Polytechnic Institute, 2019, pp. 1128-1129. (In Russ.)
8. Tumanov A.Yu. A scientific and methodological concept of safety management of radio-electronic and instrument-making facilities in emergency situations. *Nauka i biznes: puti razvitiya* [Science and Business: Development Trends]. 2021;(8(122)):71-74. (In Russ.)
9. Tumanov A.Yu. Quality management of the information, measuring and control system of radiation monitoring. *Nauka i biznes: puti razvitiya* [Science and Business: Development Trends]. 2022;(10(136)):145-147. (In Russ.)
10. State standard GOST R 42.2.01-2014. National standard of the Russian Federation. Civil defense. Assessment of the state of hazardous facilities, defense and security facilities exposed to the damaging factors of conventional weapons. Calculation methods. Moscow: Standartinform, 2014, 9 p. (In Russ.)
11. Drankova N.A., Denisova Ya.V. Problems of efficiency of the quality management system and ways to solve

- them in the new economic environment. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023;(1):65-73. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-1-65-73>
12. Cherkasov D.A. Development of an assessment methodology for the quality management system of an organization using qualimetry methods. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2020;18(1):63-70. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-1-63-70>

Поступила 08.04.2023; принята к публикации 25.05.2023; опубликована 27.06.2023
Submitted 08/04/2023; revised 25/05/2023; published 27/06/2023

Туманов Александр Юрьевич – кандидат технических наук, доцент,
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
Санкт-Петербург, Россия. Email: toumanov@mail.ru. ORCID 0000-0003-2704-5236

Aleksandr Yu. Tumanov – PhD (Eng.), Associate Professor,
Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia.
Email: toumanov@mail.ru. ORCID 0000-0003-2704-5236

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ NEW TECHNOLOGICAL PROCESSES AND EQUIPMENT

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

УДК 549:54.055

DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-2-85-101



СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ВОЛЬФРАМА, ЗОЛОТА И АЗОТА, ПОЛУЧЕННЫХ НА МЕДНОЙ ПОДЛОЖКЕ КОМПЛЕКСНЫМ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Почетуха В.В.¹, Романов Д.А.¹, Ващук Е.С.², Филяков А.Д.¹, Иванов Ю.Ф.³, Гостевская А.Н.¹

¹ Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия

² Филиал Кузбасского государственного технического университета им. Т.Ф. Горбачева в г. Прокопьевске, Россия

³ Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, Россия

Аннотация. В настоящей работе с помощью комбинированной обработки получено покрытие W-Au толщиной от 120 до 190 мкм на медной подложке. Впервые изучены структурно-фазовые состояния и свойства электроэрозионностойких покрытий на медных электрических контактах системы W-Au-N. На границе контакта покрытия и подложки выявлено формирование переходной зоны, обогащенной атомами золота. Показано, что атомы золота проникают в подложку, формируя протяженные прослойки вдоль границ зерен меди, свидетельствующие о сплавлении покрытия и подложки. Методами микрорентгеноспектрального анализа выявлены островки вольфрама в слое золота, что свидетельствует о неоднородном элементном составе покрытия. Методами рентгенофазового анализа выявлен многофазный состав покрытия: W, Cu₁₂₈Au₂₇₂, Au_{0,2}Cu_{0,8}, Cu_{0,25}Au_{0,75}. Методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии дополнительно установлено формирование в покрытии частиц нитридов меди и нитридов вольфрама, размеры которых изменяются в пределах 7-20 нм. Установлено, что среднее значение микротвердости изменяется в пределах от 1,1 до 1,29 ГПа и снижается по мере удаления от поверхности покрытия. Модуль Юнга изменяется подобным образом и снижается при удалении от поверхности к границе контакта покрытия и подложки. Показано, что параметр износа покрытия составляет $1,3 \cdot 10^{-6}$ мм³/Н·м, что более чем в 56 раз меньше параметра износа меди. Коэффициент трения покрытия составляет 0,3, что соответствует коэффициенту трения подложки. Можно предположить, что высокие трибологические свойства формируемого покрытия обусловлены наличием наноразмерных частиц нитридных фаз. Изученный нами способ позволяет расширить банк данных о физических процессах и механизмах формирования структурно-фазовых состояний и свойств электроэрозионностойких покрытий на медных электрических контактах системы W-Au-N с использованием электровзрывного напыления, электронно-пучковой обработки и азотирования. Целью работы является получение покрытия системы золото-вольфрам на медной подложке, изучение его физико-механических свойств, а также структурно-фазового состава после воздействия электронного пучка и азотирования.

Ключевые слова: низкоэнергетичный импульсный электронный пучок, азотирование, золото, вольфрам, медь

Работа выполнена в рамках государственного задания № 0809-2021-0013. Электровзрывное напыление произведено с использованием оборудования лаборатории электровзрывного напыления высоконадежных покрытий СибГИУ, создана согласно постановлению Правительства Кемеровской области – Кузбасса № 632 от 19 сентября 2022 г., соглашение № 8. Исследования проведены с использованием оборудования ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов» ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет».

© Почетуха В.В., Романов Д.А., Ващук Е.С., Филяков А.Д., Иванов Ю.Ф., Гостевская А.Н., 2023

Для цитирования

Структура и свойства покрытий на основе вольфрама, золота и азота, полученных на медной подложке комплексным электрофизическим методом / Почетуха В.В., Романов Д.А., Ващук Е.С., Филяков А.Д., Иванов Ю.Ф., Гостевская А.Н. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №2. С. 85-101. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-2-85-101>



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

STRUCTURE AND PROPERTIES OF COATINGS BASED ON TUNGSTEN, GOLD AND NITROGEN OBTAINED ON A COPPER SUBSTRATE BY AN INTEGRATED ELECTROPHYSICAL METHOD

Pochetukha V.V.¹, Romanov D.A.¹, Vashchuk E.S.², Filyakov A.D.¹, Ivanov Yu.F.³, Gostevskaya A.N.¹

¹ Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

² Branch of Gorbachev Kuzbass State Technical University, Prokopyevsk, Russia

³ Institute of High Current Electronics, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia

Abstract. In this research, a W-Au coating with a thickness of 120-190 μm was obtained on a copper substrate using combined processing. The paper presents a novel study on structural phase states and properties of electroerosion-resistant coatings on copper electrical contacts of the W-Au-N system. A transition zone enriched with gold atoms was formed at the interface between the coating and the substrate. It was shown that gold atoms penetrate into the substrate, forming extended interlayers along the boundaries of copper grains, which indicated the fusion of the coating and substrate. The X-ray microanalysis revealed tungsten islands in the gold layer, which indicated a non-uniform elemental composition of the coating. The X-ray phase analysis revealed a multiphase composition of the coating: W, Cu₁₂₈Au₂₇₂, Au_{0.2}Cu_{0.8}, and Cu_{0.25}Au_{0.75}. The methods of transmission electron diffraction microscopy additionally established the formation of particles of copper nitrides and tungsten nitrides, whose sizes varied within 7-20 nm, in the coating. It has been established that the average value of microhardness varies from 1.1 to 1.29 GPa and decreases with distance from the coating surface. Young's modulus changes in a similar way: it decreases with distance from the surface to the interface between the coating and the substrate. It is shown that the coating wear parameter is $1.3 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$, which is over 56 times less than the copper wear parameter. The coefficient of friction of the coating is 0.3, which corresponds to the coefficient of friction of the substrate. It can be assumed that the high tribological properties of the formed coating are due to nanosized particles of nitride phases. The method studied by us allows us to expand the data bank of physical processes and formation mechanisms of structural phase states and properties of electroerosion-resistant coatings on copper electrical contacts of the W-Au-N system using electro-explosive spraying, electron beam processing and nitriding. The research is aimed at obtaining the Au-W coating on the copper substrate, studying its physical and mechanical properties, and structural and phase composition after exposure to an electron beam and nitriding.

Keywords: low-energy pulsed electron beam, nitriding, gold, tungsten, copper

The research was carried out as part of state order No. 0809-2021-0013. An electro-explosive spraying was performed using equipment of the Laboratory of Electro-Explosive Spraying of Highly Reliable Coatings at Siberian State Industrial University, which was established according to Decree of the Government of the Kemerovo Region – Kuzbass No. 632 dated September 19, 2022, Agreement No. 8. Studies were conducted using equipment of the Common Use Center Structure, Mechanical and Physical Properties of Materials at Novosibirsk State Technical University.

For citation

Pochetukha V.V., Romanov D.A., Vashchuk E.S., Filyakov A.D., Ivanov Yu.F., Gostevskaya A.N. Structure and Properties of Coatings Based on Tungsten, Gold and Nitrogen Obtained on a Copper Substrate by an Integrated Electrophysical Method. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 2, pp. 85-101. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-2-85-101>

Введение

Одной из важнейших проблем электроприборостроения является износ покрытий электромагнитных реле, коммутационных систем, энергетических коммутаторов и других приборов электротехники. Данные механизмы работают на замыкание и размыкание электрических цепей, а в местах перехода тока из одной токоведущей контакт-детали в другую происходит механическое истирание, а также износ в результате токовой нагрузки. В связи с этим возникает одна из приоритетных задач электротехнического материаловедения – создание уникальных свойств электрических контактов [1, 2].

Контакты для коммутационных устройств изготавливают из меди, поскольку она имеет высокие показатели электро- и теплопроводности, легко подвергается механической обработке, обладает стойкостью к окислению. Однако при попадании в агрессивную среду все-таки проявляется коррозия меди [3-6].

Одним из элементов, который инертен, устойчив к кислотам и щелочам, является золото. В электротехнике оно широко применяется, так как золотые детали не требуют чистки и замены. Из золота возможно нанесение сверхтонких пленок, которое позволяет защитить поверхности от коррозии. Достаточно нанесения слоя толщиной 1 мкм с целью защиты от окисления проводника [7-11].

Псевдосплавы вольфрама с медью широко применяются в различных силовых переключателях электрического тока. К особенностям данного соединения относятся высокая электропроводность, механическая прочность, стойкость к электрической эрозии. Композиционный материал WCu представляет собой псевдосплав, структура которого обычно характеризуется отчетливыми частицами одного металла, диспергированными в матрице другого металла [1, 12, 13].

Еще одним из методов получения металлических покрытий с высокими значениями твердости, температуры плавления, химической стабильности, электрических и магнитных свойств является ионное облучение поверхностей с целью получения пленок нитрида металла [1, 14].

Получение покрытия с использованием перечисленных элементов возможно с применением концентрированных потоков энергии. Последние характеризуются кратковременным и локальным высокоэнергетическим воздействием на поверхность, которое позволяет повышать ее функциональные свойства и рационально напылять дорогие высокопроводящие материалы. К таким видам обработки относят лазерное напыление, электронные и ионные пучки, плазменные потоки и струи. Характерное пороговое значение поглощаемой плотности мощности, начиная с которого тепловой источник можно считать концентрированным, составляет 10^3 Вт/см^2 [1, 15-20]. Для достижения таких значений интенсивности обработку проводят в импульсном режиме. Время импульса обычно не превышает 1 с.

В последние 20 лет получил развитие новый метод электровзрывного напыления. Данный метод заключается в нанесении покрытий с применением импульсного плазменного ускорителя. В разрядной камере проводники размещаются на коаксиально-торцевых электродах для пропускания через них токов большой плотности. При их электрическом взрыве формируется поток плазмы, который локализуется на подложке, размещенной в технологической камере с остаточным давлением 100 Па. Данный метод позволяет формировать материалы с заранее заданными свойствами, а также применим для восстановления поверхности электрических контактов при износе, что целесообразно с позиций экономики и экологии. Электровзрывное напыление эффективно для получения наноструктурных электроэрозионностойких покрытий на медных контактах. Последующая электронно-пучковая обработка дополнительно повышает свойства таких покрытий [1, 21, 22].

Целью настоящего исследования было получение покрытия системы золото-вольфрам на медной подложке, изучение его физико-механических свойств, а также структурно фазового состава после воздействия электронного пучка и азотирования.

Материалы и методы исследования

Материалом исследования являлись образцы системы «покрытие (W-Au)/(медь) подложка», изготовленные методом электровзрывного напыления при электрическом взрыве фольги из золота массой (m_{Au}) 500 мг с расположенным на ней порошком вольфрама массой (m_W) 300 мг в первом режиме обработки, и $m_{Au} = 750 \text{ мг}$, $m_W = 450 \text{ мг}$ во втором режиме. Поглощаемая плотность мощности при этом составляла $5,5 \text{ ГВт/м}^2$. Использовали установку для электровзрывного напыления покрытий «EESM Romanov» (инновационная разработка 2023 г. лаборатории электровзрывного напыления высоконадежных покрытий Сибирского государственного промышленного университета, г. Новокузнецк). После чего комбинированную обработку образцов с покрытиями осуществляли на установке «КОМПЛЕКС».

Обработку поверхности системы «покрытие/подложка» проводили низкоэнергетичным импульсным электронным пучком при следующих параметрах: энергия ускоренных электронов 18 кэВ, плотность энергии пучка электронов 60 Дж/см^2 , длительность импульса пучка электронов 100 мкс, частота следования импульсов $0,3 \text{ с}^{-1}$, количество импульсов облучения 10. Азотирование проводили в плазме дугового разряда низкого давления с накалимым катодом (концентрация плазмы $10^{15}\text{-}10^{18} \text{ м}^{-3}$, а в объемах до нескольких м^3), который, обеспечивая генерацию потока газовой плазмы без микрокапель, позволяет осуществлять ионную очистку (травление) поверхности и разогревать обрабатываемую деталь до требуемой температуры. Температура азотирования составляла 520°C , длительность азотирования – 5 ч. Механические свойства образцов характеризовали твердостью и модулем Юнга. Исследования проводили методом Виккерса на приборе ТТХ-ННТ при максимальной нагрузке на индентор 50 мН и скорости нагрузки/разгрузки 100 мН/мин, пауза между нагрузкой и разгрузкой составляла 5 с, использовали алмазный наконечник Берковича.

Трибологические свойства характеризовали параметром износа и коэффициентом трения. Испытания проводили в условиях сухого трения по схеме диск-палец на трибометре Pin on Disc

and Oscillating TRIBOtester (TRIBOtechnic, Франция) при следующих параметрах: шарик из твердого сплава ВК8 диаметром 6 мм, радиус трека износа 2 мм, путь, пройденный контртелом, 100 м, скорость вращения образца 25 мм/с, нагрузка на индентор 5 Н, температура комнатная. Профиль канавки износа и ее параметры исследовали контактным нанопрофилометром. Анализ элементного и фазового состава, дефектной структуры осуществляли методами сканирующей (прибор MIRA 3 Tescan) и просвечивающей дифракционной (прибор JEM-2100F, JEOL) электронной микроскопии. Фазовый состав и состояние кристаллической решетки основных фаз поверхностного слоя образцов изучали методами рентгенофазового и рентгеноструктурного анализа (рентгеновский дифрактометр Shimadzu XRD 6000, Япония); съемку осуществляли в медном отфильтрованном излучении Cu-K α 1; монохроматор CM-3121. Анализ фазового состава проводили с использованием баз данных PDF 4+, а также программы полнопрофильного анализа POWDER CELL 2.4.

Полученные результаты и их обсуждение

Методами сканирующей электронной микроскопии проведены исследования структуры поперечных шлифов системы «покрытие (W-Au)/(медь) подложка». Анализируя результаты, представленные на **рис. 1**, можно отметить,

что толщина покрытия изменяется в пределах от 120 до 190 мкм (**рис. 1, а**).

Покрытие имеет неоднородное строение, которое характеризуется различным контрастом областей, формирующих покрытие (**рис. 1, б**). Судя по выявленному контрасту, можно предположить неоднородное распределение в покрытии атомов вольфрама, золота и меди. Данное предположение нашло подтверждение при микрорентгеноспектральном анализе системы «покрытие (W-Au)/(медь) подложка», осуществленном методом картирования (**рис. 2**).

Отчетливо видно, что основным элементом, формирующим покрытие, является золото. Области покрытия разнообразной формы и размеров сформированы вольфрамом, содержат атомы азота.

Методом микрорентгеноспектрального анализа «по точкам» (**рис. 3**) проведены количественные исследования элементного состава системы «покрытие (W-Au)/(медь) подложка» (**табл. 1 и 2**). Энергетические спектры, соответствующие точкам № 1 и 2 на **рис. 3, а**, демонстрирующие присутствие атомов меди, золота и вольфрама, представлены на **рис. 4**.

Результаты исследований, приведенные в **табл. 1 и 2**, подтверждают высказанное предположение о неоднородном распределении химических элементов в покрытии, а именно: во-первых, присутствие атомов азота только в покрытии и, во-вторых, факт присутствия атомов меди на всей толщине покрытия.

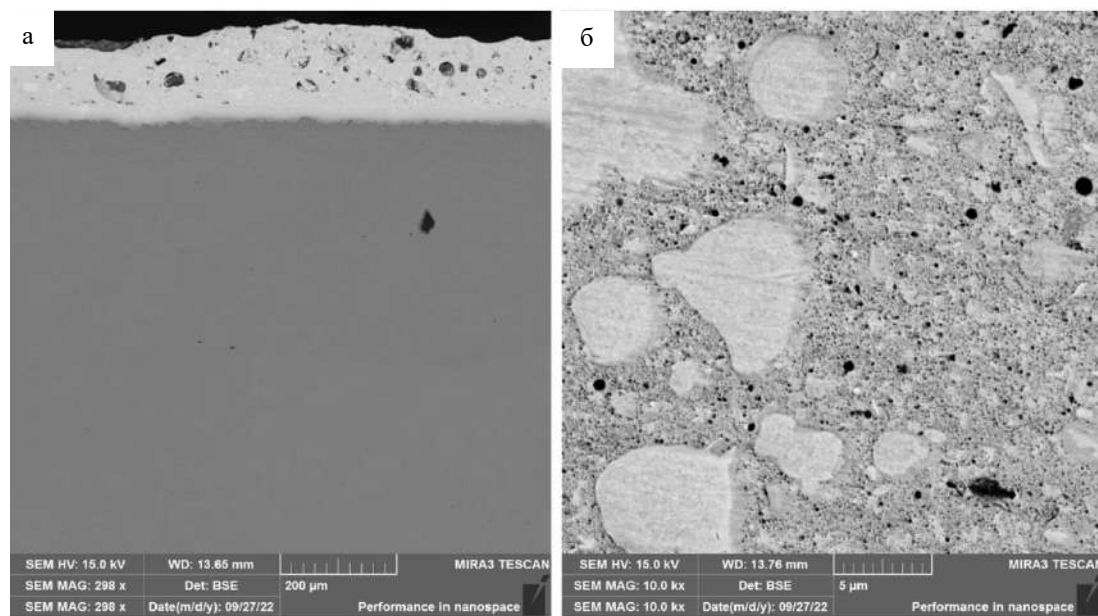


Рис. 1. Электронно-микроскопические изображения структуры шлифа системы «покрытие (W-Au)/(медь) подложка», подвергнутой комплексной обработке, сочетающей облучение импульсным электронным пучком и последующее азотирование

Fig. 1. Electron microscope images of the structure of the metallographic specimen of “the coating (W-Au)/(copper) substrate” after integrated treatment, combining pulsed electron beam irradiation and subsequent nitriding

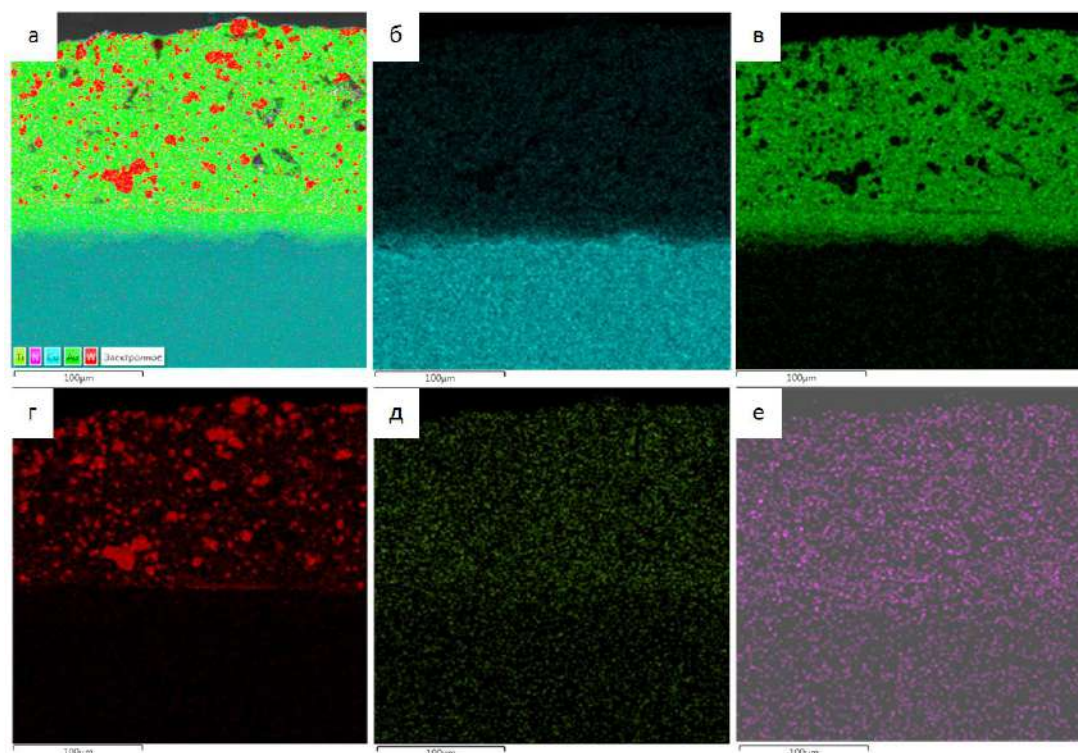


Рис. 2. Изображение системы «покрытие (W-Au)/(медь) подложка», полученное в характеристическом рентгеновском излучении химических элементов, формирующих данную систему: а – изображение, полученное путем наложения изображений (б-е) (многослойная карта ЭДА); б-е – изображения, полученные в характеристическом рентгеновском излучении атомов Cu (б), Au (в), W (г), Ti (д), N (е)

Fig. 2. The image of “the coating (W-Au)/(copper) substrate” obtained in the characteristic X-radiation of chemical elements, forming this system: а is an image obtained by overlaying images (б-е) (a multi-layer chart of the energy dispersion analysis); б-е are images obtained in the characteristic X-radiation of atoms of Cu (б), Au (в), W (г), Ti (д), N (е)

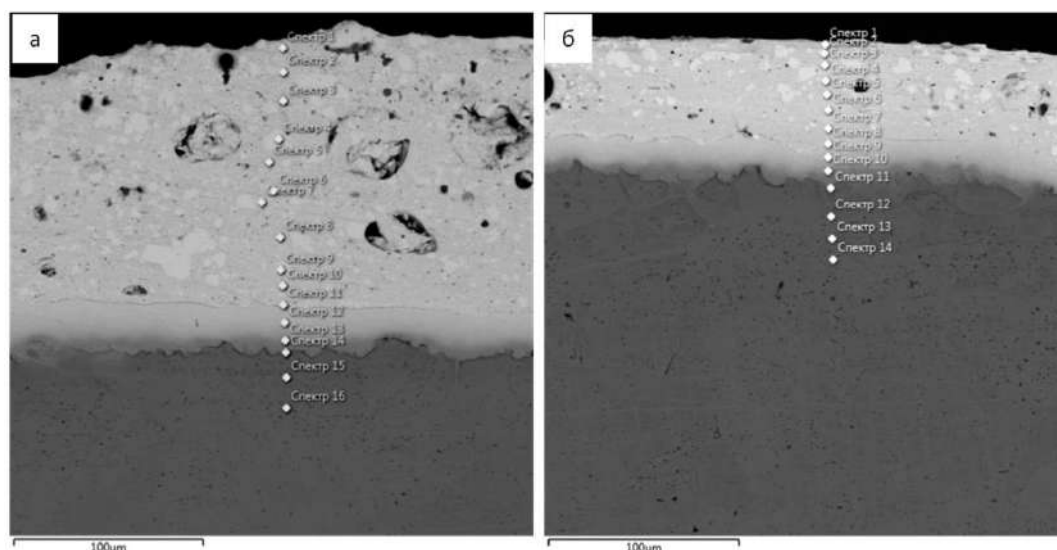


Рис. 3. Электронно-микроскопические изображения структуры участков поперечного сечения покрытия системы «покрытие (W-Au)/(медь) подложка»: а – $m_{Au} = 750$ мг, $m_W = 450$ мг; б – $m_{Au} = 500$ мг, $m_W = 300$ мг (Указаны области покрытия, в которых методами микрорентгеноспектрального анализа проведены исследования элементного состава материала)

Fig. 3. Electron microscope images of the structure of cross section areas of “the coating (W-Au)/(copper) substrate”: а is $m_{Au} = 750$ mg, $m_W = 450$ mg; б is $m_{Au} = 500$ mg, $m_W = 300$ mg (The areas of the coating, where the elemental composition of the material was studied by methods of the X-ray microanalysis)

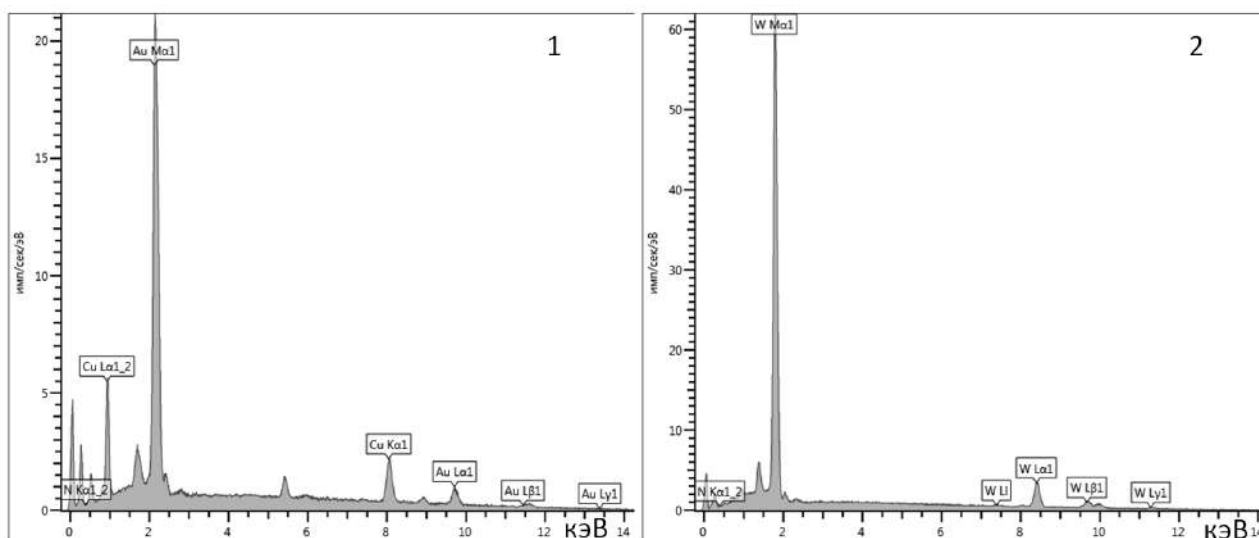


Рис. 4. Энергетические спектры, полученные с участков № 1 и 2 покрытия, электронно-микроскопическое изображение которого приведено на рис. 3, а

Fig. 4. Energy spectra of areas No. 1 and 2 of the coating, whose electron microscope image is given in Fig. 3, a

Таблица 1. Результаты количественного анализа элементного состава системы «покрытие (W-Au)/(медь) подложка», полученные методами микрорентгеноспектрального анализа «по точкам» соответственно рис. 3, а

Table 1. The quantitative analysis of the elemental composition of “the coating (W-Au)/(copper) substrate” obtained by methods of the X-ray microanalysis “by points” according to Fig. 3, a

Элемент	Номер спектра (соответствует рис. 3, а)															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
N	0,0	0,00	1,2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,5	0,00	0,9	0,0	0,5	0,8	0,0	0,0	0,0
Cu	1,7	5,8	8,4	1,3	1,4	13,7	1,5	19,0	1,0	21,1	4,0	30,6	63,0	97,5	100,0	100,0
W	97,0	67,5	38,6	97,4	97,4	4,1	97,3	10,3	97,6	6,0	78,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Au	1,3	26,7	51,8	1,3	1,2	82,2	1,2	70,2	1,4	72	17,9	68,9	36,2	2,5	0,0	0,0

Таблица 2. Результаты количественного анализа элементного состава системы «покрытие (W-Au)/(медь) подложка», полученные методами микрорентгеноспектрального анализа «по точкам» соответственно рис. 3, б

Table 2. The quantitative analysis of the elemental composition of “the coating (W-Au)/(copper) substrate” obtained by methods of the X-ray microanalysis “by points” according to Fig. 3, б

Элемент	Номер спектра (соответствует рис. 3, б)													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
N	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Cu	18,2	0,0	10,0	16,8	22,9	24,5	26,5	30,9	35,7	60,3	92,1	100,0	100,0	100,0
W	0,0	100,0	19,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Au	81,8	0,0	70,3	83,2	77,1	75,5	73,5	69,1	64,3	39,7	7,9	0,0	0,0	0,0

Электровзрывной метод создания покрытия сопровождается формированием контактного слоя между покрытием и подложкой (рис. 5). Методом картирования (рис. 6) установлено, что переходный слой обогащен атомами золота (верхняя часть слоя) и атомами меди (нижняя часть слоя).

Атомы вольфрама формируют прослойку, расположенную вдоль границы контакта переходного слоя и основного объема покрытия; в переходном слое атомы вольфрама не наблюдаются.

Зона контакта покрытия и подложки характеризуется формированием структуры, демонстрирующей проникновение атомов золота в объем подложки (рис. 7). Отчетливо видно образование в приграничном слое мелкозернистой 10-20 мкм структуры на основе меди, вдоль границ которой располагаются протяженные прослойки, обогащенные атомами золота. Это свидетельствует о сплавлении покрытия и подложки, то есть о высокой адгезии на уровне когезии.

Фазовый состав покрытия изучали методами

рентгенофазового анализа (рис. 8). Результаты анализа фазового состава покрытия приведены в табл. 3.

Полученные результаты свидетельствуют о многофазности формируемого покрытия. При этом методами рентгенофазового анализа выявлены лишь вольфрам и фазы на основе соединения меди и золота. Нитридные фазы методами рентгенофазового анализа не обнаружены, что может указывать как на малое количество данных фаз, так и на малые (наномасштаб) размеры частиц.

Состояние дефектной субструктуры, элементный состав и морфологию формирующихся фаз анализировали методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии. Элементный анализ участков фольги проводили методами микрорентгеноспектрального анализа. На рис. 9 приведен один из вариантов такого анализа, свидетельствующий о существенно неоднородном распределении элементов покрытия.

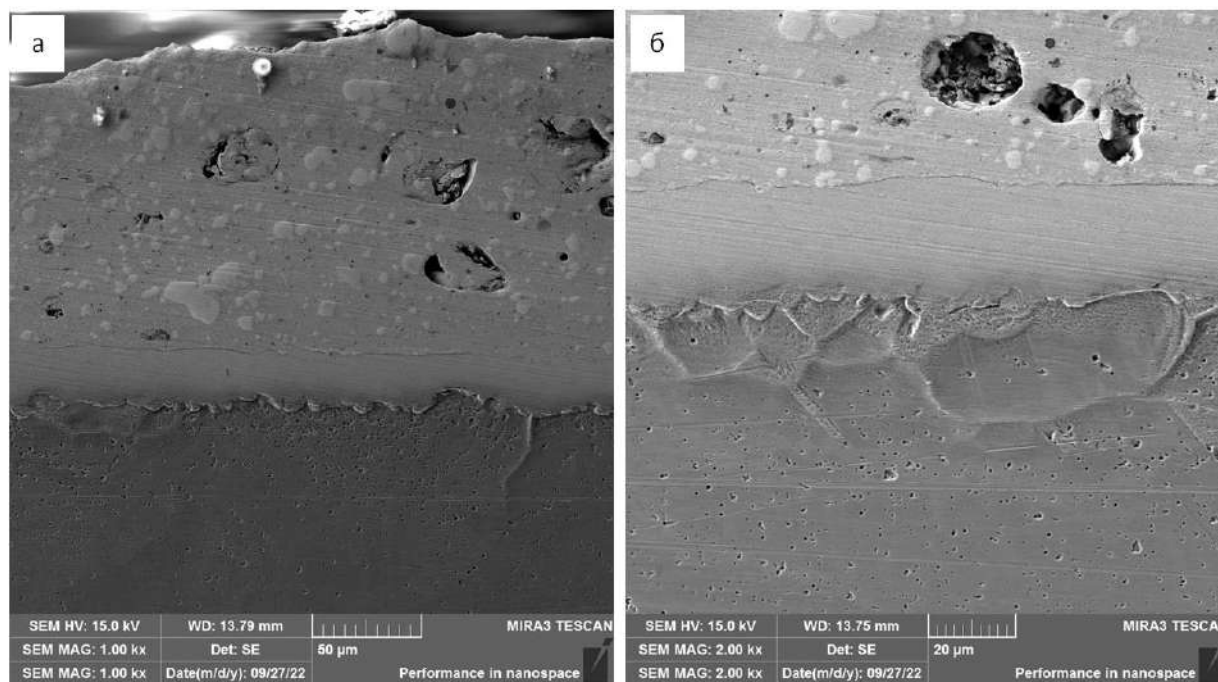


Рис. 5. Электронно-микроскопические изображения структуры переходного слоя системы «покрытие (W-Au)/(медь) подложка», подвергнутой комплексной обработке, сочетающей электровзрывное напыление, облучение импульсным электронным пучком и последующее азотирование: а – при увеличении $\times 1000$; б – при увеличении $\times 2000$

Fig. 5. Electron microscope images of the structure of the transition layer of “the coating (W-Au)/(copper) substrate” after integrated treatment, combining electro-explosive spraying, pulsed electron beam irradiation and subsequent nitriding; a is at 1000x magnification; b is at 2000x magnification

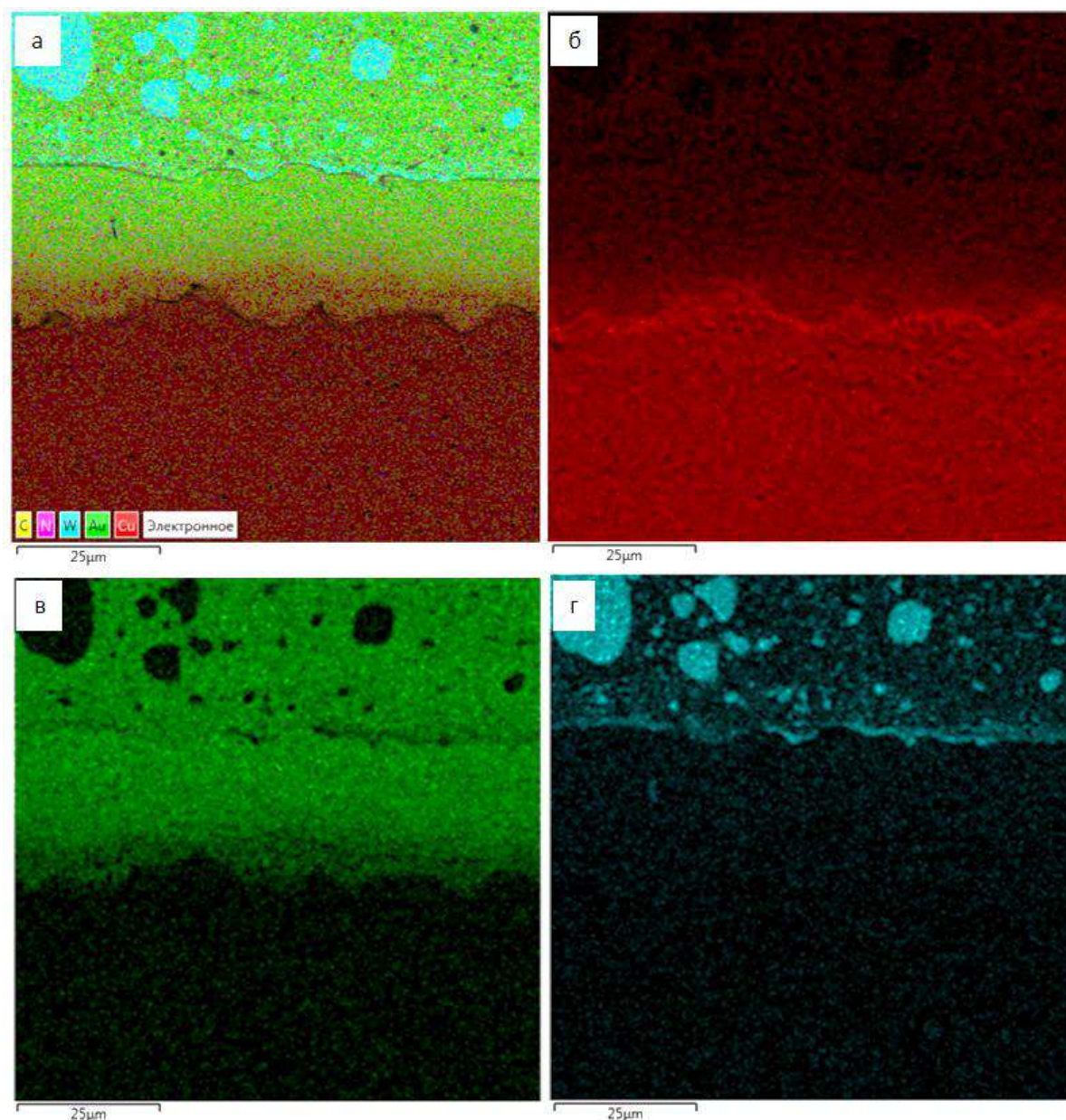


Рис. 6. Изображение системы «покрытие (W-Au)/(медь) подложка», полученное в характеристическом рентгеновском излучении химических элементов, формирующих данную систему: а – изображение, полученное путем наложения изображений (б-г) (многослойная карта ЭДА); б-г – изображения, полученные в характеристическом рентгеновском излучении атомов Cu (б), Au (в), W (г)

Fig. 6. The image of “the coating (W-Au)/(copper) substrate” obtained in the characteristic X-radiation of chemical elements, forming this system: а is an image obtained by overlaying images (б-г) (a multi-layer chart of the energy dispersion analysis); б- г are images obtained in the characteristic X-radiation of atoms of Cu (б), Au (в), W (г)

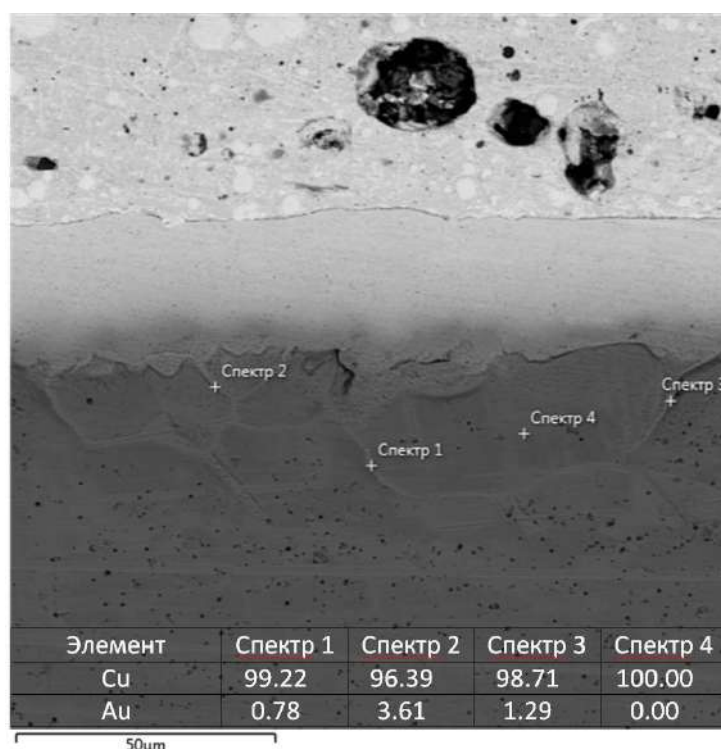


Рис. 7. Электронно-микроскопическое изображение структуры переходной зоны, формирующейся в системе «покрытие (W-Au)/(медь) подложка», подвергнутой облучению импульсным электронным пучком и последующему азотированию

Fig. 7. An electron microscope image of the structure of the transition layer, forming in “the coating (W-Au)/(copper) substrate” after pulsed electron beam irradiation and subsequent nitriding

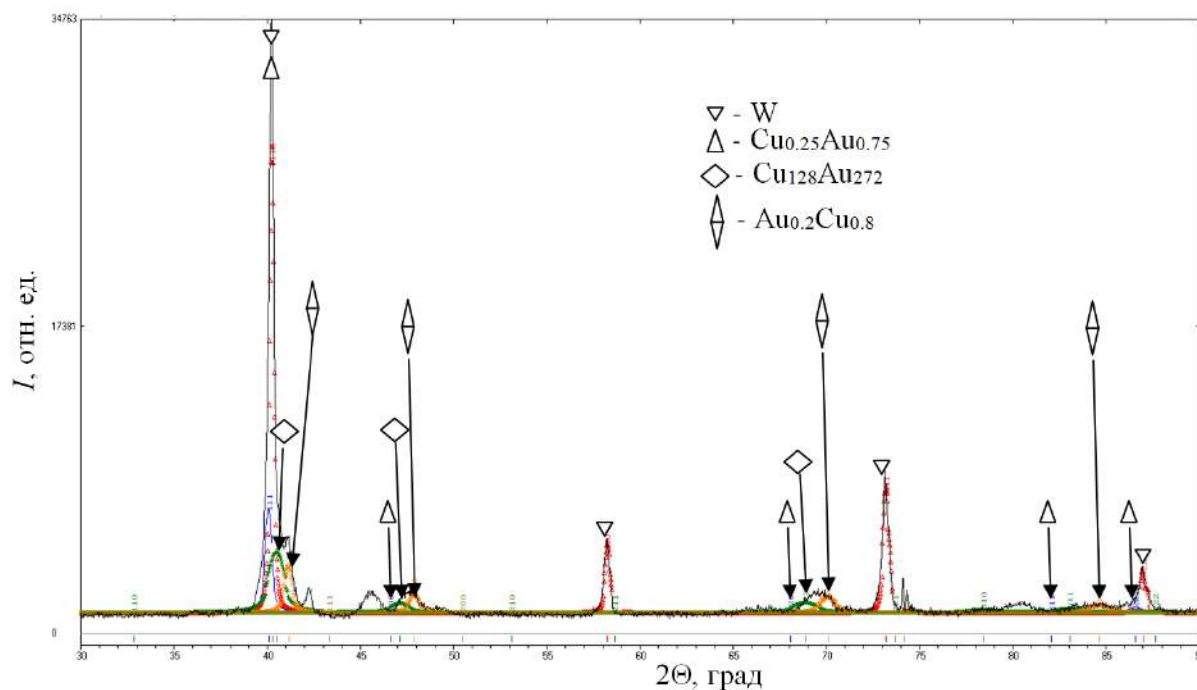


Рис. 8. Фрагмент рентгенограммы, полученной с системы «покрытие (W-Au)/(медь) подложка», облученной импульсным электронным пучком и подвергнутой последующему азотированию

Fig. 8. A fragment of the X-ray diffraction pattern of “the coating (W-Au)/(copper) substrate” after pulsed electron beam irradiation and subsequent nitriding

Таблица 3. Результаты исследования фазового состава и структурных параметров образца системы «покрытие (W-Au)/(медь) подложка», облученной импульсным электронным пучком и подвергнутой последующему азотированию

Table 3. A phase composition and structural parameters of the specimen of the coating (W-Au)/(copper) substrate” after pulsed electron beam irradiation and subsequent nitriding

Образец	Обнаруженные фазы	Содержание фаз, мас. %	Параметры решетки, Å	Размер ОКР, нм	$\Delta d/d, 10^{-3}$
Система «(W-Au)/(медь)/ подложка» после облучения электронным пучком и азотирования	Cu	0,01	$a = 3,6131$	—	—
	W	20,26	$a = 3,1650$	72,06	0,192
	$\text{Cu}_{0,25}\text{Au}_{0,75}$	13,9	$a = 3,8921$	117,28	3,988
	$\text{Cu}_{128}\text{Au}_{272}$	56,02	$a = 3,8528$	17,87	7,088
	$\text{Au}_{0,2}\text{Cu}_{0,8}$	9,81	$a = 3,7952$	326,99	5,348

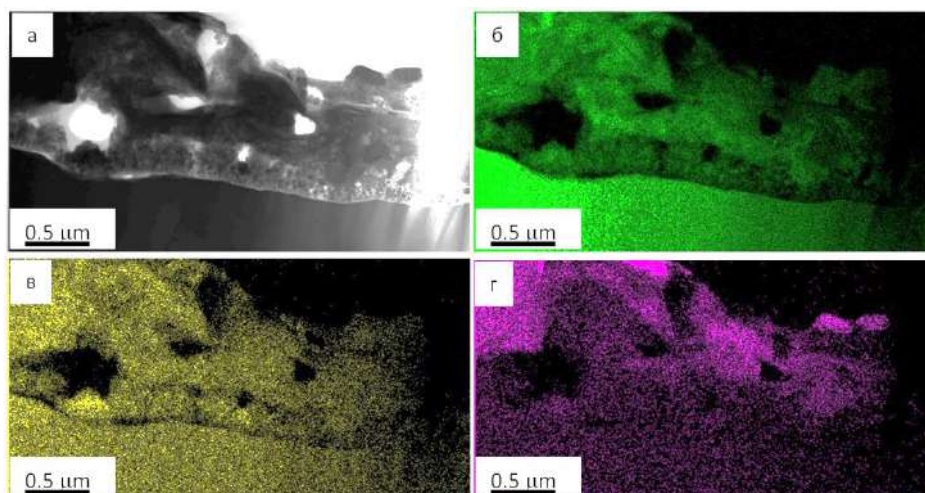


Рис. 9. Электронно-микроскопические изображения структуры покрытия (а), структуры участка фольги, представленного на (а), (б-г) полученное в характеристическом рентгеновском излучении атомов: Cu (б), Au (в), W (г)

Fig. 9. Electron microscope images of the structure of the coating (a), the structure of a part of foil given in (a), (b-g) obtained in the characteristic X-radiation of atoms of Cu (б), Au (в), W (г)

Фазовый состав покрытия исследовали, осуществляя анализ микроэлектронограмм и соответствующих темнопольных изображений. Примеры такого анализа приведены на рис. 10-12. Полученные результаты свидетельствуют о том, что покрытие является многофазным материалом, при этом фазовый состав покрытия зависит от места его анализа. Представленные на рис. 10 электронно-микроскопические изображения структуры покрытия свидетельствуют о наличии зерен сплава CuAu_3 размерами 60-180 нм (рис. 10, г), частиц вольфрама размерами 20-30 нм (рис. 10, д) и частиц Cu_3Au_2 размерами 30-50 нм (рис. 10, е). На рис. 10, в стрелками 1, 2, 3 указаны рефлекссы, в которых получены темнопольные изображения, представленные на рис. 10, г-е соответственно.

Представленные на рис. 11 электронно-микроскопические изображения структуры системы «покрытие (W-Au)/(медь) подложка», облученной импульсным электронным пучком и подвергнутой последующему азотированию, свидетельствуют о наличии зерен меди размерами 70-100 нм (рис. 11, г, д) и частиц Cu_3N размерами 7-15 нм (рис. 11, д). На рис. 11, б стрелки 1, 2 обозначают рефлекссы, в которых получены темнопольные изображения (рис. 11, г, д соответственно).

Представленные на рис. 12 электронно-микроскопические изображения структуры покрытия демонстрируют формирование в покрытии частиц нитридов вольфрама размерами 10-20 нм.

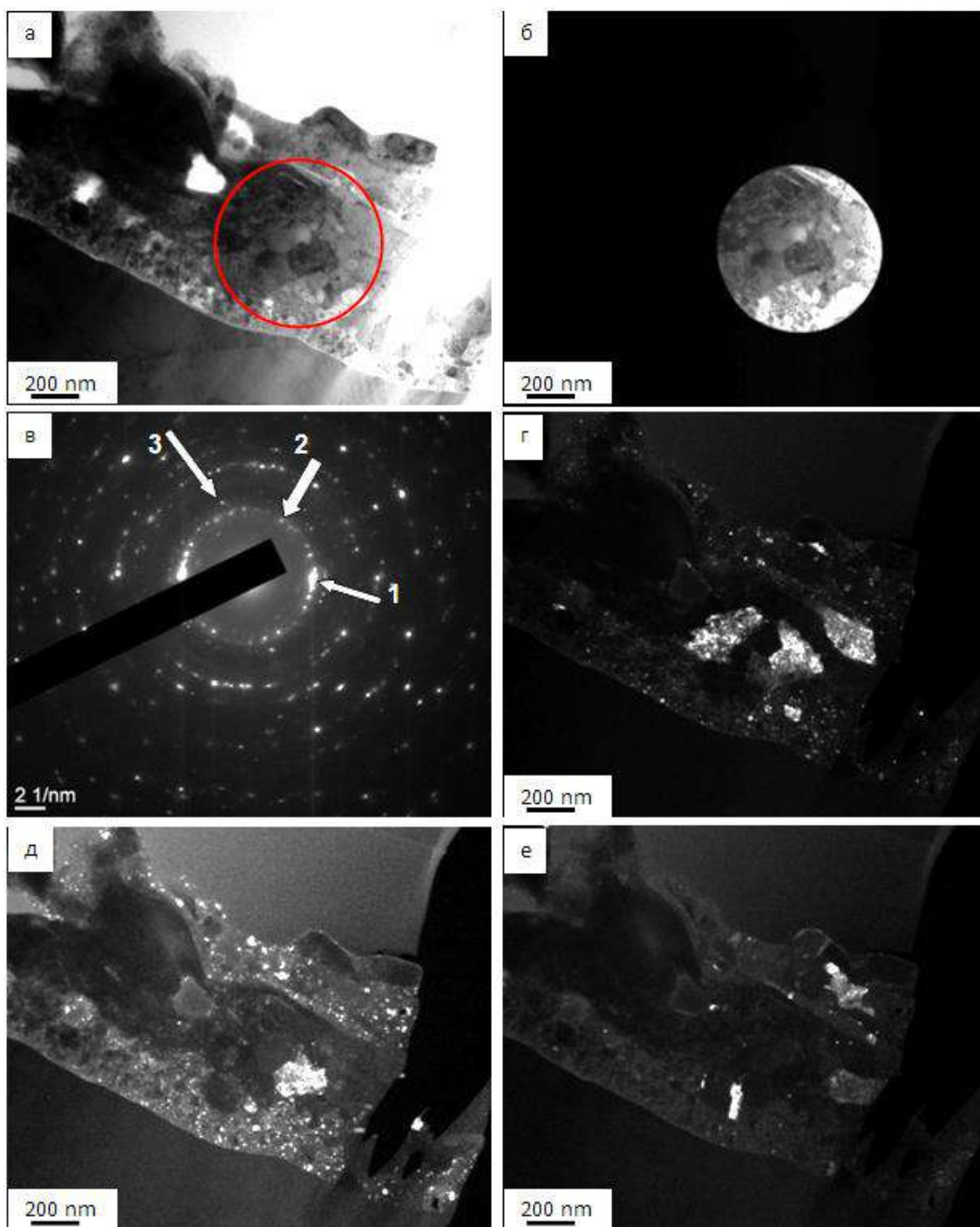


Рис. 10. Электронно-микроскопические изображения структуры представленной системы: а, б – светлопольные изображения; в – микроэлектронограмма; г-е – темнопольные изображения, полученные в рефlekсах $[111]\text{AuCu}_3$ (г); $[111]\text{CuAu}_3 + [110]\text{W}$ (д); $[0201]\text{Cu}_3\text{Au}_2$ (е). На (а) окружностью указана область фольги, с которой получена микроэлектронограмма (в)

Fig. 10. Electron microscope images of the structure of the presented system: а, б are bright field images; в is a micro-electron diffraction pattern; г-е are dark field images in reflections $[111]\text{AuCu}_3$ (г); $[111]\text{CuAu}_3 + [110]\text{W}$ (д); $[0201]\text{Cu}_3\text{Au}_2$ (е). In (а) the circle indicates an area of foil obtained in the electron diffraction pattern (в)

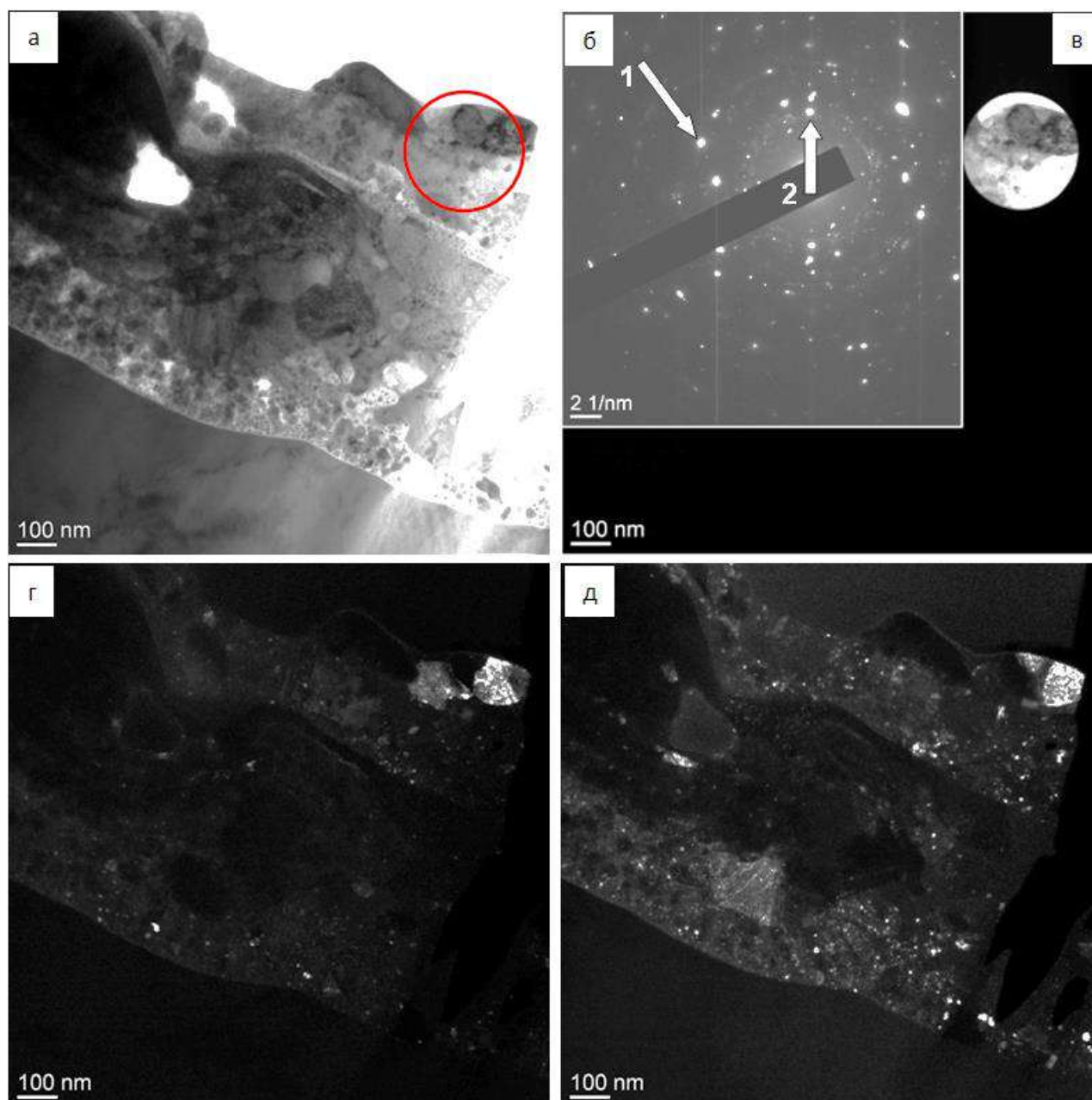


Рис. 11. Электронно-микроскопические изображения структуры обрабатываемых образцов:
а, в – светлопольные изображения; б – микроэлектроннограмма; г, д – темнопольные изображения,
полученные в рефлексах $[220]\text{Cu}$ (г) и $[111]\text{Cu} + [111]\text{Cu}_3\text{N}$ (д)

Fig. 11. Electron microscope images of the structure of the treated specimens: а, в are bright field images;
б is a micro-electron diffraction pattern; г, д are dark field images in reflections $[220]\text{Cu}$ (г)
и $[111]\text{Cu} + [111]\text{Cu}_3\text{N}$ (д)

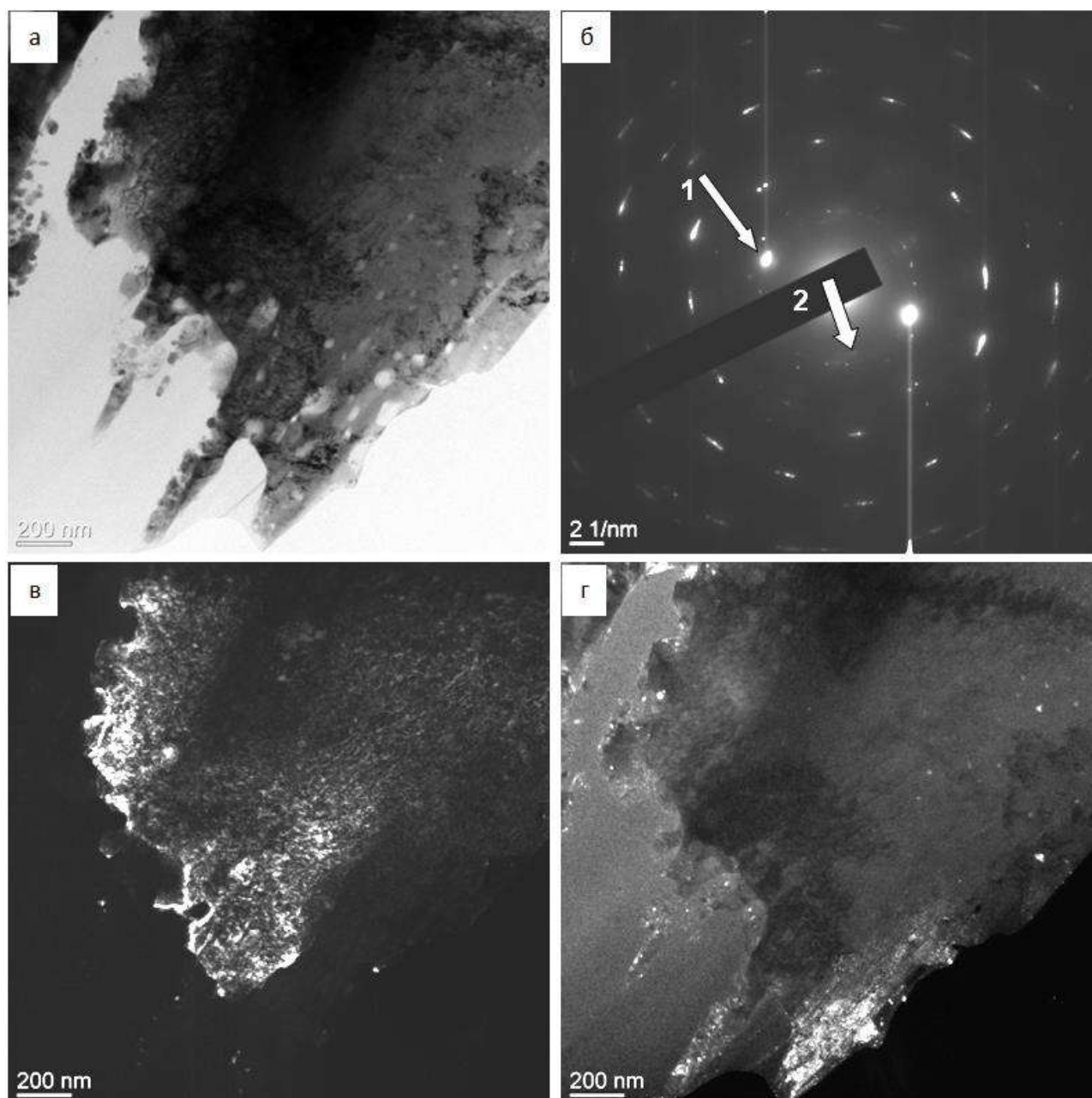


Рис. 12. Электронно-микроскопические изображения структуры рассматриваемой системы: а – светлпольное изображение; б – микроэлектроннограмма; в, г – темнопольные изображения, полученные в рефlekсах $[111]\text{Cu}$ (в), $[111]\text{W}_2\text{N}$ (г)

Fig. 12. Electron microscope images of the structure of the system under study: a is a bright field image; б is a micro-electron diffraction pattern; в, г are dark field images in reflections $[111]\text{Cu}$ (в), $[111]\text{W}_2\text{N}$ (г)

Механические свойства системы «покрытие (W-Au)/(медь) подложка», облученной импульсным электронным пучком и подвергнутой последующему азотированию, характеризовали твердостью и модулем Юнга. Результаты исследований, приведенные на **рис. 13**, показывают, что среднее значение микротвердости изменяется в пределах от 1,1 до 1,29 ГПа и снижается по мере удаления от поверхности покрытия (**рис. 13, кривая 1**). Модуль Юнга изменяется подобным образом, снижаясь при удалении от поверхности к границе контакта покрытия и подложки (**рис. 13, кривая 2**).

Трибологические свойства системы «покрытие (W-Au)/(медь) подложка», облученной импульсным электронным пучком и подвергнутой последующему азотированию, характеризовали параметром износа и коэффициентом трения. Установлено, что параметр износа покрытия составляет $1,3 \cdot 10^{-6}$ мм³/Н·м, что более чем в 56 раз меньше параметра износа меди. Коэффициент трения покрытия составляет 0,3, что равно коэффициенту трения подложки. На **рис. 12, б** стрелками 1, 2 указаны рефлексы, в которых получены темные поля (**рис. 12, в, г** соответственно).

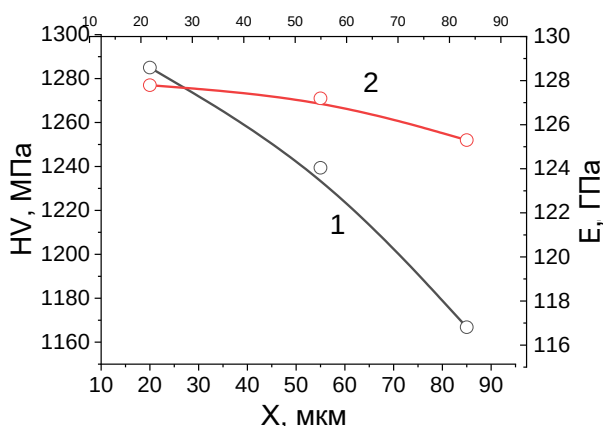


Рис. 13. Зависимости твердости (кривая 1) и модуля Юнга (кривая 2) от расстояния от поверхности покрытия

Fig. 13. Dependencies between hardness (curve 1) and Young's modulus (curve 2) and the distance from the coating surface

Закключение

На установке «EESM Romanov» осуществлено электровзрывное напыление покрытий системы W-Au на медную подложку. Осуществлена на установке «КОМПЛЕКС» в едином вакуумном пространстве комбинированная обработка образцов системы «покрытие (W-Au)/(медь) подложка», сочетающая облучение низкоэнергетичным им-

пульсным электронным пучком (18 кэВ, 60 Дж/см², 100 мкс, $0,3 \text{ с}^{-1}$, 10 имп., 0,02 Па) и последующее азотирование в плазме дугового разряда низкого давления с накаливаемым катодом (520°C, 5 ч). Показано, что толщина покрытия системы W-Au изменяется в пределах от 120 до 190 мкм. На границе контакта покрытия и подложки выявлено формирование переходной зоны, обогащенной атомами золота. Показано, что атомы золота проникают в подложку, формируя протяженные прослойки вдоль границ зерен меди, свидетельствующие о сплавлении покрытия и подложки, то есть о высокой адгезии на уровне когезии.

Методами микрорентгеноспектрального анализа выявлены островки вольфрама в слое золота, что свидетельствует о неоднородном элементном составе покрытия. Обнаружено легирование покрытия атомами меди (подложка) и отсутствие легирования подложки атомами вольфрама. Методами рентгенофазового анализа выявлен многофазный состав покрытия (W, Cu₁₂₈Au₂₇₂, Au_{0,2}Cu_{0,8}, Cu_{0,25}Au_{0,75}).

Методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии дополнительно обнаружено формирование в покрытии частиц нитридов меди и нитридов вольфрама, размеры которых изменяются в пределах 7-20 нм. Установлено, что среднее значение микротвердости изменяется в пределах от 1,1 до 1,29 ГПа и снижается по мере удаления от поверхности покрытия. Модуль Юнга изменяется подобным образом и снижается при удалении от поверхности к границе контакта покрытия и подложки. Показано, что параметр износа покрытия составляет $1,3 \cdot 10^{-6}$ мм³/Н·м, что более чем в 56 раз меньше параметра износа меди. Коэффициент трения покрытия 0,3, что соответствует коэффициенту трения подложки. Можно предположить, что высокие трибологические свойства формируемого покрытия обусловлены наличием наноразмерных частиц нитридных фаз.

Список источников

1. Формирование структуры и свойств электровзрывных электроэрозионноустойчивых покрытий на медных контактах переключателей мощных электрических сетей: монография / В.В. Почетуха, Д.А. Романов, В.Е. Громов, А.Д. Филяков. Новокузнецк: ООО Полиграфист, 2023. 257 с.
2. Анализ физических процессов износа электрических контактов коммутационных низковольтных аппаратов / А.А. Григорьев, М.А. Ваткина // Вестник ЧГПУ им. И.Я. Яковлева. 2014. №2 (82). С. 3-13.
3. Mattia Scardamaglia, Virginia Boix, Giulio D'Acunto, Claudia Struzzi, Nicolas Reckinger, Xin Chen, Abhay

- Shivayogimath, Tim Booth, Jan Knudsen Comparative study of copper oxidation protection with graphene and hexagonal boron nitride. *Carbon*. 2021, vol. 171, pp. 610-617.
4. Dong-Woon Han, Ho-Kyung Kim. Effect of normal forces on fretting corrosion of tin-coated electrical contact // *Microelectronics Reliability*. 2017, vol. 79, pp. 321-327.
5. Longlong Dong, Wenge Chen, Chenghao Zheng, Nan Deng. Microstructure and properties characterization of tungsten-copper composite materials doped with graphene // *Journal of Alloys and Compounds*. 2017, vol. 695, pp. 1637-1646.
6. Zaher G., Sauvage X., Jouen S. Influence of crystal-line defects on nitrogen implantation in copper for surface hardening // *Scripta Materialia*. 2023, vol. 231, pp. 115440.
7. Dhuley R.C. Pressed copper and gold-plated copper contacts at low temperatures – A review of thermal contact resistance // *Cryogenics*. 2019, vol. 101, pp. 111-124.
8. Wanbin Ren, Peng Wang, Jian Song, Guofu Zhai Effects of current load on wear and fretting corrosion of gold-plated electrical contacts // *Tribology International*. 2014, vol. 70, pp. 75-82.
9. Dao-Yi Wu, Xue Zhou, Li-Ping Li, Guo-Fu Zhai. Microstructure, mechanical properties and tribological behaviors of gold coating determined by surface quality // *Surface and Coatings Technology*. 2023, vol. 462, pp. 128286.
10. Wanbin Ren, Peng Wang, Yinghua Fu, Cunfa Pan, Jian Song. Effects of temperature on fretting corrosion behaviors of gold-plated copper alloy electrical contacts // *Tribology International*. 2015, vol. 83, pp. 1-11.
11. Rachel L. Starr, Tianren Fu, Evan A. Doud, Ilana Stone, Xavier Roy and Latha Venkataraman. Starr Gold-Carbon Contacts from Oxidative Addition of Aryl Iodides // *Journal of the American Chemical Society*. 2020, vol. 142(15), pp. 7128-7133.
12. Tielong Han, Chao Hou, Zhi Zhao, Xintao Huang, Fawei Tang, Yurong Li, Xiaoyan Song. W-Cu composites with excellent comprehensive properties. *Composites Part B: Engineering*. 2022, vol. 233, pp. 109664.
13. Zhi Zhao, Fawei Tang, Chao Hou, Xintao Huang, Xiaoyan Song. Uncover the mystery of interfacial interactions in immiscible composites by spectroscopic microscopy: A case study with W-Cu // *Journal of Materials Science & Technology*. 2022, vol. 126, pp. 106-115.
14. Šiller L., Hunt M.R.C., Brown J.W., Coquel J-M., Rudolf P. Nitrogen ion irradiation of Au (110): formation of gold nitride // *Surface Science*. 2002, vol. 513, pp. 78-82.
15. Pengbo Zhao, Jinpeng Zhu, Kaijun Yang, Mingliang Li, Gang Shao, Hongxia Lu, Zhuang Ma, Hailong Wang, Jilin He. Outstanding wear resistance of plasma sprayed high-entropy monoboride composite coating by inducing phase structural cooperative mechanism // *Applied Surface Science*. 2023, vol. 616, pp. 156516.
16. Yuankai Li, Chaoquan Hu, Yao Wu, Zhenan Qiao, Yifan Cheng, Zhiqing Gu, Gang Gao, Weitao Zheng. Designing hard wear-resistant conductors by introducing high-plasma-energy heterogeneous metals into transition metal nitrides // *Journal of Materials Science & Technology Available*. 2023, pp. 213-219.
17. Xi Zou, Tengfei Chang, Zhou Yan, Zi Song Zhao, Yang Pan, Wenyang Liu, Lijun Song. Control of thermal strain and residual stress in pulsed-wave direct laser deposition // *Optics & Laser Technology*. 2023, vol. 163, pp. 109386.
18. Suzana Jakovljević, Darko Landek Special Issue: Tribological Coatings-Properties, Mechanisms, and Applications in Surface Engineering // *Journals Coatings*. 2023, vol. 2, pp. 13020451.
19. Hangyu Li, Xianhui Wang, Yuan Fei, Hang Zhang, Jituo Liu, Zhen Li, Yanru Qiu Effect of electric load characteristics on the arc erosion behavior of Ag8wt.%Ni electrical contact material prepared by spark plasma sintering. *Sensors and Actuators, A: Physical*. 2021, vol. 326, pp. 112718.
20. Chudina O.V., Eletskii A.V., Terent'ev E.V., Bocharov G.S. Steel Surface Modification with Carbon Nanomaterial Using Concentrated Energy Flows // *Metal Science and Heat Treatment*. 2018, vol. 17, pp. 367-372.
21. Romanov D.A., Pochetukha V.V., Sosnin K.V., Moskovskii S.V. Increase in properties of copper electrical contacts in formation of composite coatings based on Ni-C-Ag-N system // *Journal of Materials Research and Technology*. 2022, vol. 19, pp. 947-966.
22. Romanov D.A. Improving die tooling properties by spraying TiC-Ti-Al and TiB₂-Ti-Al explosive coatings // *Materials Research Express*. 2020, vol. 7(4), pp. 045010.

References

1. Pochetukha V.V., Romanov D.A., Gromov V.E., Fil'yakov A.D. Formirovanie struktury i svoystv elektrovzryvnykh elektroerozionnostoykikh pokrytiy na mednykh kontaktakh pereklyuchateley moshchnykh elektricheskikh setey: monografiya [Formation of the structure and properties of electro-explosive electroerosion-resistant coatings on copper contacts of switches of high-power electrical networks: monograph]. Novokuznetsk: LLC Poligrafist, 2023, 257 p. (In Russ.)
2. Grigoriev A.A., Vatkina M.A. Analysis of physical processes of wear of electrical contacts of switching low-voltage devices. *Vestnik ChGPU im. I.Ya. Yakovleva* [Yakovlev Chuvash State Pedagogical University Bulletin]. 2014;(2(82)):3-13. (In Russ.)
3. Mattia Scardamaglia, Virginia Boix, Giulio D'Acunto, Claudia Struzzi, Nicolas Reckinger, Xin Chen, Abhay Shivayogimath, Tim Booth, Jan Knudsen. Comparative study of copper oxidation protection with graphene and hexagonal boron nitride. *Carbon*. 2021;171:610-617.
4. Dong-Woon Han, Ho-Kyung Kim. Effect of normal forces on fretting corrosion of tin-coated electrical contact. *Microelectronics Reliability*. 2017;79:321-327.
5. Longlong Dong, Wenge Chen, Chenghao Zheng, Nan Deng. Microstructure and properties characterization

- of tungsten-copper composite materials doped with graphene. *Journal of Alloys and Compounds*. 2017;695:1637-1646.
6. Zaher G., Sauvage X., Jouen S. Influence of crystalline defects on nitrogen implantation in copper for surface hardening. *Scripta Materialia*. 2023;231:115440.
7. Dhuley R.C. Pressed copper and gold-plated copper contacts at low temperatures – A review of thermal contact resistance. *Cryogenics*. 2019;101:111-124.
8. Wanbin Ren, Peng Wang, Jian Song, Guofu Zhai. Effects of current load on wear and fretting corrosion of gold-plated electrical contacts. *Tribology International*. 2014;70:75-82.
9. Dao-Yi Wu, Xue Zhou, Li-Ping Li, Guo-Fu Zhai. Microstructure, mechanical properties and tribological behaviors of gold coating determined by surface quality. *Surface and Coatings Technology*. 2023;462:128286.
10. Wanbin Ren, Peng Wang, Yinghua Fu, Cunfa Pan, Jian Song. Effects of temperature on fretting corrosion behaviors of gold-plated copper alloy electrical contacts. *Tribology International*. 2015;83:1-11.
11. Rachel L. Starr, Tianren Fu, Evan A. Doud, Ilana Stone, Xavier Roy, Latha Venkataraman. Gold-carbon contacts from oxidative addition of aryl iodides. *Journal of the American Chemical Society*. 2020;142(15):7128-7133.
12. Tielong Han, Chao Hou, Zhi Zhao, Xintao Huang, Fawei Tang, Yurong Li, Xiaoyan Song. W-Cu composites with excellent comprehensive properties. *Composites Part B: Engineering*. 2022;233:109664.
13. Zhi Zhao, Fawei Tang, Chao Hou, Xintao Huang, Xiaoyan Song. Uncover the mystery of interfacial interactions in immiscible composites by spectroscopic microscopy: A case study with W-Cu. *Journal of Materials Science & Technology*. 2022;126:106-115.
14. Šiller L., Hunt M.R.C., Brown J.W., Coquel J.-M., Rudolf P. Nitrogen ion irradiation of Au (110): formation of gold nitride. *Surface Science*. 2002;513:78-82.
15. Pengbo Zhao, Jinpeng Zhu, Kaijun Yang, Mingliang Li, Gang Shao, Hongxia Lu, Zhuang Ma, Hailong Wang, Jilin He. Outstanding wear resistance of plasma sprayed high-entropy monoboride composite coating by inducing phase structural cooperative mechanism. *Applied Surface Science*. 2023;616:156516.
16. Yuankai Li, Chaoquan Hu, Yao Wu, Zhenan Qiao, Yifan Cheng, Zhiqing Gu, Gang Gao, Weitao Zheng. Designing hard wear-resistant conductors by introducing high-plasma-energy heterogeneous metals into transition metal nitrides. *Journal of Materials Science & Technology Available*. 2023;213-219.
17. Xi Zou, Tengfei Chang, Zhou Yan, Zi Song Zhao, Yang Pan, Wenyang Liu, Lijun Song. Control of thermal strain and residual stress in pulsed-wave direct laser deposition. *Optics & Laser Technology*. 2023;163:109386.
18. Suzana Jakovljević, Darko Landek. Special issue: tribological coatings – properties, mechanisms, and applications in surface engineering. *Journals Coatings*. 2023;2:13020451.
19. Hangyu Li, Xianhui Wang, Yuan Fei, Hang Zhang, Jituo Liu, Zhen Li, Yanru Qiu. Effect of electric load characteristics on the arc erosion behavior of Ag8wt.%Ni electrical contact material prepared by spark plasma sintering. *Sensors and Actuators, A: Physical*. 2021;326:112718.
20. Chudina O.V., Eletsii A.V., Terentev E.V., Bocharov G.S. Steel surface modification with carbon nanomaterial using concentrated energy flows. *Metal Science and Heat Treatment*. 2018;17:367-372.
21. Romanov D.A., Pochetukha V.V., Sosnin K.V., Moskovskii S.V. Increase in properties of copper electrical contacts in formation of composite coatings based on Ni-C-Ag-N system. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022;19:947-966.
22. Romanov D.A. Improving die tooling properties by spraying TiC-Ti-Al and TiB₂-Ti-Al electro-explosive coatings. *Materials Research Express*. 2020;7(4):045010.

Поступила 21.04.2023; принята к публикации 07.05.2023; опубликована 27.06.2023
Submitted 21/04/2023; revised 07/05/2023; published 27/06/2023

Почету́ха Васи́лий Вита́льевич – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры транспорта и логистики, Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия. Email: v.pochetuha@mail.ru.

Романов Денис Анатольевич – доктор технических наук, старший научный сотрудник лаборатории электронной микроскопии и обработки изображений, Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия. Email: romanov_da@physics.sibsiu.ru. ORCID 0000-0002-6880-2849

Вашу́к Екате́рина Степа́новна – кандидат технических наук, доцент кафедры естественнонаучных дисциплин, Филиал Кузбасского государственного технического университета им. Т.Ф. Горбачева в г. Прокопьевске. Email: vaschuk@bk.ru. ORCID 0000-0002-1345-7419

Филя́ков А́ртем Дми́триевич – аспирант кафедры естественнонаучных дисциплин, Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия. Email: filyakov.1999@mail.ru. ORCID 0000-0002-8168-8809

Иванов Ю́рий Фе́дорович – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории плазменной эмиссионной электроники, Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, Россия. Email: yufi55@mail.ru. ORCID 0000-0001-8022-7958

Гостевская Анастасия Николаевна – аспирантка кафедры естественнонаучных дисциплин, Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия.
Email: lokon1296@mail.ru. ORCID 0000-0002-7328-5444

Vasily V. Pochetukha – PhD (Eng.), Senior Lecturer of the Department of Transport and Logistics, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia. Email: v.pochetuha@mail.ru.

Denis A. Romanov – DrSc (Eng.), Senior Researcher of the Electron Microscopy and Image Processing Laboratory, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia.
Email: romanov_da@physics.sibsiu.ru. ORCID 0000-0002-6880-2849

Ekaterina S. Vashchuk – PhD (Eng.), Associate Professor of the Department of Natural Sciences, Branch of Gorbachev Kuzbass State Technical University, Prokopyevsk, Russia.
Email: vashchuk@bk.ru. ORCID 0000-0002-1345-7419

Artem D. Filyakov – postgraduate student of the Department of Natural Sciences, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia. Email: filyakov.1999@mail.ru. ORCID 0000-0002-8168-8809

Yury F. Ivanov – DrSc (Phys. and Math.), Chief Researcher of the Plasma Emission Electronics Laboratory, Institute of High Current Electronics, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia.
Email: yufi55@mail.ru. ORCID 0000-0001-8022-7958

Anastasiya N. Gostevskaya – postgraduate student of the Department of Natural Sciences, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia. Email: lokon1296@mail.ru. ORCID 0000-0002-7328-5444

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.98.042
DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-2-102-113



РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ АНАЛИЗА ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЛИННОМЕРНЫХ ПАНЕЛЕЙ

Пашков А.Е., Пашков А.А., Фалеев С.Ю., Самойленко О.В.

Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

Аннотация. Актуальность. Формообразование длинномерных панелей является одним из наиболее сложных технологических процессов в самолётостроении. Традиционным подходом к формообразованию является использование методов прессовой гибки в сочетании с обработкой аэродинамической поверхности дробью. Альтернативным подходом является использование технологии комбинированного формообразования, разрабатываемой ИрННТУ, в которой результирующая форма образуется в результате суперпозиции линейчатой поверхности, формируемой путём деформирования рёбер раскаткой роликами или посадкой, и поверхности двойной кривизны, получаемой при обработке дробью аэродинамической поверхности детали. На сегодняшний день технология комбинированного формообразования апробирована в производстве. Имеется специальное оборудование и методики расчёта режимных параметров процесса. Однако для перехода на программный режим управления необходимо решить ряд вопросов, связанных с назначением режимных параметров процесса обработки дробью с учетом конструктивных особенностей детали. **Цель работы.** Повышение точности расчета режимных параметров процесса обработки дробью в комбинированном технологическом процессе формообразования длинномерных панелей на основе анализа их геометрических параметров. **Используемые методы.** Использовано автоматизированное программирование в процессе трехмерного моделирования крупногабаритных деталей сложной формы. **Новизна.** Предложена методика автоматизированного определения геометрических параметров длинномерных панелей для расчета режимных параметров процесса комбинированного формообразования детали. **Результаты.** Разработана методика автоматизированного анализа геометрических параметров детали, создано программное обеспечение, позволяющее определять момент инерции, толщину эквивалентного прямоугольного сечения и радиус кривизны поверхности участков детали, представляющие исходные данные для расчета режимов обработки. **Практическая значимость.** Разработанная методика позволяет повысить точность и снизить трудоёмкость расчета режимных параметров формообразования деталей панелей самолётов и решить комплекс задач, направленных на повышение эффективности производства длинномерных панелей.

Ключевые слова: дробеударное формообразование, двойная кривизна, средства автоматизации, моделирование, программный интерфейс, измерение формы

© Пашков А.Е., Пашков А.А., Фалеев С.Ю., Самойленко О.В., 2023

Для цитирования

Разработка методики анализа геометрических параметров длинномерных панелей / Пашков А.Е., Пашков А.А., Фалеев С.Ю., Самойленко О.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №2. С. 102-113. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-2-102-113>



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

DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY FOR ANALYZING GEOMETRIC PARAMETERS OF LONG AIRCRAFT PANELS

Pashkov A.E., Pashkov A.A., Faleev S.Yu., Samoylenko O.V.

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. Relevance. Forming of long panels is one of the most complex technological processes in aircraft manufacturing. A conventional approach to forming involves press bending methods in combination with shot peening of aerodynamic surfaces. An alternative approach is the use of combined forming technology developed by Irkutsk National Research Technical University, when the resulting shape is generated by superimposing a ruled surface, formed by deforming the edges with rollers or pressing, and a double curved surface formed by shot peening of the aerodynamic surface of a part. To date, the combined forming technology has been tested in production. There is special equipment and methodologies for calculating the process parameters. However, to transfer to a program control mode, we should solve several issues related to assigning the shot peening process parameters, taking into account the design features of the part. **Objective.** To improve accuracy of calculating the shot peening process parameters in the combined technological process of forming long panels based on the analysis of their geometric parameters. **Methods Applied.** Automated programming was applied in the three-dimensional modeling of large-sized parts with complex shapes. **Originality.** A methodology for the automated calculation of geometric parameters for long panels was proposed to calculate the process parameters for combined forming of parts. **Results.** The authors developed the methodology for an automated analysis of geometric parameters of parts; created software to calculate the moment of inertia, equivalent rectangular section thickness, and radius of curvature of the surface the part sections, representing the initial data for calculating the processing modes. **Practical Relevance.** The developed methodology ensures improved accuracy and reduced labor intensity of calculating the process parameters for forming the aircraft panel parts and solves a set of tasks aimed at increasing efficiency of manufacturing the long panels.

Keywords: shot peening forming, double curvature, automation tools, modeling, software interface, shape measurement

For citation

Pashkov A.E., Pashkov A.A., Faleev S.Yu., Samoylenko O.V. Development of a Methodology for Analyzing Geometric Parameters of Long Aircraft Panels. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 2, pp. 102-113. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-2-102-113>

Введение

Длинномерные панели самолётов могут иметь габаритные размеры – до 30 м в длину и 3 м в ширину (рис. 1). Форма деталей представляет сочетание линейчатых поверхностей с участками двойной кривизны [1].

Конструктивными элементами панелей являются продольные и поперечные рёбра разной конфигурации, карманы, образуемые их пересечением, местные утолщения полотна, окантовки люков и т.д. [2, 3].

Традиционным подходом к формообразованию является использование методов прессовой гибки в сочетании с обработкой аэродинамической поверхности дробью. Свободная гибка на прессах является одним из наиболее универсальных методов формообразования. Эта технология применяется как самостоятельный процесс формообразования деталей одинарной кривизны, для правки заготовок, а также для подгибки мест усиления перед дробеударным формообразованием (ДУФ) [4]. После гибки на прессе детали имеют такой дефект формы, как огранка [5]. Однако для участков пане-

лей, как стык крыла и центроплана с толщиной 30 мм и более, прессовый метод является единственно возможным. В то же время для него характерны отсутствие стабильности, большая трудоемкость и потребность в высокой квалификации персонала.

Альтернативным подходом является использование технологии комбинированного формообразования, разрабатываемой ИрНТУ, в которой результирующая форма образуется в результате суперпозиции линейчатой поверхности, формируемой путём деформирования рёбер раскаткой роликами или посадкой, и поверхности двойной кривизны, получаемой при обработке дробью аэродинамической поверхности детали.

На рис. 2 представлена схема процесса комбинированного формообразования со следующими обозначениями: $R_{\text{рас}}$ – радиус продольной кривизны, полученный в результате раскатки ребер; $R_{\text{ДУФх}}$ – радиус поперечной кривизны, получаемый на этапе дробеударного формообразования; $R_{\text{пос}}$ – радиус поперечной кривизны, формируемый методом посадки ребер; $R_{\text{у теор}}$ – радиус теоретической продольной кривизны детали; $R_{\text{х теор}}$ – радиус теоретической поперечной кривизны.

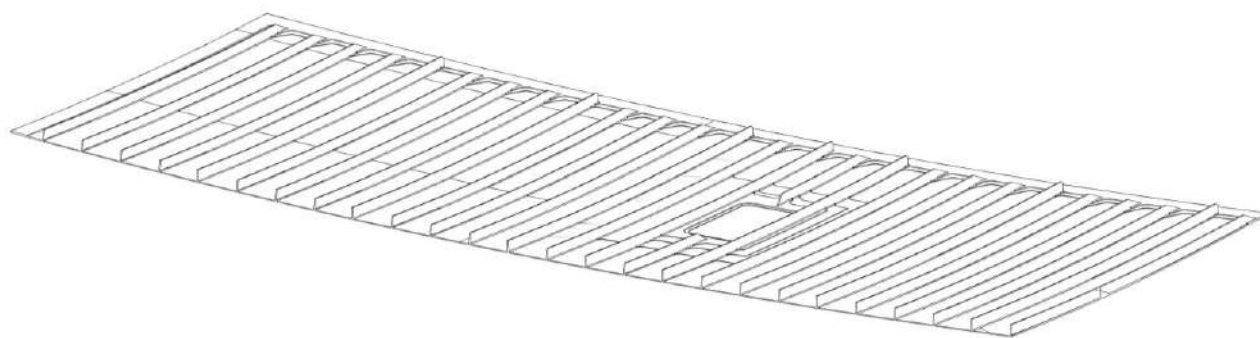


Рис. 1. Трехмерная модель типовой панели
Fig. 1. A three-dimensional model of a typical panel

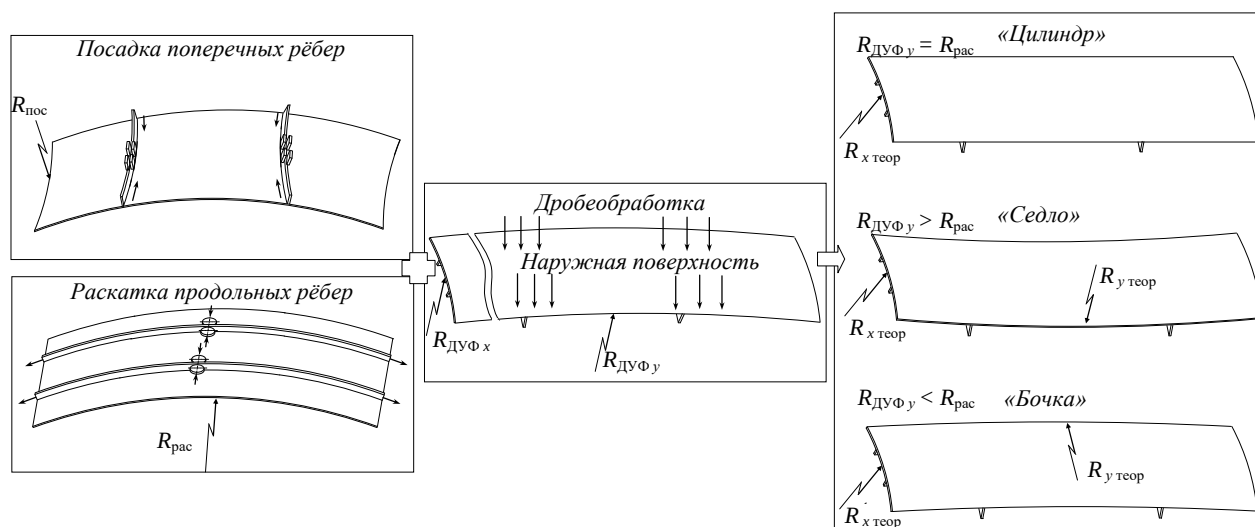


Рис. 2. Схема комбинированного формообразования панелей
Fig. 2. The scheme of combined forming of the panels

Для реализации данной технологии в ИрНИ-ТУ был разработан комплекс технологического оборудования, который включает в себя установку для раскатки ребер роликами, установку для дробеударного формообразования контактного типа [6], ведутся работы по созданию инструмента для посадки ребер панелей. Схема обработки на установке контактного типа приведена на **рис. 3**: деталь 1 закрепляется в неподвижной системе фиксации деталей, обеспечивающей позиционирование стоек 2 в зависимости от пространственной формы детали; дробеметный аппарат 3 прижимается к обрабатываемой поверхности при помощи сменных эластичных уплотнений и перемещается по координатам X, Y, Z , образуя на поверхности детали полосы от обработки дробью 4 различной высоты.

Также можно отметить, что для дробеударного формообразования существуют установки проходного типа отечественной разработки, в

которых деталь, закрепленная в траверсе, перемещается через неподвижную камеру, оснащенную дробеметными аппаратами и (или) роботизированными ячейками с дробеструйными соплами (**рис. 4**).

Режимными параметрами процесса обработки дробью является частота вращения дробеметного аппарата (или давление в пневмосистеме и ориентация сопла для случая обработки дробеструйным методом) и время обработки, а также фракция дроби [7].

Входными параметрами для расчета режимных параметров являются геометрические параметры обрабатываемых деталей, а именно:

- требуемая кривизна κ_j , определяемая с учетом исходных отклонений формы детали;
- момент инерции сечения J_j ;
- приведенная толщина детали $H_{прj}$, определяемая с учетом жесткости ее сечения.

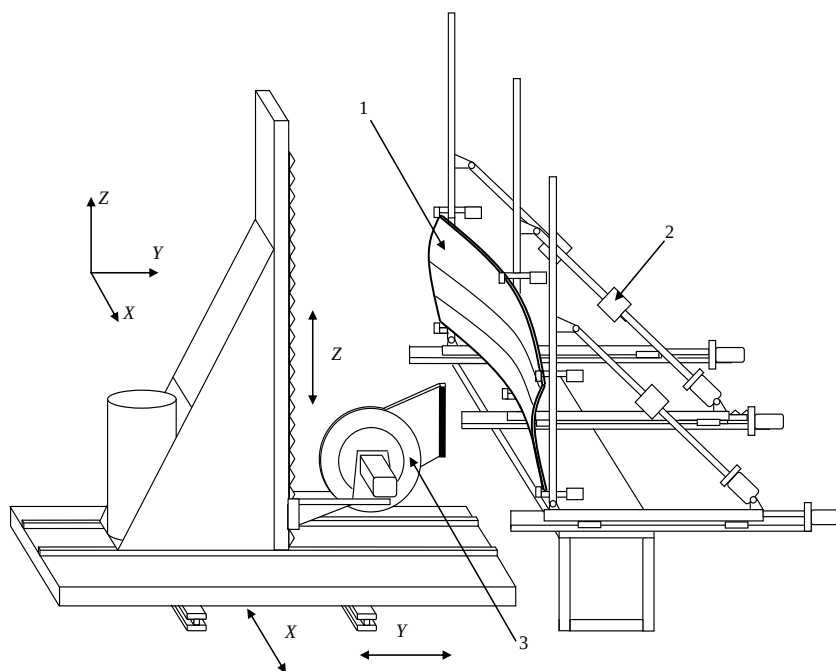


Рис. 3. Схема дробеударного формообразования деталей на установке серии УДФ разработки ИрННТУ
Fig. 3. The scheme of shot peening forming of the parts on the UDF series installation developed by Irkutsk National Research Technical University

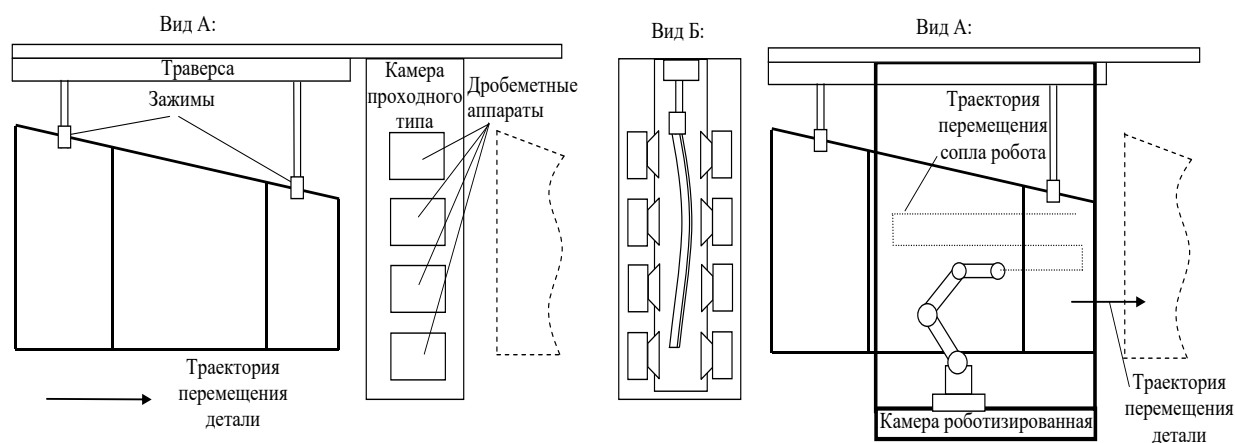


Рис. 4. Схема дробеударного формообразования деталей на установках проходного типа:
а – обработка дробеударными аппаратами; б – обработка при помощи роботизированных ячеек с дробеструйными соплами

Fig. 4. The scheme of shot peening forming of the parts on through-type installations: а is forming with shot peening machines; б is forming using robotic cells with shot blasting nozzles

Ввиду того, что геометрические параметры детали являются переменными от сечения к сечению деталей, определение данных параметров вручную является долгим и трудоёмким процессом, требующим от технолога высокой концентрации и больших временных затрат. Решение данной проблемы лежит в использовании комплексной автоматизации получения режимных параметров обработки процесса ДУФ [8] с ис-

пользованием CAD-систем.

Расчет режимных параметров обработки начинается с анализа продольной и поперечной кривизны, момента инерции и приведенной толщины прямоугольного сечения детали. После получения этих входных данных возможно составить управляющую программу для обработки панели с заданной точностью [9]. Для анализа указанных параметров необходимо использовать со-

временные CAD-системы для получения быстрого и качественного результата.

Создание методики анализа геометрии длинномерных панелей

Алгоритм анализа геометрии детали унифицирован в зависимости от типа детали с продольным или поперечным оребрением. Для корректного анализа необходимо разделять деталь на элементарные участки. Определение геометрических параметров длинномерных панелей выполняется в следующей последовательности:

1. Назначение локальной системы координат. Располагать систему координат необходимо в углу детали. Направление осей должно соответствовать правилам: ось X назначается вдоль нижней линейчатой образующей (от точки 1 к точке 2) – продольное направление, ось Y – от точки 1 к точке 3 – поперечное направление (рис. 5).

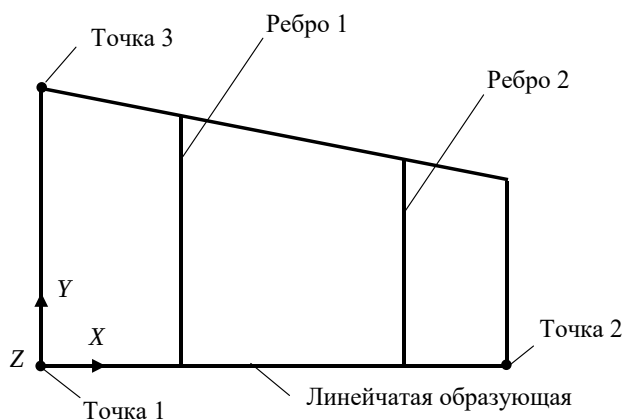


Рис. 5. Назначение системы координат
Fig. 5. Coordinate system assignment

2. Создание плоскости в междуреберном пространстве детали для определения границы участка вдоль оси X (рис. 6).

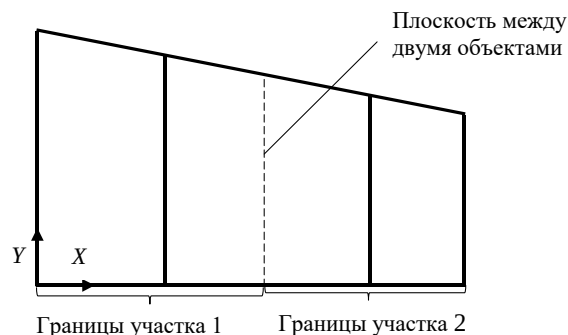


Рис. 6. Назначение границ элементарных участков в продольном направлении (вдоль оси X)
Fig. 6. Assignment of boundaries of elementary sections in the longitudinal direction (along the X -axis)

3. Разбиение детали на участки вдоль оси Y (рис. 7) путем перемещения плоскости XOZ вдоль направляющей, образованной перемещением срединной поверхности первого ребра и лицевой поверхности детали с шагом ΔY (применяемое обозначение i – номер участка по оси X , j – номер участка по оси Y).

4. Определение эквивалентного прямоугольного сечения и его параметров (рис. 8, 9). Для элементарного участка определяются:

- среднее значение приведенной толщины H_{ij}^x, H_{ij}^y ;
- моменты инерции сечений J_{ij}^x, J_{ij}^y ;
- расстояние от лицевой поверхности до центра тяжести сечения z_{ij}^x, z_{ij}^y ;
- радиусы кривизны $R_{ij}^{x \text{ теор}}, R_{ij}^{y \text{ теор}}$.

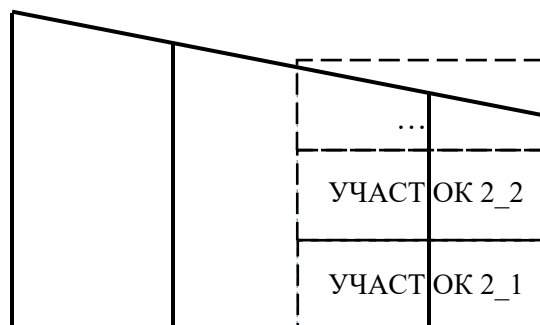
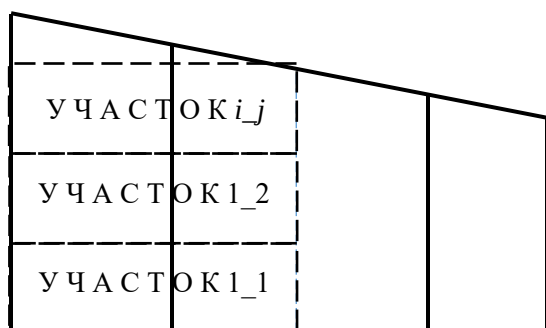


Рис. 7. Назначение границ элементарных участков в поперечном направлении (вдоль оси Y)
Fig. 7. Assignment of boundaries of elementary sections in the longitudinal direction (along the X -axis)

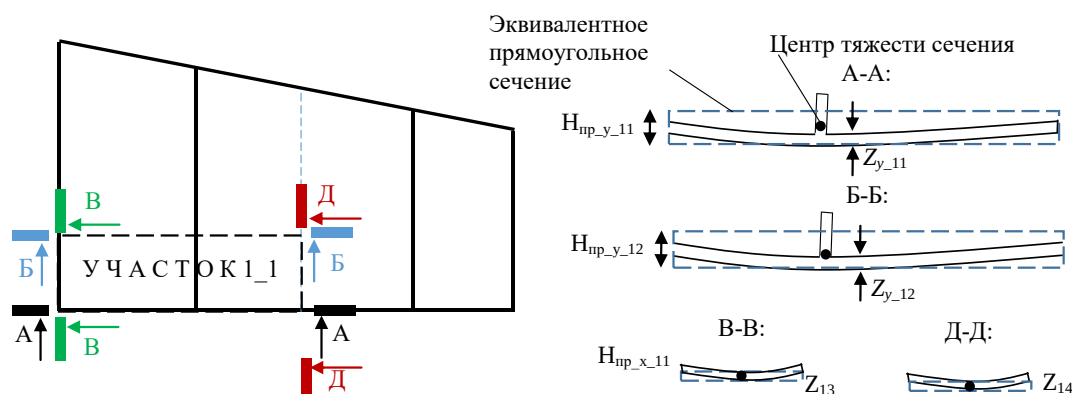


Рис. 8. Определение параметров сечений
Fig. 8. Determination of section parameters

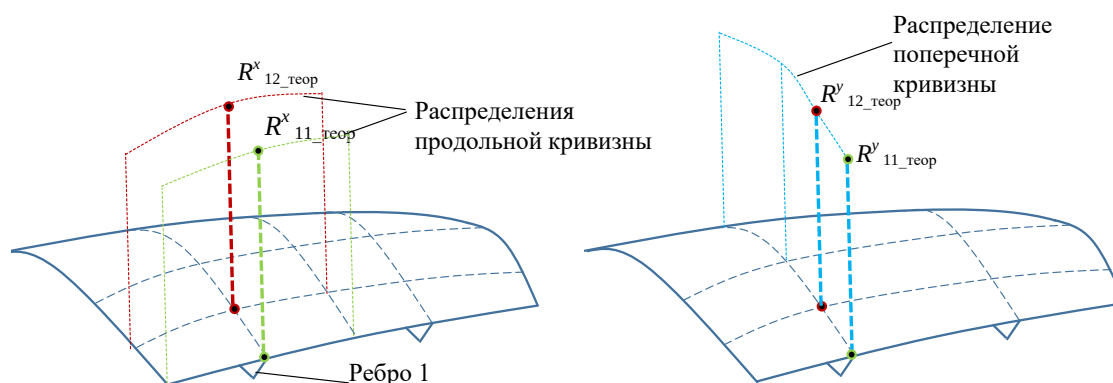


Рис. 9. Определение геометрических параметров участка
Fig. 9. Determination of geometric parameters of a section

В результате выполнения алгоритма будет получена готовая модель, разбитая на элементарные участки обработки со всей необходимой геометрией, которые необходимы для расчета процессов ДУФ. Имеющиеся детали являются крупногабаритными, а операции, выполняющиеся над моделями изделий, являются типовыми и повторяющимися. Данный процесс было решено автоматизировать, используя библиотеку расширений NxOpen. Необходимо сформировать выходной массив данных, который будет включать в себя геометрию детали, согласно вышеизложенной методике.

Разработка программного обеспечения для автоматизации процессов моделирования

Поскольку большинство авиационных предприятий для моделирования рассматриваемых деталей использует CAD-систему Siemens NX, для реализации предложенного алгоритма необходимо использовать NX Open API – набор инструментов и технологий, посредством которых внешнее приложение может получить доступ к возможностям CAD-системы.

Программное обеспечение должно решать такие задачи, как:

1. Автоматизация анализа геометрических параметров крупногабаритной детали сложной формы [10, 11].

2. Формирование выходного файла с полученными данными для дальнейшего расчета режимных параметров процесса обработки дробью.

Разработанная программа реализует следующие функции:

1. Отделение внутреннего набора детали от полотна. Операция разделения позволяет в автоматическом режиме определить количество ребер, а также срединную поверхность каждого ребра при помощи операции «Разсечение детали» (рис. 10).

2. Построение массива плоскостей перпендикулярно линии построения ребер вдоль кривой пересечения с поверхностью при помощи операции «Создание массива плоскостей в сонаправленном с ребрами направлении» (рис. 11). Образующая кривая необходима для компенсации погрешности при построении массива вдоль полотна. Параметром, регулирующим ширину участка, будет значение шага массива [12].

3. Построение массива плоскостей параллельно линии построения ребер при помощи операции «Создание массива плоскостей в поперечном направлении ребер» выполняется в автоматическом режиме. Во время построения первого массива создается образующая кривая перпендикулярно выбранной плоскости. Необходимые ключевые параметры массива определяются в зависимости от положения и параметров ребер детали.

4. Разделение модели детали на элементарные участки в соответствии с построенными ранее плоскостями при помощи операции «Определение элементарных участков модели» (рис. 12) и определения параметров эквивалентного прямоугольного сечения (моменты инерции, центр тя-

жести, толщина сечения) в продольном и поперечном направлении для каждого элементарного участка.

5. Определение радиусов кривизны относительно осей X и Y с использованием операции «Определение радиуса кривизны детали в продольном и поперечном направлении» (рис. 13).

6. Формирование двух файлов – .xlsx и .csv. Файл excel в автоматическом режиме открывается после завершения работы API, что позволяет сразу же оценить полученные результаты геометрии детали любого из участков. Файл .csv необходим для загрузки геометрических параметров в программный модуль расчета режимных параметров процесса обработки дробью [13].

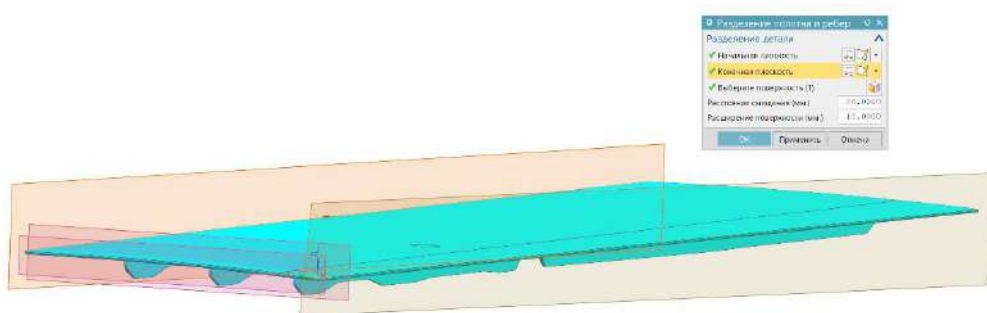


Рис. 10. Определение геометрических параметров участка

Fig. 10. Determination of geometric parameters of a section

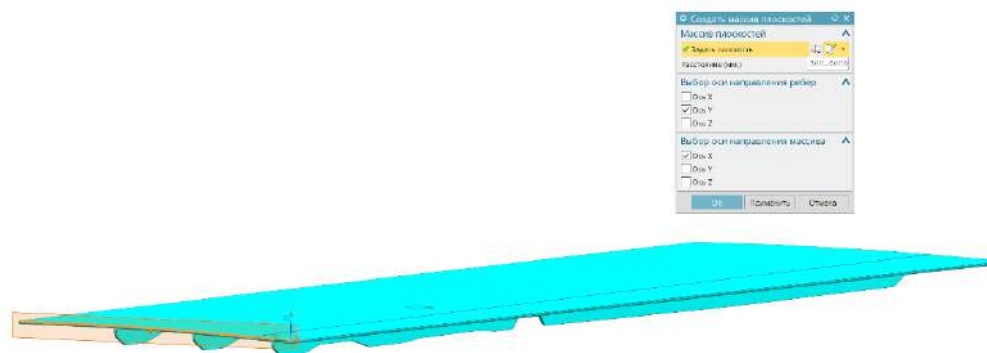


Рис. 11. Построение массива плоскостей перпендикулярно линии построения ребер

Fig. 11. Building an array of planes perpendicular to the edge construction line

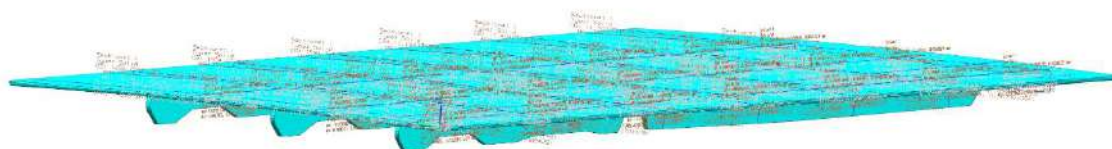


Рис. 12. Разделение модели детали на элементарные участки

Fig. 12. Dividing a model of the part into elementary sections

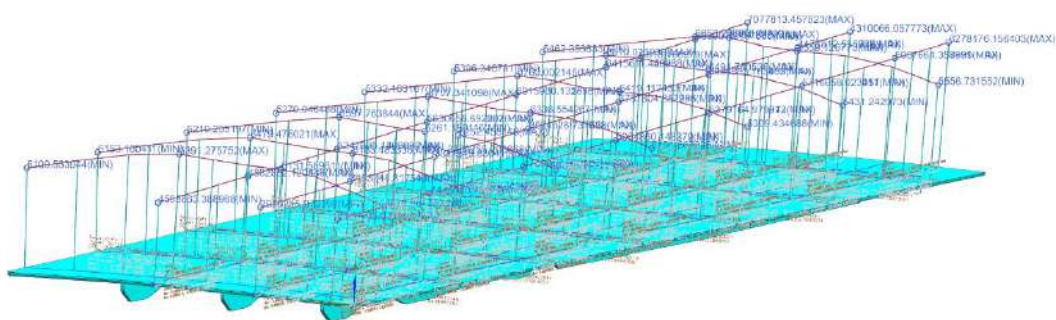


Рис. 13. Определение радиусов кривизны

Fig. 13. Determination of radii of curvature

Расчет режимных параметров процесса обработки дробью

Основные теоретические подходы к определению режимных параметров дробеударного формообразования изложены в трудах [14-16], в которых отмечается, что во время операции ДУФ возникает изгибающий момент $M_{\text{ДУФ}}$ в результате действия удельной силы $P_{\text{ДУФ}}$, определяемый по формуле

$$M_{\text{ДУФ}} = P_{\text{ДУФ}} \cdot H, \quad (1)$$

где $P_{\text{ДУФ}}$ – действие удельной силы, Н; H – расстояние плеча приложения силы, м.

Исходя из известных закономерностей теории упругости, изгибающий момент можно определить по формуле

$$M = \frac{\kappa}{E \cdot J_{ij}}, \quad (2)$$

где κ – кривизна сечения детали, м; E – модуль упругости, МПа; J_{ij} – момент инерции м^4 .

Таким образом, приравняв выражения (1) и (2), можно вывести зависимость для определения удельной растягивающей силы $P_{\text{ДУФ}}$, действующей на образец, для получения необходимой кривизны с учетом специфики процесса:

$$P_{c(k)}^a = \frac{E \cdot J_{ij} \left(\frac{1}{R_j} - \frac{k_{c-j}}{R_{\text{ИЗМ-j}}} \right)}{(H_j^{\text{пр}} - z_c)} k_T \cdot k_{\text{упр}} \cdot k_{\text{НДС}}, \quad (3)$$

где $P_{c(k)}^a$ – удельная растягивающая силы, Н; k_T – коэффициент соответствия теоретического

контура; $k_{\text{упр}}$ – коэффициент для учета поволоок при упрочении; $k_{\text{НДС}}$ – коэффициент вида напряженно-деформированного состояния; k_c – коэффициент искажения формы; J_{ij} – момент инерции, м^4 ; z_c – глубина залегания силы, м; $H_j^{\text{пр}}$ – высота элементарного сечения детали, м; E – модуль упругости, МПа; R – кривизна детали, м; i – информация о сечении в продольном направлении; j – информация о сечении в поперечном направлении.

Коэффициент соответствия теоретического контура $k_T = 0,85 - 0,95$ используется для обеспечения определённой степени недогиба детали при программной реализации процесса формообразования и обеспечения возможности реализации доводочных операций при необходимости. Коэффициент $k_{\text{упр}}$, определяемый по результатам конечно-элементного моделирования процесса упрочнения детали, служит для учета возможного коробления детали при реализации финальной стадии обработки – поверхностном упрочении. Коэффициент вида напряженно-деформированного состояния $k_{\text{НДС}} = 0,5 - 0,65$ служит для учета влияния жесткости сечений при двухосном изгибе. Коэффициент искажения формы k_c^x учитывает влияние собственного веса детали при измерении в вертикальном положении.

Верификация результатов расчета

Верификация результатов расчета проводилась с применением системы конечно-элементного анализа Ansys LS-Dyna следующим об-

разом: для типового участка детали по формуле (3) с учетом геометрических параметров детали была рассчитана удельная растягивающая сила, которую необходимо приложить к элементарному участку детали, представленному на **рис. 14**, для получения необходимого радиуса кривизны.

Для задания изгибающих нагрузок использовались распределенные растягивающие силы на расстоянии от поверхности детали, что эквивалентно изгибу распределенными моментами (**рис. 15**). Для корректного моделирования процесса обработки

было реализовано следующее перемещение распределенной силы, когда при изгибе детали вектор силы поворачивается и продолжает действовать по нормали к плоскости приложения.

Параметры прикладываемой нагрузки были определены по формуле (3). По результатам расчета для получения радиуса кривизны 5000 мм растягивающая сила составляет сила $P = 111,7$ Н. Результаты моделирования приведены на **рис. 16**.

Полученная кривизна детали составила 5089 мм, что говорит о достаточной точности расчетных закономерностей.

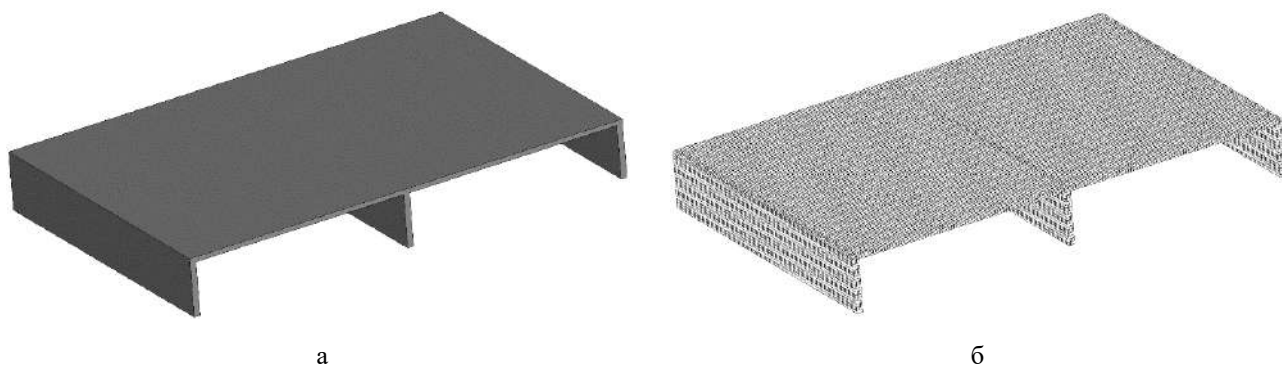


Рис. 14. Модель элементарного участка детали (а) и конечно-элементная сетка (б)

Fig. 14. The model of an elementary section of the part (a) and the finite element mesh (б)

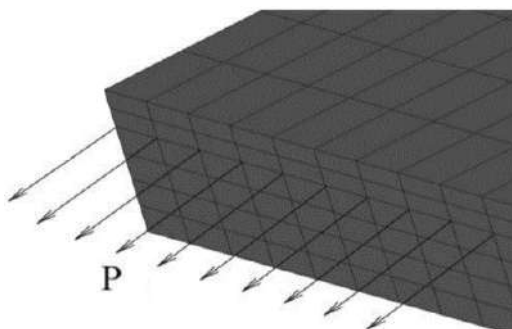


Рис. 15. Схема приложения распределенной силы для моделирования процесса обработки дробью

Fig. 15. The diagram of applying distributed force for simulating the shot peening process

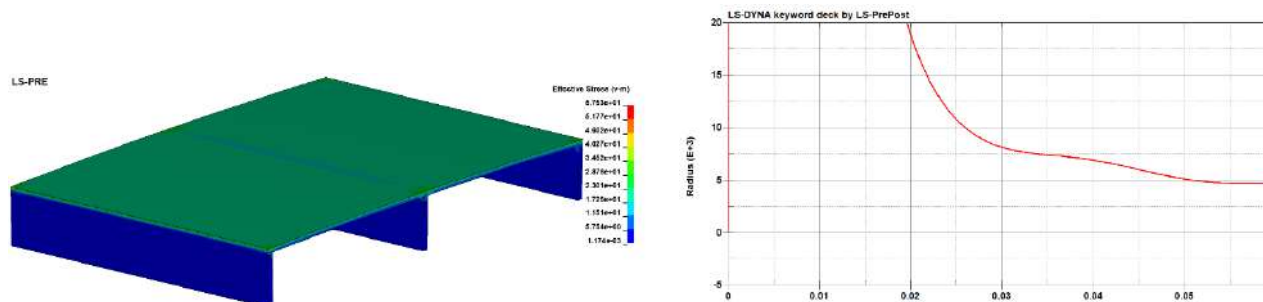


Рис. 16. Схема приложения распределенной силы для моделирования процесса обработки дробью

Fig. 16. The diagram of applying distributed force for simulating the shot peening process

Заключение

Разработанный алгоритм является унифицированным для деталей с продольным и поперечным оребрением. Полученный способ разбиения детали позволяет получить элементарные участки детали для подбора режимных параметров процесса обработки дробью, что в дальнейшем позволит произвести их объединение для получения полос обработки по схожим геометрическим параметрам. Данная операция позволит оптимизировать рабочие ходы дробеобрабатывающего оборудования, что положительно повлияет на производительность операции.

Разработанный автоматизированный метод расчета геометрических параметров детали, необходимый для операции дробеударного формообразования, дает возможность гибкой настройки участков анализа и уменьшения времени, требуемого для обработки целой детали. Входные данные, полученные в результате работы программного модуля, будут использоваться для выполнения анализа результатов геометрии детали и проведения расчетов режимных параметров.

Список источников

1. К определению внутренних силовых факторов процесса дробеударного формообразования / Пашков А.Е., Чапышев А.П., Пашков А.А. и др. // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21. №12. С. 43-54. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-12-43-55
2. Pashkov A.E., Malashchenko A.Y., Pashkov A.A., Duk A.A. The upgrade of peen forming equipment for long-sized aircraft parts // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Irkutsk, 2021.
3. Koltsov V.P., Vinh Le Tri, Starodubtseva D.A. Determination of the allowance for grinding with flap wheels after shot peen forming // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2019, vol. 632. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/632/1/012096>.
4. Белянин П.Н. Производство широкофюзеляжных самолётов. М.: Машиностроение, 1979. 360 с.
5. Формообразование монолитных панелей с местным перегибом / Шелков В.С., Самохвалова Л.А., Утешев С.А. и др. // Приложение к журналу «Авиационная промышленность». 1982. №1. С. 24-27.
6. Пашков А.Е. Автоматизированная технология комбинированного формообразования панелей самолетов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15. №6(2). С. 453-457.
7. Пашков А.Е., Малащенко А.Ю., Пашков А.А. К вопросу создания цифровых технологий производства крупногабаритных деталей каркаса и обшивки самолета // Технология металлов. 2021. №1.

С. 36-46. DOI: 10.31044/1684-2499-2021-0-1-36-46. EDN SJKDWE.

8. Ivanova A.V., Belomestnyh A.S., Semenov E.N., Ponomarev B.B. Manufacturing capability of the robotic-complex machining edge details. *Int J Eng Technol. (IJET)*. 2015, no. 75, pp. 1774-1780.
9. Пашков А.Е. Об особенностях применения отечественной и зарубежной технологии формообразования обшивок и панелей самолетов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. №5(100). С. 17-22.
10. Белецкий А.В. Математическое моделирование и выбор оптимальных проектных решений в САПР преобразователей момента инерционных передач: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Липецк, 2005. 16 с.
11. Дияк А.Ю. Определение степени покрытия автоматизированным методом // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. №12. С. 19-25.
12. Miao H.Y., Larose S., Perron C., Evesque M. On the potential applications of a 3D random finite element model for the simulation of shot peening // *Advances in Engineering Software*. 2009, vol. 40, no. 10, pp. 1023-1038. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2009.03.013>
13. Pashkov A.E., Malashchenko A.Y., Pashkov A.A., Bogdanov K.V., Kryuchkin A.V. Development of digital manufacturing technologies for frame and casing parts // *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2019, vol. 632. DOI: 10.1088/1757-899X/632/1/012104.
14. Методика расчета технологических параметров превентивного деформирования упрочняемых деталей типа «стенка» / Макарук А.А., Самойленко О.В., Иванов Ю.Н. и др. // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2021. Т. 25. №1 (156). С. 8-16.
15. Xudong Xiao, Xin Tong, Yanwei Liu, Renfeng Zhao, Guoqiang Gao, Yan Li Prediction of shot peen forming effects with single and repeated impacts // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2018, vol. 137, pp. 182-194.
16. Maleki E., Bagherifard S., Unal O., Bandini M., Farrahi G.H., Guagliano M. Introducing gradient severe shot peening as a novel mechanical surface treatment // *Scientific Reports*. 2021. vol. 11, no. 1. DOI: 10.1038/s41598-021-01152-2

References

1. Pashkov A.E., Chapyshev A.P., Pashkov A.A. et al. Determining internal force factors of the shot peening forming process. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Irkutsk State Technical University]. 2017;21(12):43-55. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-12-43-55
2. Pashkov A.E., Malashchenko A.Y., Pashkov A.A., Duk A.A. The upgrade of peen forming equipment for long-sized aircraft parts. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Irkutsk*, 2021.

3. Koltsov V.P., Vinh Le Tri, Starodubtseva D.A. Determination of the allowance for grinding with flap wheels after shot peen forming. *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2019;632. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/632/1/012096>.
4. Belyanin P.N. *Proizvodstvo shirokofyuzelyazhnykh samoletov* [Production of wide-body aircraft]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1979, 360 p. (In Russ.)
5. Shelkov V.S., Samokhvalova L.A., Uteshev S.A. et al. Forming monolithic panels with a local bend. *Prilozhenie k zhurnalu «Aviatsionnaya promyshlennost»* [Appendix to the Aviation Industry journal]. 1982;(1):24-27. (In Russ.)
6. Pashkov A.E. Automated technology of combined forming of aircraft panels. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* [Izvestia of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. 2013;15(6(2)):453-457. (In Russ.)
7. Pashkov A.E., Malashchenko A.Yu., Pashkov A.A. On the issue of creating digital technologies for the production of large-sized parts of the aircraft frame and skin. *Tekhnologiya metallov* [Technology of Metals]. 2021;(1):36-46. DOI: 10.31044/1684-2499-2021-0-1-36-46. EDN SJKDWE.
8. Ivanova A.V., Belomestnyh A.S., Semenov E.N., Ponomarev B.B. Manufacturing capability of the robotic-complex machining edge details. *Int. J. Eng. Technol. (IJET)*. 2015;7(5):1774-1780.
9. Pashkov A.E. On the peculiarities of the application of Russian and foreign technology for forming aircraft skins and panels. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Irkutsk State Technical University]. 2015;(5(100)):17-22. (In Russ.)
10. Beletsky A.V. *Matematicheskoe modelirovaniye i vybor optimalnykh proektnykh resheniy v SAPR preobrazovateley momenta inertsionnykh peredach: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Mathematical modeling and selection of optimal design solutions in CAD for inertia torque converters: abstract of the PhD (Eng.) thesis]. Lipetsk, 2005. 16 p.
11. Diyak A.Yu. Determination of the degree of coverage by an automated method. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Irkutsk State Technical University]. 2015;(12):19-25. (In Russ.)
12. Miao H.Y., Larose S., Perron C., Evesque M. On the potential applications of a 3D random finite element model for the simulation of shot peening. *Advances in Engineering Software*. 2009;40(10):1023-1038. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2009.03.013>
13. Pashkov A.E., Malashchenko A.Y., Pashkov A.A., Bogdanov K.V., Kryuchkin A.V. Development of digital manufacturing technologies for frame and casing parts. *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2019;632. DOI: 10.1088/1757-899X/632/1/012104.
14. Makaruk A.A., Samoylenko O.V., Ivanov Yu.N. et al. Methodology for calculating the technological parameters of preventive deformation of hardened parts of the “wall” type. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Irkutsk State Technical University]. 2021;25(1(156)):8-16. (In Russ.)
15. Xudong Xiao, Xin Tong, Yanwei Liu, Renfeng Zhao, Guoqiang Gao, Yan Li. Prediction of shot peen forming effects with single and repeated impacts. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2018;137:182-194. ISSN 0020-7403
16. Maleki E., Bagherifard S., Unal O., Bandini M., Farrahi G.H., Guagliano M. Introducing gradient severe shot peening as a novel mechanical surface treatment. *Scientific Reports*. 2021;11(1). DOI: 10.1038/s41598-021-01152-2

Поступила 15.05.2023; принята к публикации 05.06.2023; опубликована 27.06.2023
Submitted 15/05/2023; revised 05/06/2023; published 27/06/23

Пашков Андрей Евгеньевич – доктор технических наук, профессор кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств, Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия. Email: pashkov@istu.edu. Scopus 57212172643

Пашков Александр Андреевич – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств, Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия. Email: pashk0ff@mail.ru. Scopus 57212172642

Фалеев Сергей Юрьевич – инженер-исследователь кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств, Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия. Email: s.faleeff@gmail.com. ORCID 0000-0003-1167-8485

Самойленко Олег Викторович – научный сотрудник кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств, Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия. Email: olegsamoylenko1@gmail.com.

Andrey E. Pashkov – DrSc (Eng.), Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology and Equipment, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.
Email: pashkov@istu.edu. Scopus 57212172643

Aleksandr A. Pashkov – PhD (Eng.), Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology and Equipment, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.
Email: pashk0ff@mail.ru. Scopus 57212172642

Sergey Yu. Faleev – Research Engineer of the Department of Mechanical Engineering Technology and Equipment, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.
Email: s.faleeff@gmail.com. ORCID 0000-0003-1167-8485

Oleg V. Samoylenko – Researcher of the Department of Mechanical Engineering Technology and Equipment, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.
Email: olegsamoylenko1@gmail.com

НАДЕЖНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ RELIABILITY AND DURABILITY OF METALLURGICAL EQUIPMENT

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.762.4:621.318.12
DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-2-114-126



ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОРОШКОВЫХ ЖЕЛЕЗОМЕДНОГРАФИТОВЫХ СПЛАВОВ И СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ДИФфуЗИОННЫЙ МАССОПЕРЕНОС И ТРИБОСИНТЕЗ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ СТРУКТУР В УЗЛАХ ТРЕНИЯ

Гасанов Б.Г., Азаренков А.А., Харченко Е.В., Панчвидзе Г.Г.

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова,
Новочеркасск, Россия

Аннотация. В работе проведен анализ триботехнических свойства антифрикционных материалов на основе порошковых железомеднографитовых сплавов различного состава в зависимости от термической обработки образцов, применяемого смазочного материала и влияния состава поверхностно-активных веществ (ПАВ) в смазочных композициях на формирование промежуточных структур смазочной пленки в зоне контакта пар трения. С помощью методов электронного зондирования изучены виды промежуточных структур (пленок), а также микроструктура поверхностных слоев образцов железомеднографитовых сплавов. Показано, что для повышения триботехнических свойств порошковых сплавов на основе Fe-Cu-Gr и Fe-Br-Gr целесообразно добавить в смазочные материалы растворы карбоновых кислот или других поверхностно-активных веществ. Установлено, что время приработки пар трения «колодка – вал» в случае использования в качестве смазочных материалов смеси масла И-40 и спиртового раствора олеиновой кислоты у образцов порошковых железомеднографитовых сплавов с пористостью 18-22% уменьшается в 4-6 раз, а коэффициент трения в установившемся режиме в 2,2-2,5 раза и в дальнейшем переходит в безызносный режим работы. Установлено, что закалка после спекания железомеднографитовых композиций, содержащих более 3-5% Cu, активирует трибосинтез промежуточных структур и самоорганизацию в парах трения. Определено влияние концентрации графита на кинетику диффузионного массопереноса меди и коэффициенты взаимной диффузии в порошковых сплавах Fe-Cu-Gr, проанализировано процентное распределение меди в межчастичных контактах в сплаве Fe-5%Cu при различных вариантах термической обработки, что позволяет определить распределение меди в спеченных антифрикционных материалах, прогнозировать их структурообразование и свойства изделий из них.

Ключевые слова: узел трения, триботехнические свойства, трибосинтез, железомеднографитовые порошковые сплавы, химический состав, промежуточные структуры, смазочные материалы, поверхностно-активные вещества, карбоновые кислоты, диффузионный массоперенос

© Гасанов Б.Г., Азаренков А.А., Харченко Е.В., Панчвидзе Г.Г., 2023

Для цитирования

Влияние химического состава порошковых железомеднографитовых сплавов и смазочных материалов на диффузионный массоперенос и трибосинтез промежуточных структур в узлах трения / Гасанов Б.Г., Азаренков А.А., Харченко Е.В., Панчвидзе Г.Г. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №2. С. 114-126. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-2-114-126>



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

INFLUENCE OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF FE-CU-GR POWDER ALLOYS AND LUBRICANTS ON DIFFUSION MASS TRANSFER AND TRIBOSYNTHESIS OF INTERMEDIATE STRUCTURES IN FRICTION UNITS

Gasanov B.G., Azarenkov A.A., Kharchenko E.V., Panchvidze G.G.

Platov South Russian State Polytechnic University (Novocherkassk Polytechnic Institute), Novocherkassk, Russia

Abstract. The paper analyzes the tribotechnical properties of antifriction materials based on powder iron-copper-graphite alloys of various compositions depending on the heat treatment of the samples, the lubricant used and the influence of the composition of surface-active substances (surfactants) in lubricant compositions on the formation of intermediate structures of the lubricating film in the contact zone of friction pairs. Electron probing methods were used to study types of the intermediate structures (films), as well as the microstructure of the surface layers of iron-copper-graphite alloy samples. It has been shown that to improve the tribotechnical properties of powder alloys based on Fe-Cu-Gr and Fe-Br-Gr, it is appropriate to add solutions of carboxylic acids or other surfactants into lubricants. It has been established that breaking-in time of friction pairs “block – shaft” in case of using a mixture of I-40 oil and an alcohol solution of oleic acid as lubricants, for the iron-copper-graphite powder alloy samples with a porosity of 18-22% decreases by 4-6 times, and the friction coefficient decreases by 2.2-2.5 times, and the system goes into a wear-free operation mode. It has been established that quenching after sintering of iron-copper-graphite compositions containing over 3-5% Cu activates tribosynthesis of intermediate structures and self-organization in friction pairs. The authors determined the effect of the graphite concentration on kinetics of diffusion mass transfer of copper and on the coefficients of interdiffusion and in Fe-Cu-Gr powder alloys, and analyzed the percentage distribution of copper in interparticle contacts in the Fe-5%Cu alloy in various heat treatment options to determine the distribution of copper in sintered antifriction materials, predict their structure formation and properties of products made from them.

Keywords: friction unit, tribotechnical properties, tribosynthesis, iron-copper-graphite powder alloys, chemical composition, intermediate structures, lubricants, surfactants, carboxylic acids, diffusion mass transfer

For citation

Gasanov B.G., Azarenkov A.A., Kharchenko E.V., Panchvidze G.G. Influence of the Chemical Composition of Fe-Cu-Gr Powder Alloys and Lubricants on Diffusion Mass Transfer and Tribosynthesis of Intermediate Structures in Friction Units. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 2, pp. 114-126. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-2-114-126>

Введение

Важным направлением развития порошкового трибоматериаловедения является разработка инновационных технологий, отличающихся от известных способностью снижать коэффициент трения и значительно уменьшать или исключать износ в результате трибосинтеза нанопокровов на контактных поверхностях [1-3]. Для этого необходимо активировать на трущихся поверхностях деталей пары трения избирательного переноса с образованием защитных сервоитных и сёрфинг-пленок [4-7]. Известно, что под действием поверхностно активных веществ (ПАВ) при трении протекает избирательное анодное растворение некоторых компонентов, содержащихся в антифрикционных медных сплавах [8, 9]. Атомы таких компонентов попадают в смазочный материал, а в поверхностном слое антифрикционных сплавов на основе меди повышается концентрация пористых микровключений

меди [10, 11]. При наличии в смазочных материалах поверхностно-активных веществ наночастицы меди легко взаимодействуют с поверхностью контртела, покрывая ее тонким сервослоем, что позволяет создать самоорганизующие узлы трения [10-13].

Физическая природа механизма трибосинтеза наноструктур в узлах трения при использовании наиболее широко применяемых порошковых антифрикционных материалов на основе Fe-Cu-Gr мало изучена. Поэтому актуальны исследования по изучению механизма формирования промежуточных структур при использовании для их пропитки смазочных материалов, содержащих ПАВ.

Целью данной работы является изучение влияния состава ПАВ в смазочных материалах и химического состава порошковых сплавов на основе системы Fe-Cu-Gr на кинетику трибосинтеза промежуточных наноструктур и разработка методов создания самоорганизующихся триботехнических систем.

Материалы и методика исследований

Спеченные кольцевые образцы с остаточной пористостью в пределах 15-25% получали из смеси порошков на основе Fe-Cu, Fe-Br, Fe-Cu-Gr и Fe-Br-Gr с содержанием порошков бронзы и меди в пределах 1-30% и графита 1-10% (мас). Триботехнические испытания проводили на модернизированной машине трения типа МИ-1. Образцы после спекания в защитных газовых средах в интервале 1000-1200°C выдержкой 2-5 ч пропитывали при 90-100°C в течение 30-180 мин маслами И-20 и И-40, спиртовыми растворами некоторых карбоновых кислот и их смесью с указанными маслами.

Микроструктуру изучали на металлографическом микроскопе «Altam MET-1M» и электронном растровом микроскопе Quanta 200. Микро-рентгеноспектральный анализ проводили в центре коллективного пользования ЮРГПУ (НПИ) на установках LScanVer 1100 и Tescan VEGA II LMU, оснащенной системой энергодисперсионного микроанализа INCA ENERGY 450/XT производства фирмы OXFORD Instruments Analytical.

Результаты исследований и их обсуждение

Исследования показали, что коэффициент трения f спеченного железа пористостью 15-22%, пропитанных маслом И-20 с добавками глице-

рина (20%), составлял 0,12-0,17, а износ при давлении 5 МПа в процессе приработки в течение 1 ч достигал до 0,2-0,3 мм. В случае пропитки образцов из шихты Fe-2,5%Cu смесью масла И-20 и глицерина коэффициент трения снижается в установившемся режиме с 0,14 до 0,01 (рис. 1, кривая 1), а абсолютный износ материала на стадии приработки в зависимости от химического состава ПАВ составлял 0,15-0,2 мм. В установившемся режиме износ всех образцов не превышал погрешности измерений. В случае введения в шихту порошка бронзы ОЦС 5-5-5 и пропитки образцов смесью глицерина и масла И-20 коэффициент трения стабилизируется при содержании от 2,5 до 5% бронзы. В частности, после испытания образцов, содержащих 2,5% порошка бронзы, в течение 30 мин f снижается с 0,13 до 0,09 (рис. 1, кривая 2), а износ на стадии приработки составляет 0,11-0,12 мм. После дальнейшего испытания в течение 8 ч при давлении до 5 МПа и скорости в пределах 0,3-1,0 м/с при установившемся режиме трения износ исследуемых материалов не наблюдался, то есть реализуется безыносный режим трения. У сплавов Fe+2,5%Cu+2% Gr при испытании в тех же условиях f снижается с 0,12 до 0,06-0,07 (рис. 1, кривая 3), а износ образца на стадии приработки составил 0,09-0,10 мм.

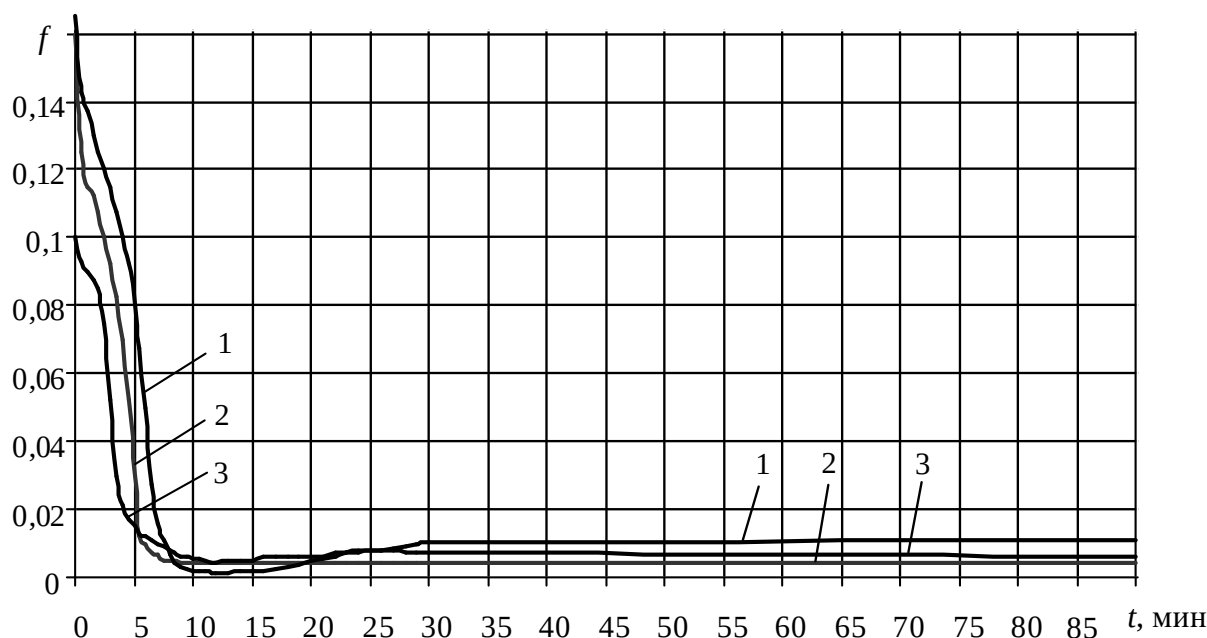


Рис. 1. Влияние времени испытания на коэффициент трения сплавов следующего состава: 1 – Fe+2,5%Cu; 2 – Fe+2,5%BrO5Ц5C5; 3 – Fe+2,5%Cu+2%Gr

Fig. 1. Influence of testing time on the coefficient of friction of the alloys of the following compositions: 1 is Fe+2.5%Cu; 2 is Fe+2.5%BrO5Ts5S5; 3 is Fe+2.5%Cu+2%Gr

При установившемся режиме испытания f изменяется в пределах 0,003 до 0,004 с увеличением содержания меди с 2 до 5 мас.%. Однако при добавлении в шихту 9-10%Cu износостойкость заметно ухудшается из-за активного переноса нерастворившихся в железе частиц меди из порошковых сплавов на поверхность стального вала, что приводит к схватыванию частиц меди в парах трения.

Для исследования противоизносных действий смазочных материалов, содержащих карбоновые кислоты, на стадии приработки часть спеченных образцов пористостью в пределах 15-20% пропитывали минеральным маслом И-40 при 90°C в течение 2 ч, а в процессе испытания через каждые 5 мин капельным методом подавая спиртовые растворы олеиновой, себадиновой, стеариновой и других карбоновых кислот в зону контакта «порошковая колодка – вал».

В случае использования в качестве смазочного материала раствора олеиновой кислоты в этиловом спирте (30:70) время приработки образцов при нагрузке 500 Н составило около 10 мин, коэффициент трения снизился с 0,17 до 0,055-0,065 (рис. 2, а), но линейный износ образцов из смеси Fe+2,5%Cu+2%Гр не превышает 0,02 мм (рис. 2, в), что в 3-4 раза меньше, чем при использовании в качестве ПАВ глицерина, и 2-3 раза меньше, чем при испытании пропитанных только индустриальным маслом. При испытании образцов из указанной шихты, не пропитанных маслом И-20, только олеиновой кислотой коэффициент трения после приработки также снижается до 0,05-0,055, но через 2 ч работы он повысился до 0,07, линейный износ не превышал при этом 0,03-0,033 мм.

Исследования показали, что в процессе испытания образцов из сплава Fe+2,5%Cu+2%Гр, пропитанных смесью масла И-40 и спиртового раствора олеиновой кислоты, промежуточные соединения синтезируются быстрее, чем при использовании только масла И-40. Это связано с тем, что в процессе испытания на поверхности спеченных железомеднографитовых композиций, особенно медных частиц, образуется большое количество активных центров, благодаря дефектности их структуры, а также в результате активации трибохимических реакций в сочетании с электрохимическими эффектами, характерными для режима безызносного трения [7-10]. Поэтому продолжительность периода приработки исследуемой пары трения уменьшается в 4-5 раз. Безызносность при использовании в качестве ПАВ ука-

занных карбоновых кислот также связана с образованием на поверхностях пар трения промежуточных структур, таких как сервовитная и сёрфинг-плёнки (рис. 3), которые блокируют возникновение металлических связей между частицами порошков меди и железа со стальной поверхностью вала. Этим можно объяснить в первую очередь снижение коэффициента трения и линейного износа при добавлении в индустриальное масло раствора олеиновой кислоты.

Как следует из рис. 3, на порах и графитовых включениях, расположенных на поверхности трения порошковых образцов, металлосодержащие нанопленки, появившиеся в результате трибодеструкции, легко разрушаются даже при исследовании на РЭМ после испытания образцов. Это можно объяснить тем, что в процессе испытания на них не образуются устойчивые комплексные металлические соединения, связанные с матрицей сплава, а концентрация меди (светлый фон на рис. 3, б) в таких пленках значительно меньше, чем на поверхности частиц материала (темный фон на рис. 3, б).

При увеличении концентрации меди в шихте выше 5,0% и одноразовой пропиткой смесью, содержащей в качестве ПАВ олеиновую кислоту и индустриальное масло, наблюдали кратковременные колебания коэффициента трения после периода приработки. Особенно это проявляется при испытании сплавов, содержащих более 8,0-10,0 мас.% Cu. Для выявления причин колебаний триботехнических свойств материалов на основе системы Fe+Cu+Гр при использовании в качестве смазки исследуемых карбоновых кислот изучали влияние графита и меди на кинетику формирования структуры и протекания диффузионных процессов при спекании образцов с различным содержанием компонентов.

При увеличении концентрации меди в шихте выше 5,0% и одноразовой пропиткой смесью, содержащей в качестве ПАВ олеиновую кислоту и индустриальное масло, наблюдали кратковременные колебания коэффициента трения после периода приработки. Особенно это проявляется при испытании сплавов, содержащих более 8,0-10,0 мас.% Cu. Для выявления причин колебаний триботехнических свойств материалов на основе системы Fe+Cu+Гр при использовании в качестве смазки исследуемых карбоновых кислот изучали влияние графита и меди на кинетику формирования структуры и протекания диффузионных процессов при спекании образцов с различным содержанием компонентов.

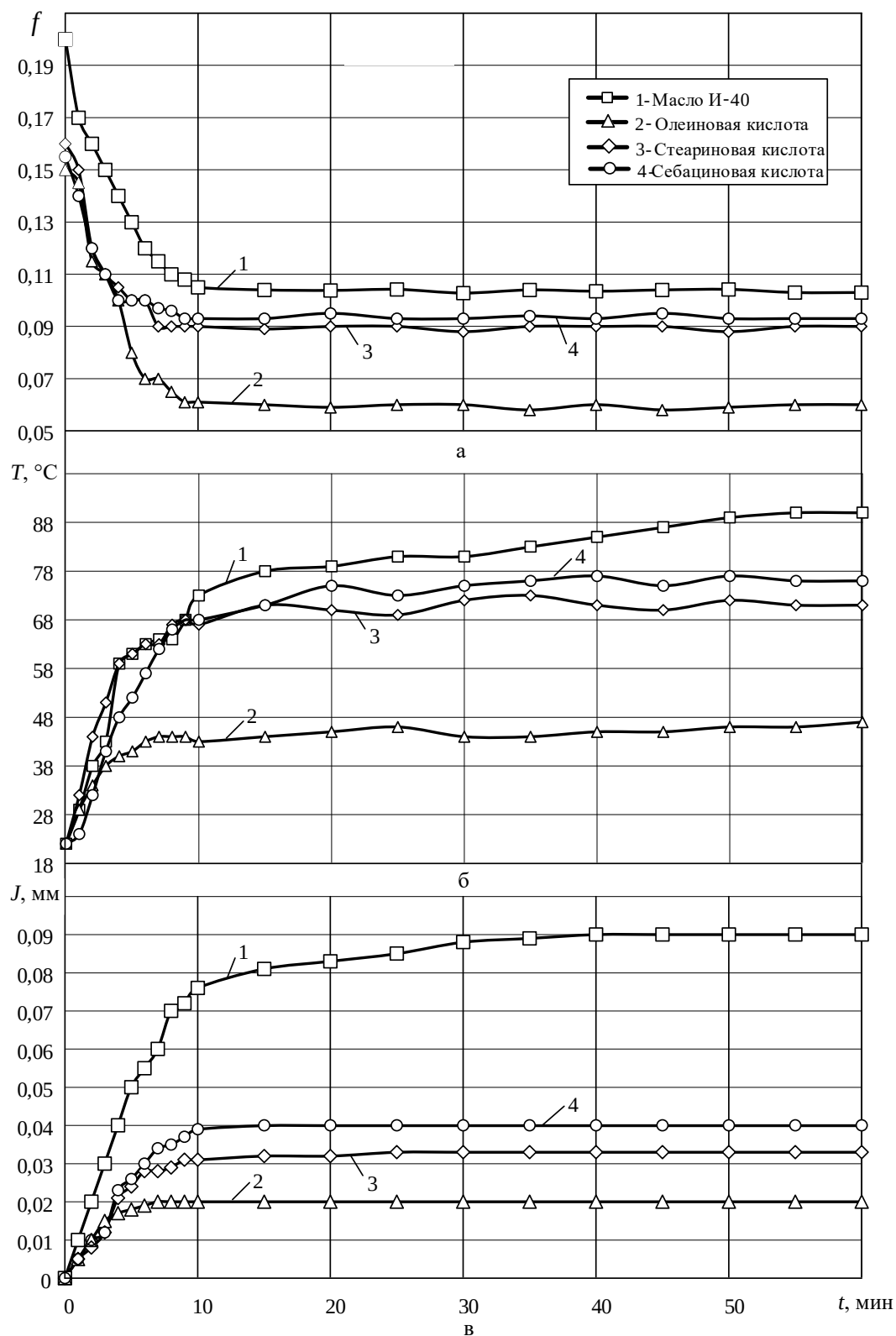
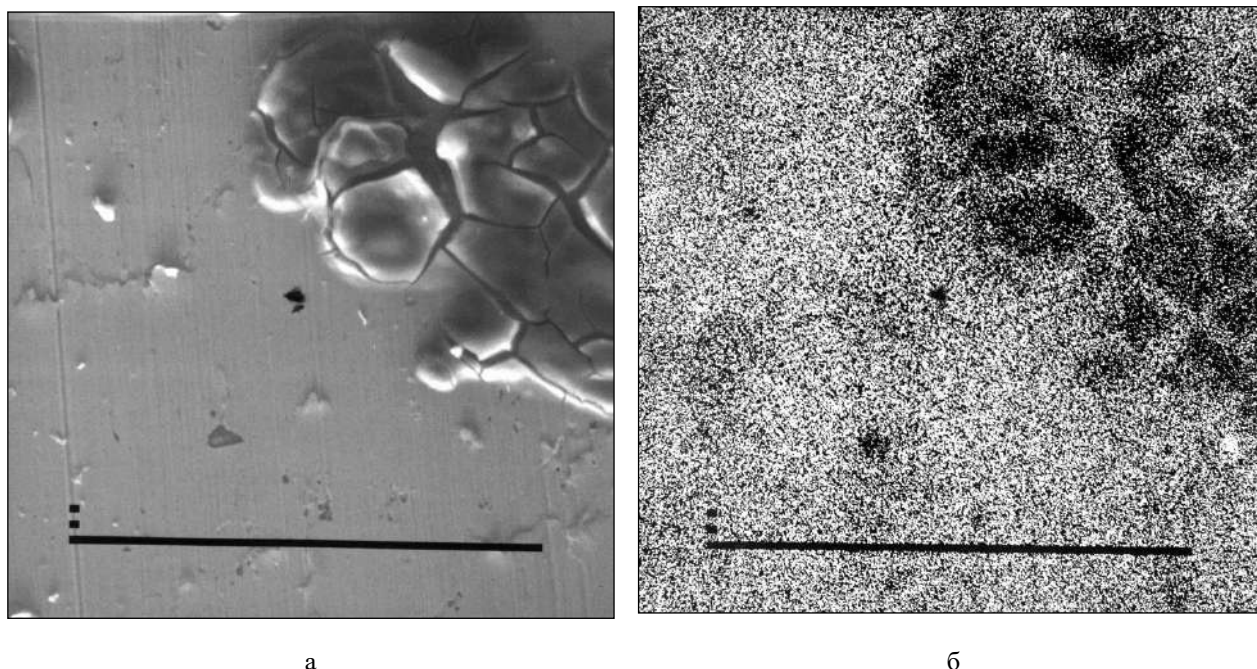


Рис. 2. Зависимость коэффициента трения (а), температуры (б) и линейного износа (в) образцов из смеси Fe+2,5%Cu+2% Gr от времени испытания и содержания в смазочных материалах карбоновых кислот: 1 – 0; 2 – олеиновой; 3 – стеариновой; 4 – себациновой

Fig. 2. Variation in the coefficient of friction (a), temperature (б) and linear wear (в) of the samples from a mixture of Fe+2,5%Cu+2% Gr with respect to testing time and content of carboxylic acids in lubricants: 1 is 0; 2 is oleic acid; 3 is stearic acid; 4 is sebacic acid



а

б

Рис. 3. Вид промежуточных структур-пленок, полученные методом электронного зонда поверхности трения сплава Fe+2,5%Cu+2%Гр: а – во вторичных электронах; б – в Cu K α -излучении

Fig. 3. Intermediate structures-films obtained by the electron probe method of the friction surface of alloy Fe+2.5%Cu+2%Gr: a is in secondary electrons, б is in Cu K α radiation

Согласно диаграмме состояния Fe-Cu при температуре 1150°C в γ -железе растворяется 7,5-8 мас.%, а при 20°C – около 0,2 мас.%. Поскольку пористые порошковые материалы отличаются высокой дефектностью, то в спеченных железомедных сплавах растворяется значительно больше меди, чем в литых сталях. Это подтверждают результаты изучения микроструктуры разными методами исследованного железомедного сплава, содержащего 5% Cu, после спекания при 1050 и 1150°C в течение 3 ч. Как видно из **рис. 4, а**, частица меди при твердофазном спекании частично растворилась в железе, а при жидкофазном спекании медные частицы практически полностью растворяются в порошках железа (**рис. 4, б**). По кривым интенсивности распределения меди в образцах, спеченных при 1150°C, можно сделать вывод о том, что средняя концентрация меди в закаленных после спекания образцах составляет около 5% по всему объёму, но атомы меди и железа неравномерно распределены в их частицах. Например, среднее содержание меди в частицах железа не превышает 3-4%.

Было выявлено, что концентрация графита существенно влияет на кинетику диффузионного массопереноса в системе Fe-Cu-Гр. После

жидкофазного спекания и последующего медленного охлаждения (вместе с печью) сплав Fe-5%Cu-2%Гр имеет гетерогенную структуру, состоящую из пересыщенного твёрдого раствора меди в α -железе, отдельных частиц с повышенным содержанием Cu и дисперсных включений меди, выделившихся из твёрдого раствора γ -железа при охлаждении (**рис. 5**). Если после жидкофазного спекания сплава, содержащего 5% меди, провести закалку, то в образцах не обнаружили свободных частиц меди. Однако имеются участки с более высокой концентрацией меди, которые трудно выявить на микроструктурах образцов, полученных во вторичных электронах (**рис. 5, а**), и хорошо различаются в Cu K α -излучении (**рис. 5, б**), так как имеют светлый фон.

Экспериментальные исследования показывают, что на механизм трибосинтеза промежуточных пленок влияет не только состав смазки и антифрикционного материала, но и распределение графита в нем. В присутствии графита частицы железа даже после жидкофазного спекания не везде покрываются пленкой меди. Некоторые частицы меди, окруженные графитом (светлый фон на **рис. 6, б**), практически не растворились в частицах железа.

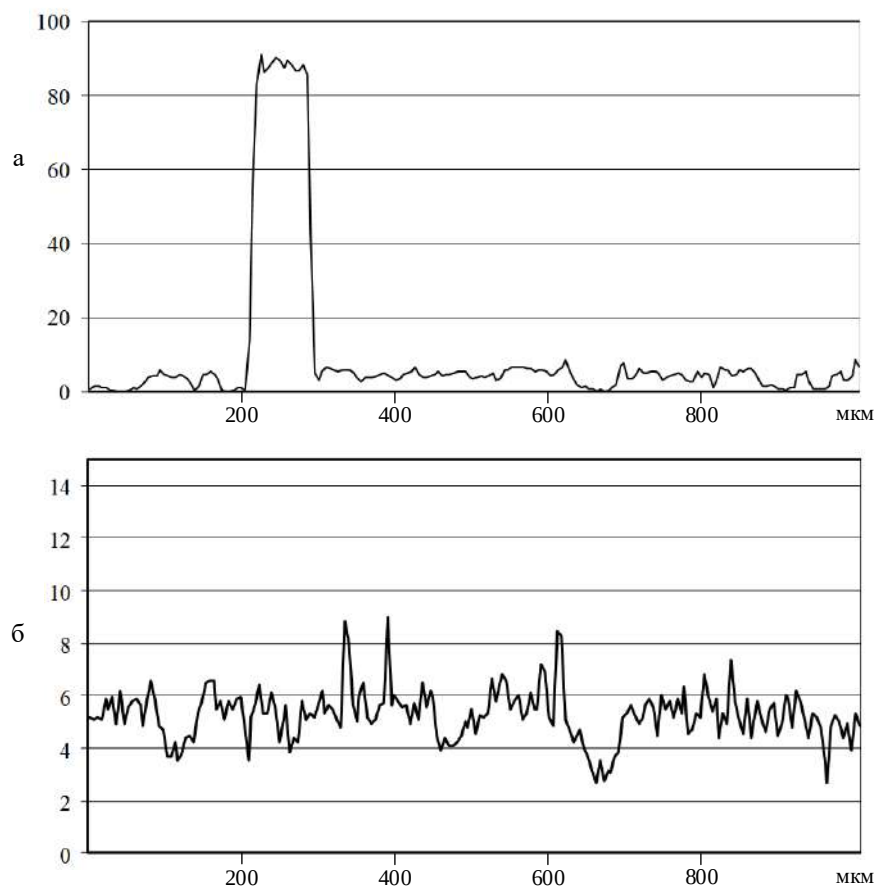


Рис. 4. Распределение Cu, ат. %, в зонах межчастичных контактов в сплаве Fe+5%Cu после твердофазного (а) и жидкофазного спекания и закалки (б)

Fig. 4. Distribution of Cu, at %, in the zones of interparticle contacts in alloy Fe+5%Cu after solid phase (a) and liquid phase sintering and quenching (б)

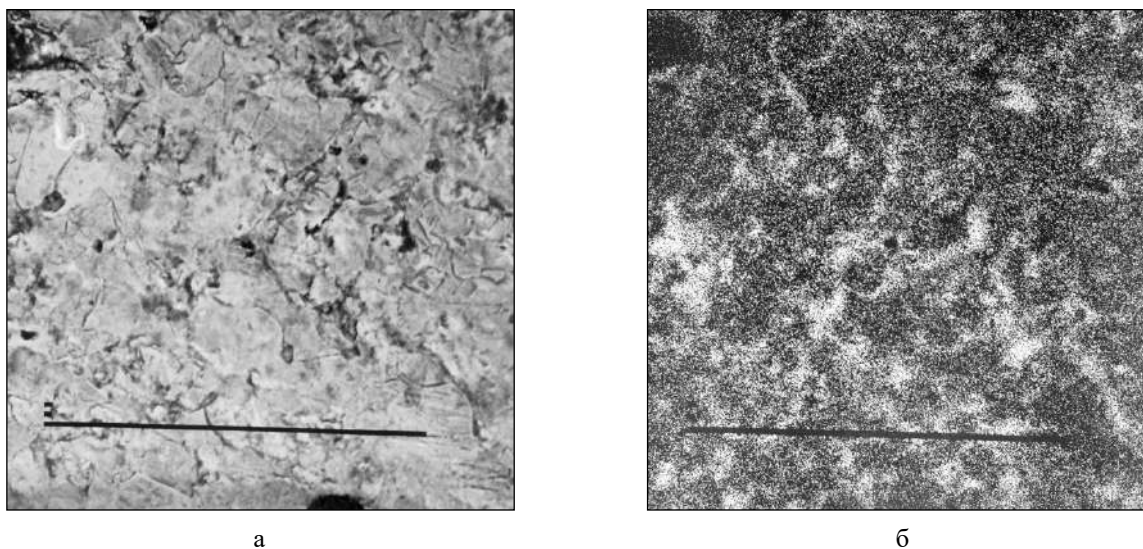
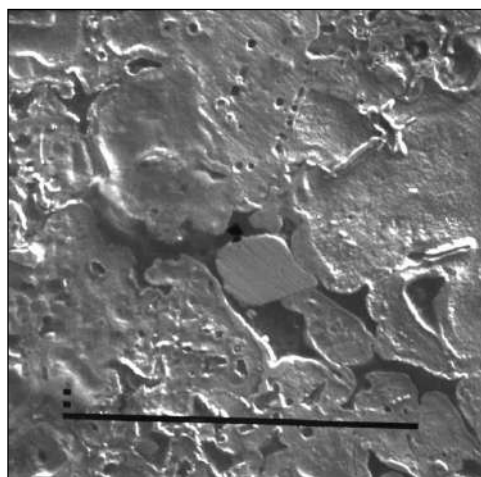
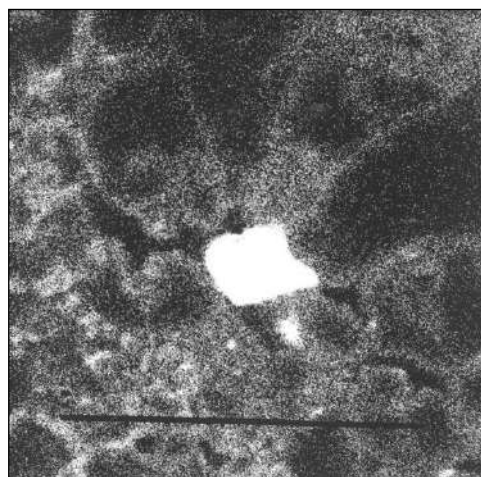


Рис. 5. Микроструктуры образцов из сплава Fe+5%Cu+2%Gr, закаленных в воде после спекания при 1150°C, снятые: а – во вторичных электронах; б – в Cu K_α-излучении

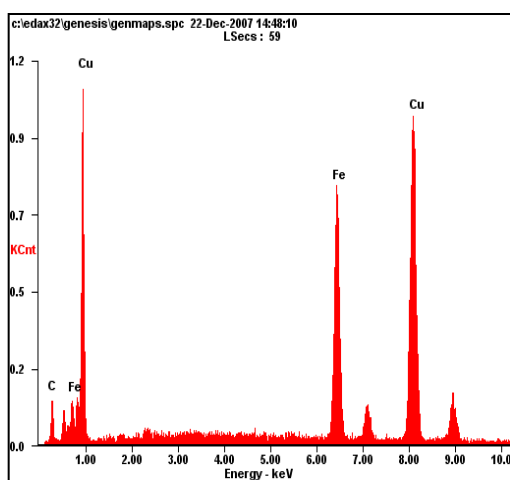
Fig. 5. Microstructures of the Fe+5%Cu+2%Gr alloy samples quenched in water after sintering at 1150°C taken: a is in secondary electrons; б is in Cu K_α radiation



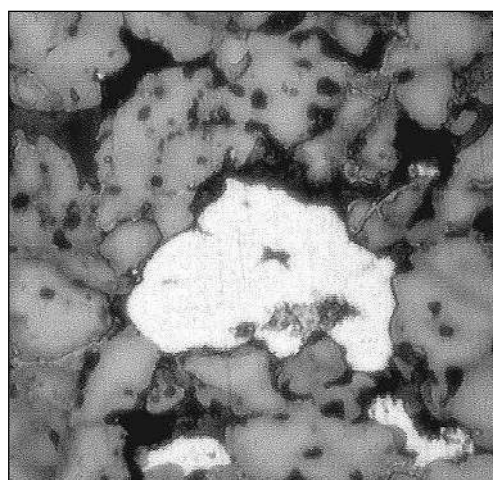
а



б



в



г

Рис. 6. Микроструктуры и распределение компонентов в закаленном сплаве Fe+5%Cu+2%Гр после жидкофазного спекания, снятые: а – во вторичных электронах; б – в Cu K α -излучении; в – на спектрометре; г – на оптическом микроскопе

Fig. 6. Microstructures and the distribution of components in quenched alloy Fe+5%Cu+2%Gr after liquid phase sintering taken: а is in secondary electrons; б is in Cu K α radiation; в is on the spectrometer; г is under the optical microscope

Экспериментально было установлено, что износостойкость спеченных и закаленных после спекания образцов из шихты, содержащего 2% Гр и 2-4% Cu, практически не отличается. Однако коэффициент трения в установившемся режиме трения у закаленных образцов составляет 0,06, что незначительно отличается по сравнению со спеченными образцами ($f = 0,04 - 0,045$). В случае повышения содержания меди в шихте более 5% у закаленных после спекания образцов коэффициент трения и интенсивность износа заметно ниже в процессе приработки. Однако продолжительность периода приработки незначительно отличается в обоих случаях, разница не

превышает погрешности измерений и составляет в среднем 8-9 мин. Нужно отметить, что в установившемся режиме коэффициент трения закаленных после спекания образцов колебался в пределах 0,06-0,065.

На рис. 7 показано влияние концентрации меди в шихте на линейный износ образцов, полученных из смеси Fe-Cu-Гр, содержащей 2% графита, после пропитки в течение 1 ч при 90°C смесью промышленного масла И-40 и раствора олеиновой кислоты в спирте в пропорции 1:1.

Анализ экспериментальных результатов показал, что в случае добавления в шихту порошка меди от 5 до 10% линейный износ I при давлении

10 МПа спеченных образцов возрастает интенсивно с 0,08 до 0,56 мм, тогда как у образцов, содержащих 10% Cu и закаленных после спекания, величина I не превышает 0,18-0,2 мм (рис. 7, кривые 1 и 2). Кроме этого время приработки закаленных образцов, содержащих более 5% Cu не превышает 13-15 мин, а у спеченных материалов такого же состава оно составляет около 50-60 мин. Такое влияние содержания меди в сплавах на износостойкость и прирабатываемость можно объяснить тем, что после твердофазного спекания структура материала отличается большим содержанием частиц свободной меди, которые имеют низкую твердость и стимулируют микро-схватывание с включениями меди, перенесенными в процессе приработки на поверхность вала из стали У8. При наличии свободной меди в спеченных железомеднографитовых композициях повышается температура в зоне трения, что влияет на синтез промежуточных структур из комплексных соединений и снижает износостойкость антифрикционных материалов.

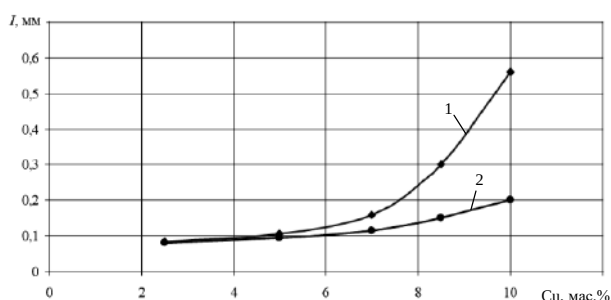


Рис. 7. Зависимости линейного износа образцов в течение 90 мин от концентрации меди в системе Fe-Cu-2%Gr после: 1 – спекания; 2 – спекания и закалки

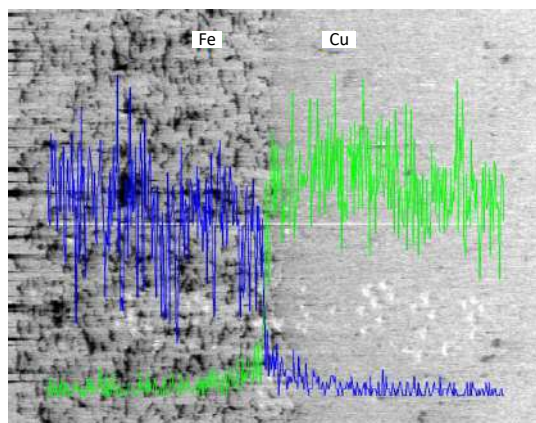
Fig. 7. Variation in linear wear of the samples during 90 min with respect to the concentration of copper in Fe-Cu-2%Gr after: 1 is sintering; 2 is sintering and quenching

Как это показано на рис. 5, в случае закалки непосредственно после спекания в структуре антифрикционного материала отсутствуют свободные включения меди, так как она практически растворяется в γ -железе и заполняет микропоры на поверхности частиц железа. Поэтому твердость матрицы закаленных сплавов, содержащих более 4-5% Cu, значительно выше, чем у спеченных материалов с аналогичной концентрацией меди, соответственно, износостойкость закаленных образцов заметно больше, чем у спеченных образцов без закалки.

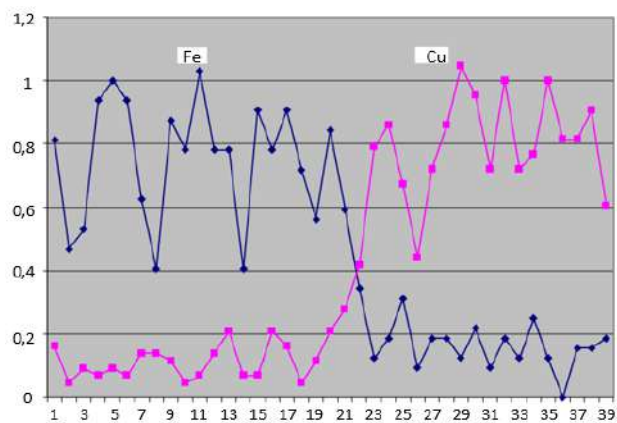
Было выявлено, что при добавлении в смазочный материал карбоновых кислот температура поверхности пар трения на начальном этапе испытания повышается достаточно интенсивно, что активизирует триботехнический синтез промежуточных структур (типа сёрфинг-пленок). В условиях установившегося режима трения температура в зоне контакта пар трения при добавлении олеиновой кислоты не превышает 40-45°C (см. рис. 2, б), что обеспечивает стабильность формирования и устойчивость синтезированных пленок, а также объясняет интенсивное снижение коэффициента трения и переход на безыносный режим трения системы. Следовательно, триботехнические свойства порошковых железомеднографитовых композиций с увеличением содержания меди повышаются, с одной стороны, в результате возрастания микротвердости матрицы, а с другой – активацией трибосинтеза промежуточных структур при добавлении в смазочный материал карбоновых кислот, активирующих синтез антифрикционных пленок в процессе трения.

Для исследования влияния химического состава на кинетику диффузионных процессов в системе Fe-Cu-Gr при спекании использовали биметаллические образцы с различным содержанием графита в слоях железа и меди. На рис. 8 приведены результаты микрорентгеноспектрального анализа в зоне диффузии (1 мм) межслойных границ образцов, спеченных при 1150°C в течение 3 ч, содержащих 5% Gr в одном случае в слое железа, а в другом – в слое меди.

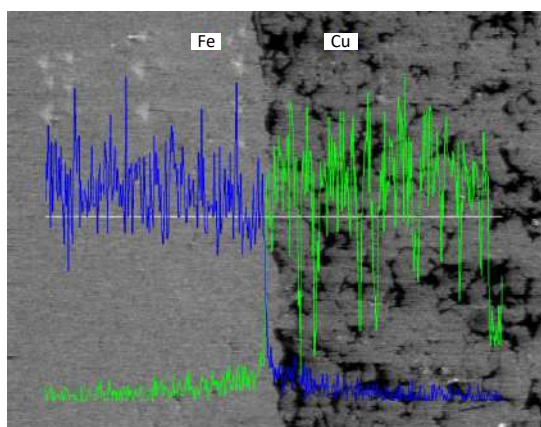
Было установлено, что углерод практически не растворяется в меди. Поэтому на рис. 8 показаны только спектры распределения меди и железа в межслойной границе двухслойных цилиндрических образцов, построенные по характеристическим линиям (рис. 8, а и в) и по количественным показателям их концентрации в исследуемых точках (рис. 8, б и г). Выявлено, что атомы меди и железа достаточно активно диффундируют через межслойные границы и компоненты взаимно растворяются в частицах их порошков. Нужно отметить, что атомы Cu диффундируют в слой из порошка железа без добавок графита на глубину до 110-120 мкм (рис. 8, а и б), тогда как в паре Cu-Fe+5%Gr содержание Cu на расстоянии 10 мкм от начальной границы не превышает 10-15 ат.%, а глубина ее диффузии менее 80-90 мкм (рис. 8, в и г).



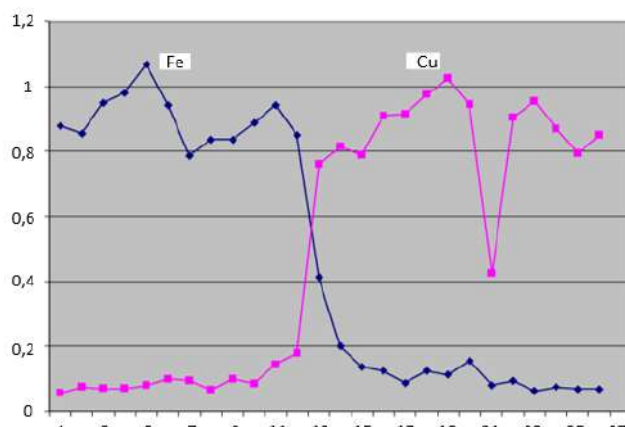
а



б



в



г

Рис. 8. Распределение меди и железа на межслойных границах диффузионных пар:

а, б – Fe+5%Гр-Cu; в, г – Fe-Cu+5%Гр

Fig. 8. Distribution of copper and iron at interlayer boundaries of diffusion pairs:

а, б is Fe+5%Gr-Cu; в, г is Fe-Cu+5%Gr

Из этого следует, что при добавлении в шихту графита частицы железа частично плакируются слоем графита, что влияет на коэффициенты взаимной диффузии меди и железа. Поскольку медь является графитизирующим элементом, то тонкий слой графита на частицах железа может также блокировать диффузию меди в частицы железа. Поскольку поверхность частиц железа хорошо смачивается жидкой медью, то при отсутствии графита в результате действия капиллярных сил (сил поверхностного натяжения) в процессе жидкофазного спекания жидкие включения Cu интенсивно растекаются по свободным сообщающимся порам и поверхности частиц железа. В результате этого концентрация и глубина диффузии атомов меди в слой железа существенно больше, чем в слой железа с добавками графита.

Как видно из **рис. 8**, медь и железо в порошковых сплавах растворяются друг в друге неравномерно, что исключает использование методов

Мотано или Любова и Максимова для определения коэффициентов их взаимной диффузии в пористых системах ($\tilde{D}_n$). Поэтому экспериментальные концентрационные кривые сглаживали широко используемыми способами.

Результаты расчетов коэффициентов $\tilde{D}_n$ позволяют сделать вывод о том, в диффузионной паре Cu-Fe без добавления в шихту графита коэффициент взаимной диффузии в слоистых образцах пористостью в пределах 18-20% с повышением содержания меди в шихте с 10 до 50 ат.% интенсивно снижается с $27 \cdot 10^{-12}$ до $11 \cdot 10^{-11}$ м²/с, а далее практически не изменяется (**рис. 9, кривая 1**). Следовательно, с увеличением концентрации Cu объемная доля железа в шихте снижается, соответственно, уменьшается доля диффузионного массопереноса по поверхности частиц железа, зависящего не только от свободной поверхности пор, но и от ее дефектности.

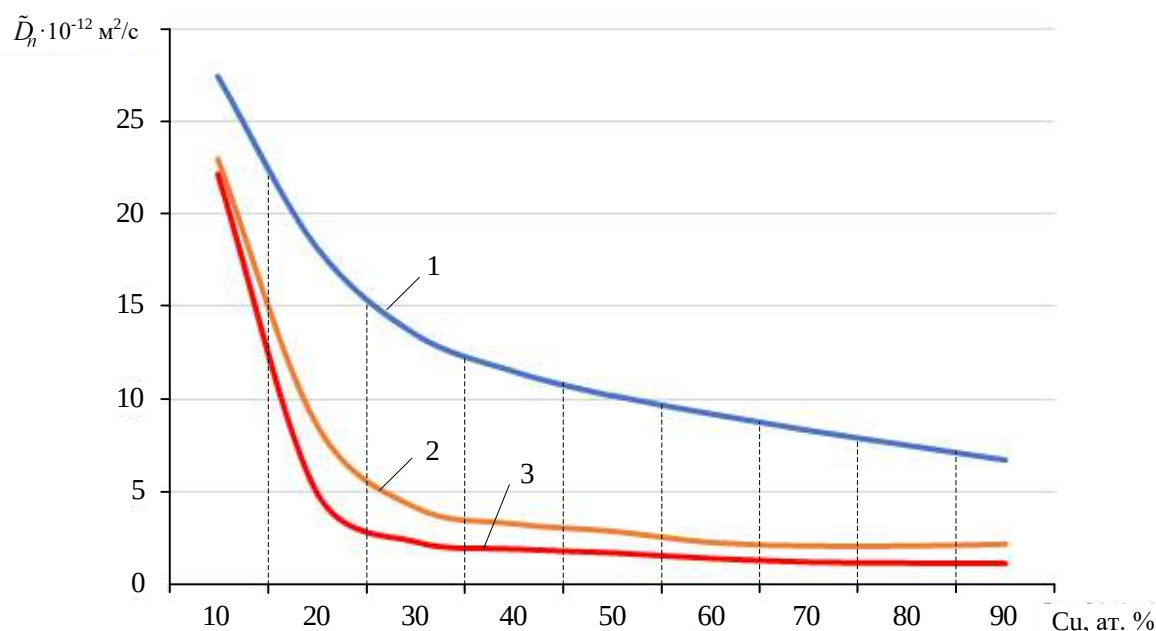


Рис. 9. Значения коэффициентов взаимной диффузии от концентрации Cu системы Fe+Gr-Cu при содержании в слое из порошка железа графита, мас. %: 1 – 0; 2 – 2,5; 3 – 5

Fig. 9. Coefficients of mutual diffusion from the Cu concentration of Fe+Gr-Cu at content in the layer of iron graphite powder, % wt.: 1 is 0; 2 is 2.5, 3 is 5

Расчеты показали, что в беспористой системе Fe-Cu при температуре 1050°C химический коэффициент диффузии (гетеродиффузии) железа в медь D_{Fe}^{Cu} составляет $7,1 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2/\text{с}$, а меди в железе – $D_{Cu}^{Fe} = 2,5 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2/\text{с}$; при температуре 1150°C коэффициенты $D_{Fe}^{Cu} = 8,2 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2/\text{с}$, $D_{Cu}^{Fe} = 1,2 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2/\text{с}$. Подставляя приведенные значения химических коэффициентов диффузии в уравнение Даркена ($D_c = D_{Fe}^{Cu} \cdot C_{Fe} + D_{Cu}^{Fe} \cdot C_{Cu}$), определяли коэффициент взаимной диффузии при 1150°C для беспористых систем Fe-Cu при различных концентрациях меди (C_{Cu}) и железа (C_{Fe}). Например, для сплава, содержащего 20% меди, расчетное значение коэффициента диффузии составил $D_c = 6,8 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2/\text{с}$.

Сравнивая полученные данные, можно сделать вывод о том, что в пористых системах Fe-Cu аналогичного состава коэффициенты взаимной диффузии на полтора, два порядка выше, чем в беспористых сплавах.

В случае добавления в порошок железа 5% графита коэффициент взаимной диффузии существенно ниже, чем в паре без графита при любой концентрации меди (рис. 9, кривые 2 и 3). Например, при содержании 5% графита в шихте из порошков железа $\tilde{D}_n$ снижается почти в 10

раз. Это связано с тем, что при приготовлении шихты в конусном смесителе частицы порошков железа обволакиваются графитом, уменьшая площадь металлического контакта между их частицами железа. Кроме этого, графит, по-видимому, снижает коэффициент поверхностного натяжения железа и меди.

Нужно отметить, что величины $\tilde{D}_n$, приведенные на рис. 9, можно использовать для качественной оценки процесса массопереноса при спекании исследованных порошковых систем, а также определить концентрацию меди в твердом растворе в γ -железе в неравновесных системах при различных режимах спекания сплавов на основе Fe-Cu-Gr.

Закключение

1. Отличительной особенностью порошковых сплавов на основе Fe-Cu-Gr и Fe-Br-Gr является существенное снижение времени приработки в парах трения в случае введения в состав пропитываемых смазочных материалов карболовых кислот. В частности, время приработки у образцов из этих сплавов с пористостью 18-22% составляло 6-8 мин, тогда как без ПАВ оно превышает 30-40 мин. Для компактных сплавов (бронз, чугунов и др.) время приработки в 10-15 раз больше, чем у порошковых материалов.

2. Закалка после спекания железомеднографитовых композиций несколько повышает коэффициент трения, значительно снижает время приработки и износ антифрикционных порошковых материалов на основе железа с добавками меди до 8-10%, незначительно снижает износ для материалов с содержанием меди менее 5% и практически не влияет на время их приработки.

3. Показано влияние графита в порошковых сплавах Fe-Cu-Gr на механизмы диффузионного массопереноса меди, что позволяет определить распределение меди в спеченных антифрикционных материалах и прогнозировать их структурообразование и свойства изделий из них. Выявлено, что графит блокирует диффузию меди в частицы железа и способствует увеличению содержания свободной меди, отрицательно влияющей на триботехнические свойства материала.

Список источников

1. Кужаров А.С. Концепция безызносности в современной трибологии // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. 2014. № 2. С. 23-31.
2. Гаркунов Д.Н. Триботехника (износ и безызносность). М.: Изд-во МСХА, 2001. 616 с.
3. Трибозлектрохимия эффекта безызносности при трении. Механизм формирования граничных слоев на стали в самоорганизующейся трибосистеме «медь – глицерин – сталь» / Кужаров А.С., Бурлакова В.Е., Зодошенко Е.Г., Марчак Р., Кравчик К. // Трение и износ. 1998. Т.19. №6. С. 768-778.
4. Clasen C., Ravehpour H.P. and McRinley G.H. Bridging Tribology and Microrheology of Thin Films // Appl. Rheol. 2010, vol. 20, p. 45049.
5. Поляков С.А. Теоретический анализ основных механизмов эволюции трибосистем при избирательном переносе // Долговечность трущихся деталей машин: сб. тр. М.: Машиностроение, 1988. С. 3-26.
6. Kajita S., Tohyama M., Washizu H. Friction Modification by Shifting of Phonon energy Dissipation in Solid Atoms // Tribology Online. 2015, vol.10, no. 2, pp. 156-161.
7. Заславский Ю.С. Трибология смазочных материалов. М.: Химия, 1991. 240 с.
8. Бурлакова В.Е., Дроган Е.Г. Влияние концентрации органической кислоты в составе смазки на трибологические характеристики пары трения // Вестник Донского государственного технического университета. 2019. Т.19. №1. С. 24-30.
9. Кужаров А.С., Марчак Р. Особенности эволюционного перехода трибологической системы латунь – глицерин – сталь в режим безызносного трения // Докл. РАН. 1997. Т. 354. №5. С. 642-644.
10. Kragelsky I.V., Alisin V.V. Friction wear lubrication: tribology handbook. Elsevier. 2016. P. 263.
11. Гасанов Б.Г., Азаренков А.А. Порошковые антифрикционные материалы и смазки для самоорганизующихся узлов трения // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. 2004. Спецвыпуск. С. 118-123.
12. Курбаткин И.И., Кудряшов А.Е. Трибологические характеристики антифрикционных сплавов и процессы массопереноса при работе контактных пар в подшипниках скольжения // Трение и износ. 2011. Т. 36. №6. С. 579-584.
13. Кужаров А.С. Физико-химические основы смазочного действия в режиме избирательного переноса // Эффект безызносности и триботехнологии. 1992. №2. С. 3-14.

References

1. Kuzharov A.S. The concept of wearlessness in modern tribology. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Tekhn. nauki* [News of Higher Educational Institutions: North Caucasian Region. Series: Engineering Sciences]. 2014;(2):23-31. (In Russ.)
2. Garkunov D.N. *Tribotekhnika (iznos i bezyznosnost)* [Tribotechnology (wear and wearlessness). Moscow: Publishing House of Moscow Agricultural Academy, 2001, 616 p. (In Russ.)
3. Kuzharov A.S., Burlakova V.E., Zodoshenko E.G., Marchak R., Kravchik K. Tribo-electrochemistry of the effect of wearlessness during friction. The mechanism of formation of boundary layers on steel in a self-organizing tribosystem “copper – glycerin – steel”. *Trenie i iznos* [Friction and Wear]. 1998;19(6):768-778. (In Russ.)
4. Clasen C., Ravehpour H.P., McRinley G.H. Bridging tribology and microrheology of thin films. *Appl. Rheol.* 2010;20:45049.
5. Polyakov S.A. A theoretical analysis of main mechanisms of the evolution of tribosystems during selective transfer. *Dolgovechnost trushchikhsya detaley mashin: sb. trudov* [Durability of rubbing machine parts: collected papers]. Moscow: Mashinostroenie, 1988, p. 3-26. (In Russ.)
6. Kajita S., Tohyama M., Washizu H. Friction modification by shifting of phonon energy dissipation in solid atoms. *Tribology Online.* 2015;10(2):156-161.
7. Zaslavsky Yu.S. *Tribologiya smazochnykh materialov* [Tribology of lubricants]. Moscow: Khimiya, 1991, 240 p. (In Russ.)
8. Burlakova V.E., Droган E.G. Influence of the concentration of organic acid in the composition of the lubricant on the tribological characteristics of a friction pair. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Vestnik of Don State Technical University]. 2019;19(1):24-30. (In Russ.)
9. Kuzharov A.S., Marchak R. Peculiarities of the evolutionary transition of the brass-glycerin-steel tribological system to the wear-free friction mode. *Doklady RAN* [Reports of the Russian Academy of Sciences]. 1997;354(5):642-644. (In Russ.)

10. Kragelsky I.V., Alisin V.V. Friction wear lubrication: tribology handbook. Elsevier, 2016, p. 263
11. Gasanov B.G., Azarenkov A.A. Powder antifriction materials and lubricants for self-organizing friction units. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Tekhn. nauki* [News of Higher Educational Institutions: North Caucasian Region. Series: Engineering Sciences]. 2004;(special issue):118-123. (In Russ.)
12. Kurbatkin I.I., Kudryashov A.E. Tribological characteristics of antifriction alloys and mass transfer processes during the operation of contact pairs in plain bearings. *Trenie i iznos* [Friction and Wear]. 2011;36(6):579-584. (In Russ.)
13. Kuzharov A.S. Physical and chemical bases of the lubricating action in the selective transfer mode. *Effekt bezyznosnosti i tribotekhnologii* [Effect of wearlessness and tribotechnology]. 1992;(2):3-14. (In Russ.)

Поступила 20.02.2023; принята к публикации 26.04.2023; опубликована 27.06.2023
Submitted 20/02/2023; revised 26/04/2023; published 27/06/2023

Гасанов Бадрудин Гасанович – доктор технических наук, профессор, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, Новочеркасск, Россия. Email: gasanov.bg@gmail.com. ORCID 0000-0001-7610-4541

Азаренков Андрей Александрович – кандидат технических наук, доцент, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, Новочеркасск, Россия. Email: hazikus@mail.ru. ORCID 0000-0003-0687-6751

Харченко Евгений Вячеславович – старший преподаватель, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, Новочеркасск, Россия. Email: hariton_n@mail.ru. ORCID 0000-0003-1884-6437

Панчвидзе Георгий Гелаевич – аспирант, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, Новочеркасск, Россия. Email: gelapan15@yandex.ru.

Badrudin G. Gasanov – DrSc (Eng.), Professor, Platov South Russian State Polytechnic University (Novocherkassk Polytechnic Institute), Novocherkassk, Russia. Email: gasanov.bg@gmail.com. ORCID 0000-0001-7610-4541

Andrey A. Azarenkov – PhD (Eng.), Associate Professor, Platov South Russian State Polytechnic University (Novocherkassk Polytechnic Institute), Novocherkassk, Russia. Email: hazikus@mail.ru. ORCID 0000-0003-0687-6751

Evgeniy V. Kharchenko – Senior Teacher, Platov South Russian State Polytechnic University (Novocherkassk Polytechnic Institute), Novocherkassk, Russia. Email: hariton_n@mail.ru. ORCID 0000-0003-1884-6437

Giorgiy G. Panchvidze – postgraduate student, Platov South Russian State Polytechnic University (Novocherkassk Polytechnic Institute), Novocherkassk, Russia. Email: gelapan15@yandex.ru.

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.926.3
DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-2-127-136



К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ КОНУСНОЙ ДРОБИЛКИ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ ОБЪЕМНОГО ГИДРОПРИВОДА

Калянов А.Е.¹, Чернухин С.А.¹, Великанов В.С.^{1,2}

¹ Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия

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

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). В статье представлены результаты проведенного анализа причин простоев конусных дробилок мелкого дробления. На основе этих результатов выявлена основная причина – попадание недробимых предметов в камеру дробления. Исключение проблемы заклинивания дробилки в случае попадания недробимых предметов является одним из главных направлений в совершенствовании конусных дробилок. Решение предоставленной задачи даст возможность в значительной мере увеличить производительность машины за счет увеличения срока службы броней подвижного и неподвижного конусов и исключения остановки рабочего процесса дробления. **Цель работы.** В исследовании предпринимается попытка разработки конструктивных решений, позволяющих повысить производительность конусной дробилки за счет минимизации простоев. **Используемые методы.** Для достижения цели работы описана математическая модель траектории движения недробимого предмета по камере дробления конусной эксцентриковой дробилки мелкого дробления. **Новизна.** Исследована траектория движения недробимого предмета в камере дробления конусной дробилки мелкого дробления. Разработана методика, позволяющая установить рациональные параметры системы защиты узлов машины при попадании в рабочее пространство дробилки недробимого предмета. **Результат.** Представлен алгоритм построения модели траектории движения недробимого предмета в камере дробления конусной дробилки. Приведена принципиальная гидравлическая схема, которая дает возможность обеспечения защиты узлов конусной дробилки от негативных воздействий при попадании в рабочее пространство недробимого предмета, а также позволяет осуществить очистку камеры дробления от завала или недробимых предметов. **Практическая значимость.** Внедрение разработок, представленных в данной работе, позволит минимизировать простои конусной дробилки, увеличить срок службы оборудования, снизить стоимость содержания машины.

Ключевые слова: конусная дробилка, недробимый предмет, математическая модель, гидропривод, гидравлическая схема, алгоритм, повышение эффективности

© Калянов А.Е., Чернухин С.А., Великанов В.С., 2023

Для цитирования

Калянов А.Е., Чернухин С.А., Великанов В.С. К вопросу повышения эффективности работы конусной дробилки за счет применения объемного гидропривода // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №2. С. 127-136. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-2-127-136>



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

INCREASING PERFORMANCE EFFICIENCY OF A CONE CRUSHER BY USING A FLUID POWER DRIVE

Kalyanov A.E.¹, Chernukhin S.A.¹, Velikanov V.S.^{1,2}

¹ Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia

² Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The paper presents the analysis of the causes for downtime of cone fine crushers. The results revealed a main cause, namely uncrushable materials entering the crushing chamber. Avoiding a crusher jamming in case of too hard rock is one of the main areas of improving cone crushers. A solution to this problem will significantly increase the machine performance by increasing the service life of the armor of the movable and fixed cones and eliminating the shutdown of the crushing process. **Objectives.** The study attempts to develop design solutions to increase the cone crusher performance by minimizing downtime. **Methods Applied.** To achieve the objective of the study, we described a mathematical model of the motion trajectory of uncrushable materials along the crushing chamber of a cone eccentric fine crusher. **Originality.** The authors studied the motion trajectory of an uncrushable material in the crushing chamber of the cone fine crusher, and developed a technique to identify rational parameters of the crushing chamber protection system for uncrushable materials in the operating area of the crusher. **Result.** The paper presents an algorithm for designing a model of the motion trajectory of the uncrushable material in the crushing chamber of the cone crusher. A hydraulic circuit diagram was developed to protect the cone crusher units against the negative impact of uncrushable materials on the chamber and clean the crushing chamber from the overflow or uncrushable materials. **Practical Relevance.** By introducing the development presented in this paper we can minimize the downtime of the cone crusher, increase the service life of the equipment, and reduce the machine maintenance cost.

Keywords: cone crusher, uncrushable material, mathematical model, hydraulic drive, hydraulic circuit diagram, algorithm, improvement of efficiency

For citation

Kalyanov A.E., Chernukhin S.A., Velikanov V.S. Increasing Performance Efficiency of a Cone Crusher by Using a Fluid Power Drive. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 2, pp. 127-136. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-2-127-136>

Введение

Конусные дробилки нашли широкое применение в рудной и в меньшей степени нерудной промышленности. В основном применяются для получения щебня, подготовки сырья для цементных мельниц, искусственного песка, производства химического сырья. Конусные дробилки предназначены для крупного, среднего и мелкого дробления и имеют соответствующую классификацию: ККД – крупного дробления, КСД – среднего дробления, КМД – мелкого дробления, которые отличаются между собой узлами, образующими дробящее пространство.

В конусных дробилках дробление материала происходит в рабочем пространстве (далее – камера дробления), образованном между поверхностями наружного неподвижного и внутреннего подвижного конусов [1].

Разрушение материала осуществляется в камере дробления, образованной бронями дробящего конуса и неподвижной чаши. Материал разрушается в результате действия сжимающих,

изгибающих и истирающих нагрузок [2].

Для получения более однородного по крупности дробленого продукта время движения куса дробимого материала в параллельной зоне конусной дробилки должно быть не меньше времени одного оборота дробящего конуса. Если это условие выполняется, то каждый кусок дробимого материала будет зажат в параллельной зоне не менее одного раза.

Процесс дробления происходит непрерывно, при этом зона дробления перемещается последовательно по окружности конусов, что способствует более равномерной нагрузке механизма и двигателя дробилки. Размер наибольших кусков, которые могут быть загружены в дробилку, определяется шириной загрузочного отверстия [3].

Низкая степень дробления конусных дробилок объясняется использованием в качестве приводного элемента подвижного эксцентрикового конуса, который ограничивает амплитуду конструктивно заданным смещением своей оси относительно оси вращения. Поэтому слой материала не может быть деформирован на величину, боль-

шую величины установленного зазора между конусами, что обеспечивает низкую степень дробления. В дробилках с диаметром подвижного конуса 2200 мм толщина слоя материала в разгрузочной зоне не может быть менее 10 мм. Это объясняется тем, что брони неподвижного и подвижного конусов имеют эллиптичность и неконцентричность, которые после механической обработки не должны превышать соответственно 0,05 и 0,1% диаметра броней у основания [3, 4].

Материалы и методы исследования

Одной из наиболее важных задач улучшения конструкции конусных дробилок стало решение проблемы заклинивания дробилки в случае попадания недробимого предмета [3].

Наиболее широкое применение получили дробилки с гидравлическим регулированием разгрузочной щели. Это позволило упростить настройку размера продукта на выходе (фракции), а также использовать гидравлику в качестве предохранителя (компенсатора) от перегрузок, возникающих при попадании в камеру дробления недробимого предмета [3, 5].

По результатам анализа конусных дробилок по конструктивным схемам определены основные задачи – повышение производительности за счет увеличения срока службы броней подвижного и неподвижного конусов, исключение остановки рабочего процесса дробления при попадании в камеру дробления недробимого предмета.

При возникновении в пространстве дробления недробимого предмета, после сокращения расстояния между конусом и чашей до величины недробимого предмета конус через тело будет воздействовать на чашу, тем самым переместит чашу, опорное кольцо, а также связанные с ним элементы на некий угол. При последующем повороте втулки эксцентрика одновременно с отходом конуса от закрытого состояния произойдет опускание пружинами опорного кольца, броня чаши будет совершать движения, аналогичные движению броне конуса, и не позволит высвободить недробимый предмет из зажатого состояния.

В момент заклинивания между рабочими поверхностями дробилки недробимого предмета происходит его внедрение в броню чаши или конуса. При дальнейшем совершении рабочего хода подвижной части дробилки недробимый предмет будет постепенно разрушать броню чаши и конуса, что в дальнейшем приведет к полному износу брони и аварийной остановке дробилки.

Наличие недробимого материала в рабочем пространстве дробилки будет снижать ее производительность и ухудшать грансостав, так как в области заклинившего недробимого тела материал перестает дробиться [6].

Для снижения разрушающего эффекта броней от попадания недробимого материала в область дробления предлагается следующая методика. После отклонения конусом опорного кольца происходит фиксация в данном положении на заданный интервал времени. Чаша брони совместно с кольцом остается в отклоненном положении, такое расположение позволит недробимому предмету беспрепятственно высвободиться из области дробления в момент отхода конуса от чаши. При продвижении вниз по камере дробления разгрузочная щель становится меньше, таким образом, появляется вероятность повторного зажатия недробимого предмета и отклонение опорного кольца на больший угол. При возникновении повторного зажатия опорное кольцо повторно фиксируется.

На отечественных конусных дробилках среднего и мелкого дробления в качестве прижимных элементов наиболее широкое применение нашли пакеты пружин, фиксация которых затруднительна. Поэтому предлагается использовать гидроцилиндры вместе с гидропневмоаккумуляторами. В этом случае фиксация осуществляется системой управления, которая с помощью переключения гидрораспределителя в положение, запирающее полости гидроцилиндра, обеспечивает фиксацию опорного кольца в открытом положении на заданный промежуток времени.

С целью создания (написания) методики было проведено математическое моделирование рабочих процессов в конусной дробилке с учетом траектории движения недробимого материала по камере дробления. Смысл методики заключается в следующем.

За нейтральное положение принимается положение конуса в тот момент, когда ось конуса совпадает с осью дробилки.

Закрытым положением камеры дробления считается момент максимального приближения брони конуса к броне чаши.

При достижении наибольшего расстояния между броней конуса и броней чаши положение камеры дробления считается открытым.

В основе модели движения недробимого предмета лежит набор математических выражений и алгоритм их решения задач по определению траек-

тории движения недробимого предмета и положения элементов дробилки в любой момент времени.

Моделирование траектории движения недробимого предмета в рабочем пространстве дробилки даст возможность проведению исследований в целях определения параметров и разработки систем защиты.

За счет применения в конструкции дробилки

эксцентрикового конуса осуществляется колебание конуса по сферической опорной поверхности, имеющей радиус R , таким образом обеспечивается изменение объема камеры.

С целью отображения протекания рабочих процессов в конусной дробилке представлена расчетная схема, которую традиционно изображают разрезом в вертикальной плоскости (рис. 1) [6, 7].

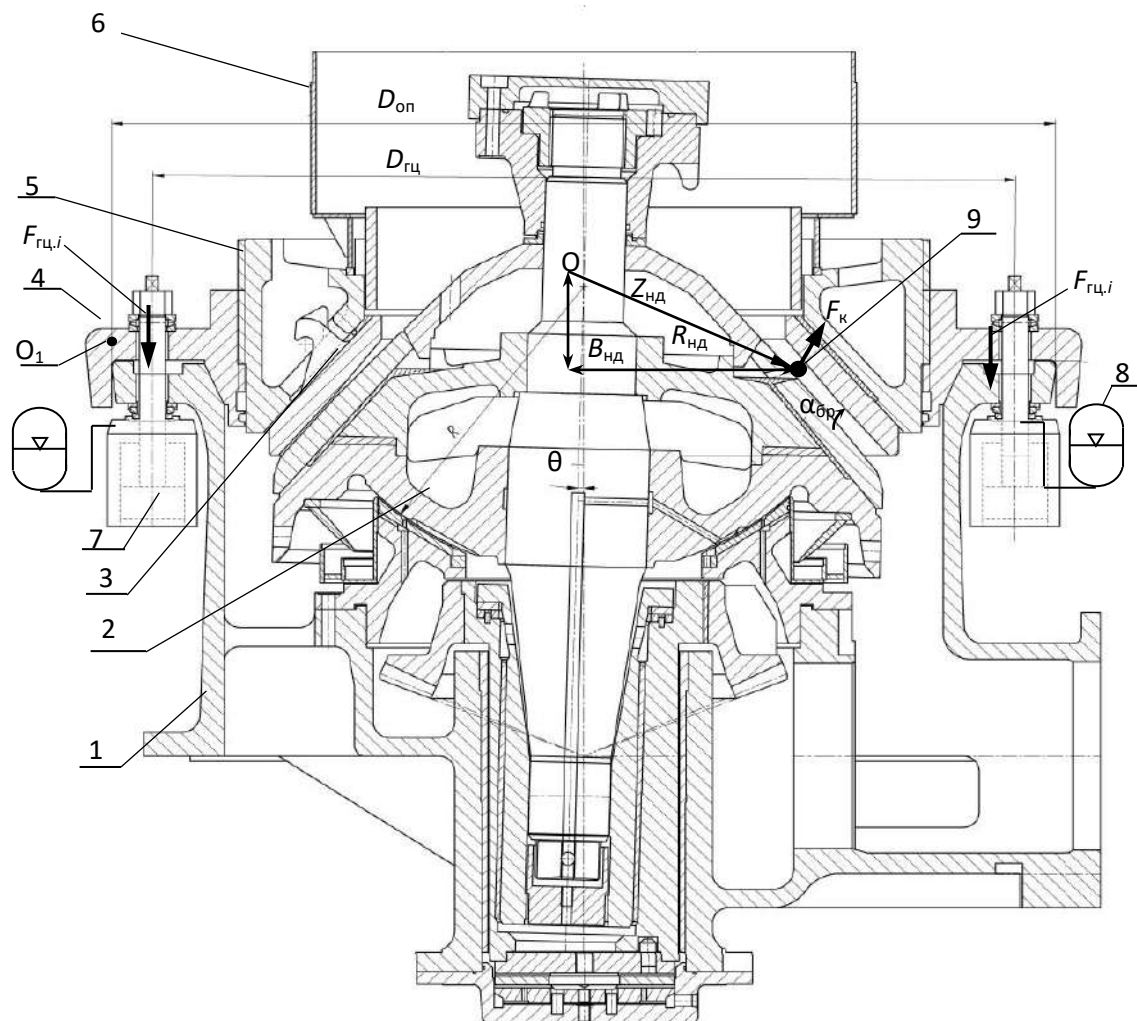


Рис. 1. Схема для расчета параметров: 1 – корпус дробилки; 2 – конус; 3 – броня чаши; 4 – кольцо опорное; 5 – кольцо регулирующее; 6 – загрузочная часть; 7 – гидроцилиндры; 8 – гидропневмоаккумуляторы; 9 – недробимое тело; $D_{оп}$ – диаметр опорного кольца; $D_{гц}$ – диаметр расположения штоков гидроцилиндров; $R_{нд}$ – радиус от точки подвеса до недробимого тела; O – условная точка подвеса (центр кривизны опорной поверхности конуса); O_1 – точка поворота кольца опорного; $F_{гц,i}$ – усилие на i -м штоке гидроцилиндра; F_k – усилие, передаваемое через недробимое тело от конуса на броню чаши; θ – угол нутации

Fig. 1. A schematic diagram for calculating the parameters: 1 is a crusher body; 2 is a cone; 3 is a bowl armor; 4 is a support ring; 5 is an adjusting ring; 6 is a charging unit; 7 are hydraulic cylinders; 8 are hydro-pneumatic accumulators; 9 is an uncrushable body; $D_{оп}$ is a diameter of the support ring; $D_{гц}$ is a diameter of the location of hydraulic cylinders rods; $R_{нд}$ is radius from the suspension point to the uncrushable body; O is a conditional point of suspension (center of curvature of the cone support surface); O_1 is a pivot point of the support ring; $F_{гц,i}$ is force at the i -th rod of the hydraulic cylinder; F_k is force transmitted through the uncrushable body from the cone to the bowl armor; θ is a nutation angle

Полученные результаты и их обсуждение

Для выявления самого эффективного и безопасного способа пропуска недробимого предмета напишем математическую модель траектории движения недробимого предмета по камере дробления и оценим взаимодействие узлов дробилки [8].

Траектория прохождения недробимого предмета с момента попадания в камеру дробления зависит от скорости:

$$v = \frac{dH}{dt}, \quad (1)$$

где H – путь с начала движения за время t , м.

В момент падения недробимого предмета расстояние до брони конуса устанавливается по координате y точки под недробимым предметом (рис. 2) [8, 9]. С целью выявления этой координаты в уравнение линии брони конуса требуется подставить координату x_k недробимого предмета.

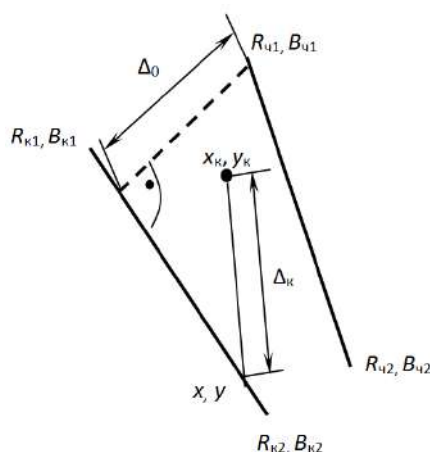


Рис. 2. Схема к расчету процесса падения недробимого предмета

Fig. 2. A schematic diagram for calculating the falling process of the uncrushable body

Уравнение линии брони конуса в зоне дробления [9]:

$$y_k = B_{k2} - \operatorname{tg} \gamma_{k1} \cdot (R_{k2} - x_k), \quad (2)$$

где B_{k2} – расстояние по вертикали от точки подвеса конуса до i -й точки брони конуса в процессе работы, м.

Расстояние от текущего положения недробимого предмета до брони:

$$\Delta_k = y_k - y. \quad (3)$$

Для нахождения момента встречи с броней требуется рассмотреть движение конуса.

Угол поворота эксцентрика конуса с начала движения

$$\Psi = \Psi_H + \int_0^T \omega \cdot dt, \quad (4)$$

где ω – угловая скорость вращения вала конуса, град; Ψ_H – угол поворота эксцентрика в начальном положении недробимого предмета, град.

Отклонение конуса от закрытого положения

$$\Theta_T = \Theta \cdot (1 - \cos \Psi). \quad (5)$$

Начальная составляющая скорости движения недробимого предмета по броне после завершения падения (рис. 3):

$$v_{\text{бн}} = \frac{v_T}{\cos \beta} + v_B \cdot \sin \beta, \quad (6)$$

где v_T – горизонтальная составляющая скорости перед соприкосновением с броней; v_B – вертикальная составляющая; β – угол наклона брони конуса к горизонту в зависимости от положения недробимого предмета, $\beta = \gamma_{k1} \pm \Theta_T$ или $\beta = \gamma_{k2} \pm \Theta_T$.

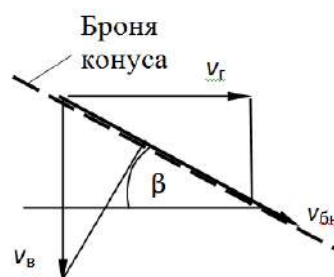


Рис. 3. Схема к определению скорости движения недробимого предмета по броне

Fig. 3. A schematic diagram for determining the velocity of the uncrushable body on the armor

Дальнейшее изменение скорости вдоль брони конуса определяется по уравнению движения:

$$F_{\text{дв}} - F_c = m \cdot \frac{dv_{\text{бн}}}{dt}, \quad (7)$$

где m – масса недробимого предмета, кг; $\frac{dv_{\text{бн}}}{dt}$ –

ускорение движения недробимого предмета вдоль брони, м/с²; $F_{\text{дв}}$ – движущее усилие, действующее на недробимый предмет при его движении по броне, Н (рис. 4),

$$F_{\text{дв}} = m \cdot g \cdot \sin \beta; \quad (8)$$

F_c – усилие сопротивления от трения при скольжении недробимого предмета, Н,

$$F_c = m \cdot g \cdot \cos \beta \cdot f_{\text{тр}}. \quad (9)$$

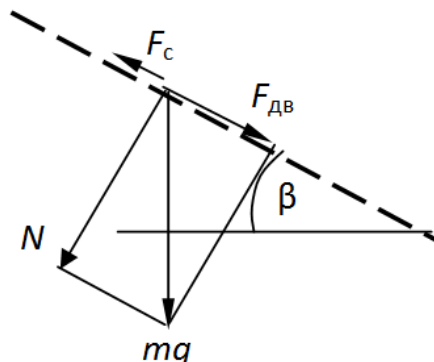


Рис. 4. Схема к определению сил, действующих на недробимый предмет

Fig. 4. A schematic diagram for determining the forces acting on the uncrushable body

Подставив выражения расчета усилий, получим:

$$g(\sin \beta - \cos \beta \cdot f_{\text{тр}}) = \frac{dv_6}{dt}. \quad (10)$$

При решении на ЭВМ выражение преобразуется в численный вид с использованием метода Эйлера:

$$v_6 = v_6 + g(\sin \beta - \cos \beta \cdot f_{\text{тр}}) \cdot \Delta t, \quad (11)$$

где Δt – шаг интегрирования.

Путь перемещения куска вдоль брони конуса определится при интегрировании скорости:

$$L_6 = \int v_6 \cdot dt. \quad (12)$$

При прохождении недробимого предмета вдоль брони следует определять момент его зажатия между броней конуса и чаши. Расчет необходимо осуществлять, когда расстояние между бронями Δ_r достигнет значения размера недробимого предмета d . Пока пространство между рабочими поверхностями больше размера недробимого предмета, он будет беспрепятственно перемещаться по броне.

Для нахождения расстояния между рабочими поверхностями требуются координаты недробимого предмета в рассматриваемый момент времени. Они также могут быть определены при численном интегрировании скорости движения недро-

бимого предмета вдоль брони с использованием его предыдущего положения по выражениям [8, 9]:

$$x_k = z_{k1} + (L_6 + v_6 \cdot \Delta t) \cdot \cos \beta; \quad (13)$$

$$y_k = z_{k1} + (L_6 + v_6 \cdot \Delta t) \cdot \sin \beta, \quad (14)$$

где z_{k1} – радиус-вектор от оси подвеса до начала брони конуса; L_6 – длина линии от начала брони конуса до предыдущего положения недробимого предмета, отстающего от рассматриваемого на шаг интегрирования Δt .

Падение и скольжение по броне недробимого предмета будет проходить до тех пор, пока расстояние между бронями Δ_r больше толщины тела $d_{\text{нд}}$. Расстояние между бронями определится при совместном решении уравнения перпендикуляра к броне конуса и уравнения линии брони чаши. В результате такого решения определятся координаты точки пересечения этих отрезков x_6, y_6 (рис. 5).

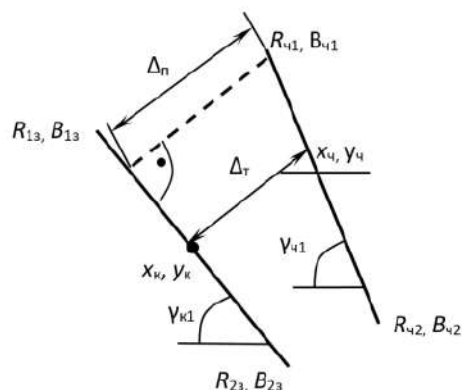


Рис. 5. Схема к определению расстояния между бронями

Fig. 5. A schematic diagram for determining the distance between armors

Уравнение отрезка брони чаши в зоне дробления:

$$y_{\text{ч}} = B_{\text{ч}2} - \text{tg} \gamma_{\text{ч}1} \cdot (R_{\text{ч}2} - x_{\text{ч}}). \quad (15)$$

Расстояние перемещения точек брони чаши при повороте опорного кольца на угол φ_i определяется как

$$\begin{aligned} L_{\text{ч}1\text{ч}'_1} &= 2L_{\text{О}1\text{ч}1} \sin\left(\frac{\varphi_i}{2}\right); \\ L_{\text{ч}2\text{ч}'_2} &= 2L_{\text{О}1\text{ч}2} \sin\left(\frac{\varphi_i}{2}\right); \\ L_{\text{ч}3\text{ч}'_3} &= 2L_{\text{О}1\text{ч}3} \sin\left(\frac{\varphi_i}{2}\right). \end{aligned} \quad (16)$$

Угол наклона к горизонту перемещения точек брони чаши при повороте опорного кольца на угол φ_i определяется как

$$\begin{aligned}\angle_{q_1 q_1' x} &= \pi - 0,5(\pi - \varphi_i) - \angle O_{q_1 x} = \\ &= 0,5\pi + \varphi_i - \angle O_{q_1 x}; \\ \angle_{q_2 q_2' x} &= 0,5\pi + \varphi_i - \angle O_{q_2 x}; \\ \angle_{q_3 q_3' x} &= 0,5\pi + \varphi_i - \angle O_{q_3 x}.\end{aligned}\quad (17)$$

Координаты точек брони чаши после поворота опорного кольца на угол φ_i :

$$\begin{aligned}x_{q_1'} &= x_{q_1} + L_{q_1 q_1'} \cdot \cos \angle_{q_1 q_1' x}; \\ y_{q_1'} &= y_{q_1} - L_{q_1 q_1'} \cdot \sin \angle_{q_1 q_1' x}; \\ x_{q_2'} &= x_{q_2} + L_{q_2 q_2'} \cdot \cos \angle_{q_2 q_2' x}; \\ y_{q_2'} &= y_{q_2} - L_{q_2 q_2'} \cdot \sin \angle_{q_2 q_2' x}; \\ x_{q_3'} &= x_{q_3} + L_{q_3 q_3'} \cdot \cos \angle_{q_3 q_3' x}; \\ y_{q_3'} &= y_{q_3} - L_{q_3 q_3'} \cdot \sin \angle_{q_3 q_3' x}.\end{aligned}\quad (18)$$

Алгоритм, на основе которого разработана программа, написан по блочному принципу (рис. 6) [8]. Особыми процедурами оформлены этапы, составляющие процесс прохождения недробимого тела по камере дробления. Алгоритм состоит из представленных блоков:

- 1) колебательные движения конуса эксцентриквой втулкой;
- 2) падение недробимого предмета после входа в камеру дробления до встречи с броней конуса;
- 3) расчет расстояния между бронями в текущем положении недробимого предмета;
- 4) скольжение недробимого предмета по броне конуса;
- 5) зажатие между бронями конуса и чаши и подъем опорного кольца.

Завал рабочей камеры дробимым материалом может возникнуть при непредвиденной остановке дробилки под нагрузкой по причине попадания крупного недробимого материала, прекращения подачи электроэнергии или перегрузки по питанию.

С целью освобождения камеры дробления от завала и недробимых предметов разработана принципиальная гидравлическая схема (рис. 7) [10].

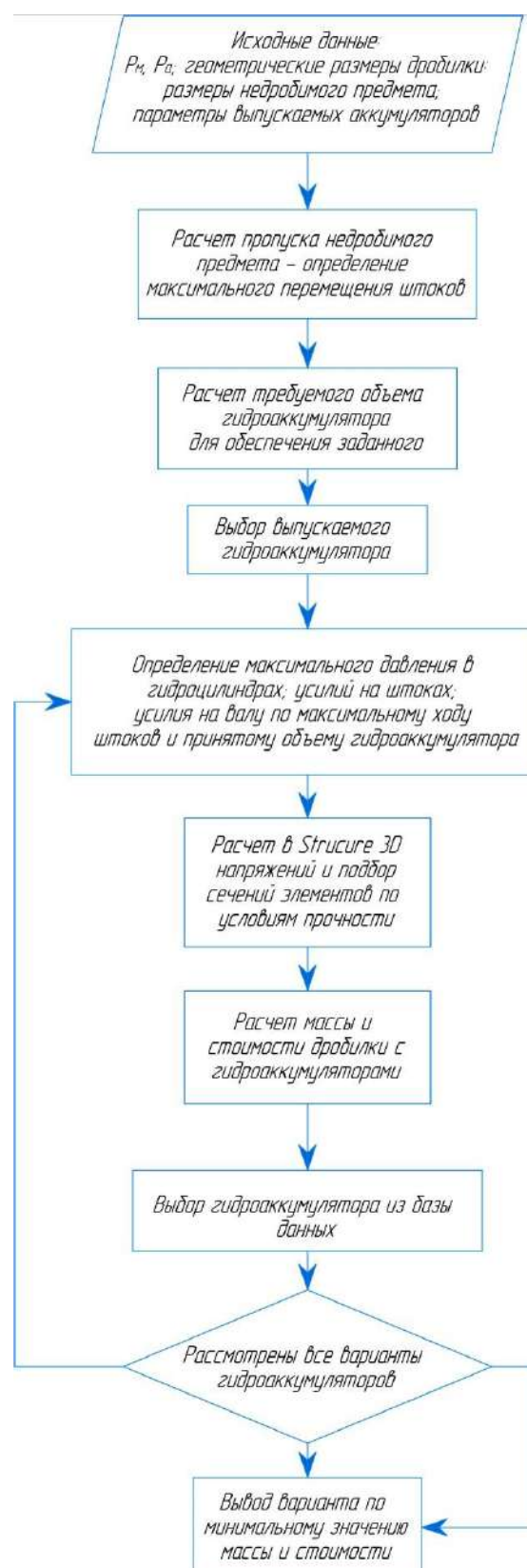


Рис. 6. Алгоритм модели движения недробимого предмета

Fig. 6. An algorithm of the uncrushable body motion model

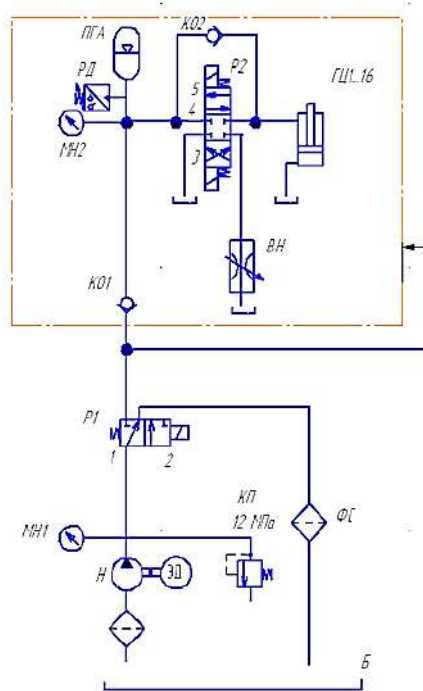


Рис. 7. Принципиальная гидравлическая схема системы прижатия

Fig. 7. A hydraulic circuit diagram of the clamping system

Последовательность работы предложенной гидросхемы [10] осуществляется следующим образом: требуется снять давление с гидроцилиндров прижатия дробильной чаши; направить поток рабочей жидкости в поршневую полость гидродомкратов разгрузки от недробимых предметов; поднять дробильную чашу на требуемую величину; после разгрузки камеры дробления вернуть дробильную чашу в рабочее положение за счет возврата давления в штоковой полости гидродомкратов; восстановить усилие прижатия чаши путем создания в штоковых полостях гидроцилиндров прижатия чаши рабочего давления.

Работоспособность представленной гидросхемы проверена в лаборатории гидропривода на испытательном стенде. Имитация рабочего процесса дробилки произведена за счет программируемого логического контроллера [10].

Заключение

В результате выполненных исследований была разработана математическая модель движения недробимого предмета по камере дробления дробилки мелкого дробления, а также предложена гидравлическая схема для автономной работы дробилки без постоянно включенного гидравлического насоса. Полученная математическая модель стала основой при разработке программы,

позволяющей создать имитацию нагрузки на коническую чашу и дробящий конус.

Практическим итогом на базе проведенных исследований стала разработка принципиальной гидравлической схемы многофункциональной гидропневматической системы защиты конусной дробилки мелкого дробления от отрицательного воздействия недробимого предмета на камеру дробления. Проведено обоснование рациональных конструктивных параметров конусной дробилки, в частности целесообразности применения конструкции многофункциональной гидропневматической системы защиты, позволяющей минимизировать деформацию рабочих поверхностей броней подвижно и неподвижно элементов дробилки от попадающих в камеру дробления недробимых предметов.

Список источников

1. Лагунова Ю.А., Фурин В.О., Федулов К.А. Конусные дробилки ПАО «Уралмашзавод» для конкретных условий эксплуатации // Горное оборудование и электромеханика. 2018. №1(135). С. 27-33. EDN YOWMDW.
2. Терехин Е.П., Тулинов Р.А. Модернизация футеровочных броней конусных дробилок мелкого дробления // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2019. №2. С. 146-155. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-02-0-146-155. EDN YWGVYL.
3. Федорич А.Р., Четвериков Б.С., Любимый Н.С. Экспериментальное исследование управления размером выходной щели дробилками // Надежность и долговечность машин и механизмов: сборник материалов X Всероссийской научно-практической конференции, Иваново, 18 апреля 2019 года. Иваново: ФГБОУ ВО «Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий», 2019. С. 553-557. EDN YWKXQ.
4. Ибраева Н.Р., Мамонтова Д.А. Анализ эффективности применения дробильных установок в горнодобывающей промышленности // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сборник трудов XIX международной научно-технической конференции, проведенной в рамках Уральской горнопромышленной декады, Екатеринбург, 20-21 мая 2021 года. Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2021. С. 169-171. EDN IKAZMH.
5. Абдраязков Е.Р., Нефедов А.В., Чиченев Н.А. Модернизация конусной дробилки КМД-2200 для автоматизированной регулировки выходной щели // Сталь. 2020. №2. С. 42-44. EDN WRJHNZ.

6. Implementing a discharge slot width control system in cone crushers / I.A. Grishin, V.S. Bochkov, V.S. Velikanov [et al.] // Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University. 2022, vol. 20, no. 2, pp. 13-22. DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-2-13-22. EDN IAVOYW.
7. Моделирование процесса измельчения в конусном измельчителе / А.А. Артиков, Л.Х. Акабиров, Ф.Р. Камалова, Н.Х. Субханова // Управление качеством на этапах жизненного цикла технических и технологических систем: сборник научных трудов 2-й Всероссийской научно-технической конференции, Курск, 27-28 мая 2020 года. Курск: Юго-Западный государственный университет, 2020. С. 23-26. EDN OCTMYA.
8. Калянов А.Е., Лагунова Ю.А. Математическое моделирование элементов гидравлической схемы системы прижатия конусной дробилки // Горное оборудование и электромеханика. 2014. №2. С. 39-45.
9. Чиркин А.А., Кантемиров В.Д. Обоснование методики проектирования передвижных дробильно-перегрузочных установок // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2020. №7. С. 33-40. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-7-33-40. EDN CDQOBU.
10. Патент на полезную модель RU 178026 U1. Конусная дробилка / Кожушко Г.Г., Калянов А.Е., Комиссаров А.П., Лагунова Ю.А., Шестаков В.С.; заявка 2016108382, 09.03.16, опубл. 21.03.2018. Бюл. 9. 4 с.
4. Ibraeva N.R., Mamontova D.A. Analysis of efficiency of crushing machines in the mining industry. *Tekhnologicheskoe oborudovanie dlya gornoy i neftegazovoy promyshlennosti: sbornik trudov XIX mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, provedennoy v ramkakh Uralskoy gornopromyshlennoy dekady* [Process equipment for mining and oil and gas industries: Proceedings of the 19th International Scientific and Technical Conference held as part of the Ural Mining Decade]. Yekaterinburg: Ural State Mining University, 2021, pp. 169-171. (In Russ.) EDN IKAZMH.
5. Abdrazyakov E.R., Nefedov A.V., Chichenev N.A. Modernizing code crusher KMD-2200 to automatically adjust the discharge opening. *Stal* [Steel]. 2020;(2):42-44. (In Russ.) EDN WRJHNZ.
6. Grishin I.A., Bochkov V.S., Velikanov V.S. et al. Implementing a discharge slot width control system in cone crushers. Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University. 2022;20(2):13-22. DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-2-13-22. EDN IAVOYW.
7. Artikov A.A., Akabirova L.Kh., Kamalova F.R., Subkhanova N.Kh. Simulating a crushing process in a cone crusher. *Upravlenie kachestvom na etapakh zhiznennogo tsikla tekhnicheskikh i tekhnologicheskikh sistem: sbornik nauchnykh trudov 2-y Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Quality management at life cycle stages of technical and technological systems: Proceedings of the 2nd All-Russian Scientific and Technical Conference]. Kursk: Southwest State University, 2020, pp. 23-26. (In Russ.) EDN OCTMYA.
8. Kalyanov A.E., Lagunova Yu.A. A mathematical simulation of elements of a hydraulic circuit of the cone crusher clamping system. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika* [Mining Equipment and Electromechanics]. 2014;(2):39-45. (In Russ.)
9. Chirkin A.A., Kantemirov V.D. Providing a rationale for a design technique of movable crushing and transfer machines. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gornyy zhurnal* [News of the Higher Institutions. Mining Journal]. 2020;(7):33-40. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-7-33-40. EDN CDQOBU.
10. Kozhushko G.G., Kalyanov A.E., Komissarov A.P., Lagunova Yu.A., Shestakov V.S. *Konusnaya drobilka* [Cone crusher]. Utility model patent RU, no. 178026 U1, 2018.

References

Поступила 09.04.2023; принята к публикации 22.05.2023; опубликована 27.06.2023
Submitted 09/04/2023; revised 22/05/2023; published 27/06/23

Калянов Александр Евгеньевич – кандидат технических наук, доцент,
Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия.
Email: kalyanov.alexandr@yandex.ru. ORCID 0009-0008-6905-0416

Чернухин Станислав Алексеевич – кандидат технических наук, доцент,
Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия.
Email: Stas_chernuhin@mail.ru. ORCID 0000-0003-3423-6129

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

Aleksandr E. Kalyanov – PhD (Eng.), Associate Professor,
Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia.
Email: kalyanov.alexandr@yandex.ru. ORCID 0009-0008-6905-0416

Stanislav A. Chernukhin – PhD (Eng.), Associate Professor,
Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia.
Email: Stas_chernuhin@mail.ru. ORCID 0000-0003-3423-6129

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

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И СТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

CONSTRUCTION MATERIALS AND CONSTRUCTION ENGINEERING

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 620.168.3
DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-2-137-145



РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ СКАНИРОВАНИЯ СОСТАВА ВЕЩЕСТВА

Исаев М.М.¹, Махмудбейли Л.С.¹, Хасиева Н.М.²

¹ Азербайджанский архитектурно-строительный университет, Баку, Азербайджан

² Азербайджанский технический университет, Баку, Азербайджан

Аннотация. В статье рассмотрен вопрос построения автоматизированной интеллектуальной контрольно-измерительной и управляющей системы оценки физико-химических параметров в процессе производства строительных материалов, применяемых при изготовлении металлических конструкций, применяемых при строительстве морских нефтегазовых платформ, работающих в сложных метеорологических условиях. Металлические конструкции, установленные в морской среде, подвержены большим нагрузкам и коррозии, поэтому следует проводить глубокий анализ конструкторских элементов и характеристик исследуемого объекта и воздействий, которым они подвергаются, а также профилактические мероприятия. Целью работы является создание и внедрение интеллектуальной контрольно-измерительной и управляющей системы подготовки состава материалов в соответствии с действующими стандартами. Основная функция этой системы заключается в сканировании состава материалов, измерении и оценке параметров, полностью отражающих их характеристики. Такой подход к решению проблемы, использование материалов, основанных на современных технологиях добычи, характерен для нефтегазовых платформ, строящихся в настоящее время в каспийском секторе Азербайджана. Длительная эксплуатация сооружений из этих материалов должна предусматривать устойчивость к максимальным нагрузкам, сильным штормам, щелочным свойствам морской воды и другим воздействиям. Для достижения поставленной цели были изучены, классифицированы и сформированы в виде базы знаний параметры изготавливаемых строительных материалов, имеющих необходимые физико-химические свойства. Интеллектуальная система базируется на сканирующих датчиках на основе интеллектуальных технологий, программных контроллеров современного поколения и других инструментов ИКТ. Система имеет многопараметрический и переменный структурный принцип и может быть легко адаптирована к типу материалов. Она может с высокой точностью сканировать физические и химические изменения любых строительных материалов в реальных производственных процессах и принимать решения в этот момент. Таким образом, применение интеллектуальной сканирующей системы позволит обеспечить производство прочных и долговечных строительных материалов для изготовления конструкций, работающих в тяжелых природных условиях и отвечающих международным стандартам.

Ключевые слова: интеллектуальная система, многопараметрическая переменная структура, адаптация, сканирование, физические и химические свойства, состав вещества, материал, качество, производство

© Исаев М.М., Махмудбейли Л.С., Хасиева Н.М., 2023

Для цитирования

Исаев М.М., Махмудбейли Л.С., Хасиева Н.М. Разработка интеллектуальной системы сканирования состава вещества // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №2. С. 137-145. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-2-137-145>



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

DEVELOPMENT OF AN INTELLIGENT SYSTEM FOR SCANNING THE COMPOSITION OF A SUBSTANCE

Isaev M.M.¹, Mahmudbeyli L.S.¹, Khasayeva N.M.²¹ Azerbaijan University of Architecture and Construction, Baku, Azerbaijan² Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan

Abstract. The paper considers the issue of building an automated intelligent instrumentation and control system for evaluating physical and chemical parameters in the production of building materials applied in manufacturing steel structures used in the construction of offshore oil and gas platforms operating in difficult meteorological conditions. Steel structures installed in the marine environment are subject to high loads and corrosion; therefore, it is necessary to carry out an in-depth analysis of the design elements and characteristics of the facility under study and the impacts to which they are exposed, and take preventive measures. The research is aimed at creating and introducing an intelligent instrumentation and control system for preparing the composition of materials in accordance with currently applicable standards. A main function of this system is to scan the composition of materials, measure and evaluate parameters that fully reflect their characteristics. This approach to solving the problem, the use of materials based on modern production technologies, is typical for oil and gas platforms currently under construction in the Caspian sector of Azerbaijan. A long-term operation of structures made of these materials should provide resistance to maximum loads, severe storms, alkaline properties of seawater and other exposures. To achieve this objective, the parameters of manufactured building materials with the required physical and chemical properties were studied, classified and formed as a knowledge base. The intelligent system is based on scanning sensors applying intelligent technologies, software controllers of the modern generation and other ICT tools. The system has a multiparametric and variable structural principle and can be easily adapted to the type of materials. It can scan with high accuracy physical and chemical changes of any building materials in real production processes and make decisions at this moment. Thus, the use of an intelligent scanning system will ensure the production of strong and durable building materials for manufacturing structures operating in harsh natural conditions and meeting international standards.

Keywords: intelligent system, multiparametric variable structure, adaptation, scanning, physical and chemical properties, substance composition, material, quality, production

For citation

Isaev M.M., Mahmudbeyli L.S., Khasayeva N.M. Development of an Intelligent System for Scanning the Composition of a Substance. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 2, pp. 137-145. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-2-137-145>

Введение

Изучение состава вещества, определение его физико-химических показателей в настоящее время считается трудноразрешимой задачей, которая в основном осуществляется в лабораторных условиях различными методами [1-3, 8-11]. В твердых телах сканирование их состава требует комплексного подхода [9], потому что применение известных методов определения состава вещества является неточным. По внешнему виду и первичным признакам в настоящее время невозможна точная идентификация (сканирование) металла и сплавов. Некоторые более сложно-определяемые составы определить без специальных приборов просто невозможно, поэтому все большую популярность набирают портативные переносные анализаторы и спектрометры [11].

Известно, что самыми передовыми методами химического контроля металла и сплавов являются метод оптической эмиссии (оптико-эмиссионный, атомно-абсорбционный, энергодисперсионный), рентгенофлуоресцентный (рентгеновский) метод и метод лазерного анализатора [11].

Существует два подхода к распознаванию объектов по внешнему виду с использованием глубокого обучения [4]:

1. **Обучение модели с нуля.** Чтобы обучить глубокую сеть с нуля, необходимо собрать очень большой размеченный набор данных и разработать архитектуру сети, которая будет изучать характеристики и строить модель. Результаты могут быть впечатляющими, но этот подход требует большого количества обучающих данных.

2. **Использование предварительно обученной модели глубокого обучения.** Большинство прило-

жений глубокого обучения используют подход трансферного обучения – процесс, который включает в себя точную настройку предварительно обученной модели. Для начала берется существующая сеть и вводятся новые данные, содержащие ранее неизвестные классы. Этот метод требует меньше времени и может обеспечить более быстрый результат, поскольку модель уже обучена на тысячах или миллионах изображений. Глубокое обучение предполагает высокий уровень точности, но требует большого количества данных для точных прогнозов.

Распознавание объектов с помощью машинного обучения также популярно и предлагает отличные от глубокого обучения подходы. Распространенными примерами методов машинного обучения являются:

- извлечение функций HOG с помощью модели машинного обучения SVM;
- модели «мешков слов» (bag-of-words) с такими функциями, как SURF и MSER;
- алгоритм Виолы-Джонса, который можно использовать для распознавания различных объектов, включая лица и верхнюю часть тела человека.

С внедрением интеллектуальных контрольно-измерительных и управляющих систем в производственном процессе реализуется решение совершенно новых задач. Распознавание распространяется как на физические, так и химические признаки. Таким образом, многочисленные оценки различных типов параметров в двух направлениях осуществляются с применением специальных методов и датчиков. Экспертиза проводится в соответствии с классификацией в базе собранных текущих оценок и знаний.

Постановка задачи

Основным вопросом повышения эффективности распознавания считается определение состава и основных показателей веществ с высокой точностью. С этой целью требуется разработка системы интеллектуального распознавания на основе новых требований: определение количественных и качественных показателей состава вещества с высокой точностью, оценка параметров, содержащих их характеристики в процессе производства, которые в общем виде определяются многопараметрической функцией. Важность многих факторов, влияющих на выбор метода распознавания, неизвестна с полной точностью. Поэтому в условиях неопределенности возникает необходимость выбора

более рационального метода управления, который отражает в себе сложную задачу.

Решаемый вопрос будет реализован, включая:

- данные о свойствах исследуемых материалов (СИМ) (теплопроводность, удельная теплоемкость, плотность и др.), выражающиеся следующим образом [6]:

$$V_{\text{СИМ}} = \{V_t^{\text{СИМ}}, n = 1, \dots, k\}, \quad (1)$$

где $V_t^{\text{СИМ}}$ – температурная характеристика СИМ;

- геометрические размеры технического объекта (ТО) (исследуемых материалов), выражающиеся следующим образом:

$$V_{\text{ТО}} = \{V_n^{\text{ТО}}, V_m^{\text{ТО}}, V_f^{\text{ТО}}\}, \quad (2)$$

где $V_n^{\text{ТО}}$ – нормальный размер ТО; $V_m^{\text{ТО}}$ – малый размер ТО; $V_f^{\text{ТО}}$ – форма ТО;

- данные о дестабилизирующих факторах (ДСФ) технического объекта:

$$V_{\text{ДСФ}} = \{V_n^{\text{ДСФ}}, V_{\text{ср.}}^{\text{ДСФ}}, V_{\text{ву.}}^{\text{ДСФ}}\}, \quad (3)$$

где $V_n^{\text{ДСФ}}$ – низкий уровень ДСФ; $V_m^{\text{ДСФ}}$ – средний уровень ДСФ; $V_f^{\text{ДСФ}}$ – высокий уровень ДСФ;

- достоверность многоуровневой информации об определенности изучаемого материала:

$$V_{\text{опред.}} = \{V_{\text{детер.}}, V_{\text{непон.}}, V_{\text{нечет.}}\}, \quad (4)$$

где $V_{\text{детер.}}$ – детерминированная информация; $V_{\text{непон.}}$ – непонятная информация; $V_{\text{нечет.}}$ – нечеткая информация;

- серии методов, которые можно использовать в интеллектуальной измерительной системе:

$$V_M = \{V_i^{M_i}, i = 1, \dots, k\}, \quad (5)$$

где M_i – i -й метод управления.

На основе конкретизации данных (1) – (4) требуется определить метод контроля в соответствии с данными $V_M \in V_i^{M_i}$.

Решение задачи

Рассмотрим создание интеллектуальной системы и ее информационное обеспечение для реализации вышеупомянутых математических выражений (1) – (5). На основе параметров подби-

раются сенсоры и организуется их контакт с исследуемым объектом. Ниже представлены основные принципы функционирования интеллектуальной измерительной системы и ее структурная схема (рис. 1).

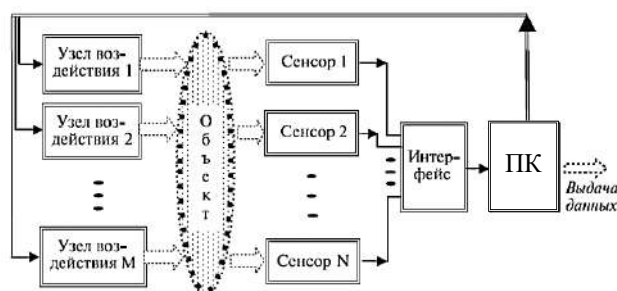


Рис. 1. Функциональная схема интеллектуальной измерительной системы

Fig. 1. A functional diagram of the intelligent measuring system

В отличие от известных сканирующих (распознающих) систем [12], измерение параметров осуществляется одновременно с помощью датчиков различного назначения [1]. Следовательно, система функционирует по принципу многопараметрической и многоканальной измерительной системы [7].

В результате одновременного измерения значений параметров, отражающих количественные и качественные показатели исследуемого вещества, накапливается достаточное количество данных. После обработки эти данные сопоставляются с соответствующими значениями, размещенными в базе знаний, и обеспечивается распознавание – сканирование с высокой точностью.

Имеющиеся данные о сканируемых материалах – информация, существовавшая до эксперимента, и информация, полученная при первом измерении, – можно описать в матричной форме следующим образом:

$$Q = \begin{pmatrix} q_{11}(d_1), q_{12}(d_2), \dots, q_{1m}(d_m) \\ q_{21}(d_1), q_{22}(d_2), \dots, q_{2m}(d_m) \\ \dots \\ q_{n1}(d_1), q_{n2}(d_2), \dots, q_{nm}(d_m) \end{pmatrix}, \quad (6)$$

где q_i ($i = 1, \dots, n$) – рассматриваемые параметры (признаки) качественных свойств материалов; d_i ($i = 1, \dots, m$) – диапазон характеристик параметров сканируемого материала.

Вопрос о классификации сканируемых материалов формулируется следующим образом:

большинство заданных сканируемых материалов характеризуется как $Q = (q_i, i = 1, \dots, N)$, где N – количество сканируемого материала, а каждый сканируемый материал характеризуется как $Q_i = (q_{i1}, q_{i2}, \dots, q_{im})$ параметрами m и т.д.

Предложены комплексные методы измерения и многопараметрические измерения для высокоточного определения состава производимых веществ и автоматизированного контроля за ними в процессе производства.

В результате проведенных анализов можно утверждать, что показателем качества материала, характеризующим его основные свойства, является единый показатель качества продукта [5].

Наряду со всеми этими заявлениями необходимо внедрить автоматизированную систему контроля и мониторинга качества исследуемых материалов. На сегодняшний день практический контроль качества продукции осуществляется в лабораторных условиях, а не с помощью автоматизированных систем контроля. В то же время с применением системы мониторинга возможно оптимальное управление производственным процессом, высокоточное измерение технологических параметров в условиях эксплуатации и контроль за ними.

Высокое качество продукции достигается так же за счет высокоточного расчета норм входящего сырья и оптимального управления состоянием техники на протяжении всего производственного процесса. За счет собранных архивных оценок на основе проведенного мониторинга формируется оптимальная база знаний, которая приводит к однозначному её использованию в системе интеллектуального управления и превращает автоматический контроль качества продукции в реальность.

Функциональная структура многопараметрической системы мониторинга

Поскольку погрешности измерений, которые могут быть допущены при измерении значений многочисленных технологических параметров в многопараметрической системе измерений, отражают требуемый уровень качества, также учитываются возможности их оплаты и автокоррекции. Таким образом, при построении структуры системы учитываются все внешние и внутренние воздействующие факторы.

Функциональную зависимость между входными и выходными параметрами системы мониторинга в общем виде можно описать следующей математическим выражением:

$$Q = f_Q(a_1, \dots, a_i, \dots, a_n), \quad (7)$$

где Q – параметр качества; $a_1, \dots, a_i, \dots, a_n$ – информативные параметры (сюда входит набор контролируемых и неконтролируемых параметров внешнего воздействия).

Набор информативных параметров представленной выше функции (7) определяется экспериментально, и в результате рассчитывается значение параметра качества Q . Это выражение имеет различную форму для каждого продукта и представляет собой математическую модель.

Сначала определяются функциональные связи между значениями каждого информативного параметра a_i и уровнем качества Q контролируемого продукта:

- в модели (7), включающей основные качественные характеристики продукта, выявляются более изменчивые и сложные процессы;
- применение одной и той же математической модели к одинаковым или подобным продуктам может привести к неудовлетворительной оценке их качества. Вместо этого выполняются задачи, которые характеризуют назначение использования продукта и считаются очень важными.

Характеристики продуктов различны для определенных целей, но они имеют особое значение для эффективности управления в целом. Так, они имеют различную степень важности для разных объектов строительства. Например, металлические колонны (опоры), применяемые в строительной сфере, в зависимости от своего назначения имеют разные качественные показатели (прочностные характеристики, влияние влажности и температуры, устойчивость к нагрузкам и т.д.).

Исследуемые параметры можно разделить на три основные группы:

- 1) информативные параметры;
- 2) контролируемые параметры;
- 3) параметры неконтролируемого внешнего воздействия.

Несмотря на эту классификацию, каждый информативный параметр a_i так или иначе влияет на определение параметра качества. Здесь необходимо определить, какой процент параметра качества представляет каждый информативный параметр. Оценка эффективности этих параметров заключается в определении, к какой из трех групп относится каждый из них, какая группа параметров связана с особенностями каждого рассматриваемого товара, с влиянием различных

факторов b_i . Таким образом, качественные характеристики продукта определяются в определенном порядке. Это может быть выражено как функция или предел ограничений на любой промежуточной границе (существующие границы Q_1 и Q_2) в виде следующего преобразования:

$$|Q_1| \leq |Q| \leq |Q_2|. \quad (8)$$

В данной модели должны быть учтены факторы, выходящие за рамки критериев (8) и влияющие на параметры b_i , препятствующие эффективному управлению качеством, восстановлены полезные свойства и определены другие посторонние признаки. Посторонние признаки мешают эффективному управлению качеством и вызывают «срыв».

В математическом смысле те или иные причины, сопровождающиеся «срывом», выводятся из-под контроля, а отрицательное воздействие на качество вещества компенсируется обратной связью. Поэтому для корректной оценки характеристик объекта управления важно также исследование корреляционных связей между информативными параметрами a_i и параметром качества Q и неучтенными неинформативными параметрами. Таким образом, необходимо уточнить функционал f_Q . Для этого зависимость между значениями информативных параметров a_i и значениями факторов влияния Q и b_i можно представить следующим образом:

$$Q = f_Q(a_1, \dots, a_i, \dots, a_n, b_1, \dots, b_m). \quad (9)$$

Итак, полезные свойства объекта управления определяются условием (8). Но здесь должны быть заданы условия для определения важных измерений при оценке параметра качества Q .

Структурная схема многопараметрического процесса измерения-тестирования показана на рис. 2.

Понятно, что функции, которые должна выполнять контрольно-мониторинговая система, будут включать в себя различные и сложные операции, так как зависят от назначения, вида, объема, физико-химических свойств продукта. Поскольку большой объем собираемой информации определяет правильную оценку и принятие решений, система мониторинга должна строиться в виде многопараметрической и многофункциональной комплексной информационно-управляющей системы.

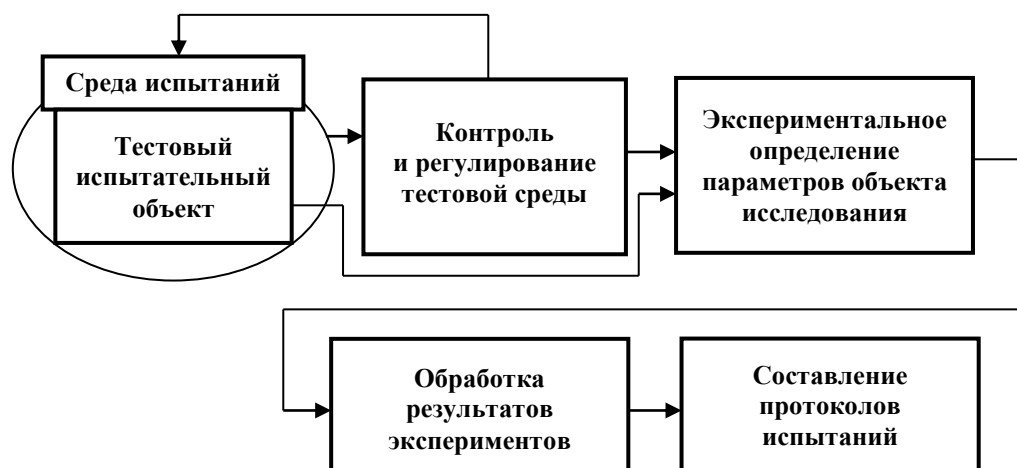


Рис. 2. Структурная схема процесса тестирования

Fig. 2. A block diagram of the testing process

К основным функциям системы мониторинга относятся:

- система измерения технологических параметров;
- система сбора и обработки информации;
- система оценки показателей качества;
- система принятия решений;
- система управления с обратной связью.

Функциональная схема системы мониторинга представлена на **рис. 3**.

Система мониторинга определяет и оценивает показатели качества сырья и готовой продукции в процессе производства.

Информационное обеспечение автоматизированной системы контроля качества – мониторинг состава веществ. Разработано программно-алгоритмическое обеспечение системы, основные моменты которого представлены ниже.

Программный комплекс, разработанный для обработки информации о данных, состоит из нескольких модулей и разделов. Связь между модулями и разделами программы осуществляется через главное меню. Одним из основных вопросов является реализация системного программного обеспечения и установление связей между программными модулями. Важно выбрать подходящую среду для разработки системного программного обеспечения. Так, для реализации программного обеспечения использовались среда DELPHI XE7 и система управления базами данных (СУБД) SQL SERVER 2008 R2, являющиеся продуктом компании Microsoft и работающие под управлением операционной системы WINDOWS.

В интерфейсе программы «Главное меню»

предусмотрены функции переключения на другие модули.

Интерфейс между системой и пользователем основан на принципе выбора меню. Метод меню, кроме своей простоты и удобства, позволяет последовательно контролировать работу пользователя и устранять ошибки. Программное обеспечение системы измерения и контроля информации состоит из модулей, реализующих обращение к базе данных, обработку различных запросов и формирование выходных документов.

Меню программы состоит из множества подменю в зависимости от специфики рассматриваемого вопроса и образуют весь комплекс прикладных программ как единый пакет. Свойства веществ формируются в виде базы знаний системы на основе справочников.

На **рис. 4** показана последовательность определения номенклатуры показателя качества, приведены меню, подменю разработанных программных модулей и основные функции, выполняемые программой.

Кроме того, пользователь программы может вводить, изменять и удалять информацию в системе по неучтенным параметрам материалов, изучаемых в данном модуле программы. Для этого пользователь программы выбирает из специальных справочников и вводит определенные коэффициенты с символами, определенными с панели программы. В это время выбранная доступная информация отображается на экране в виде списка архивных данных. Из этого меню пользователь может добавлять, изменять и удалять новую информацию в системе. Это одинаково для всех типов стандартных материалов.

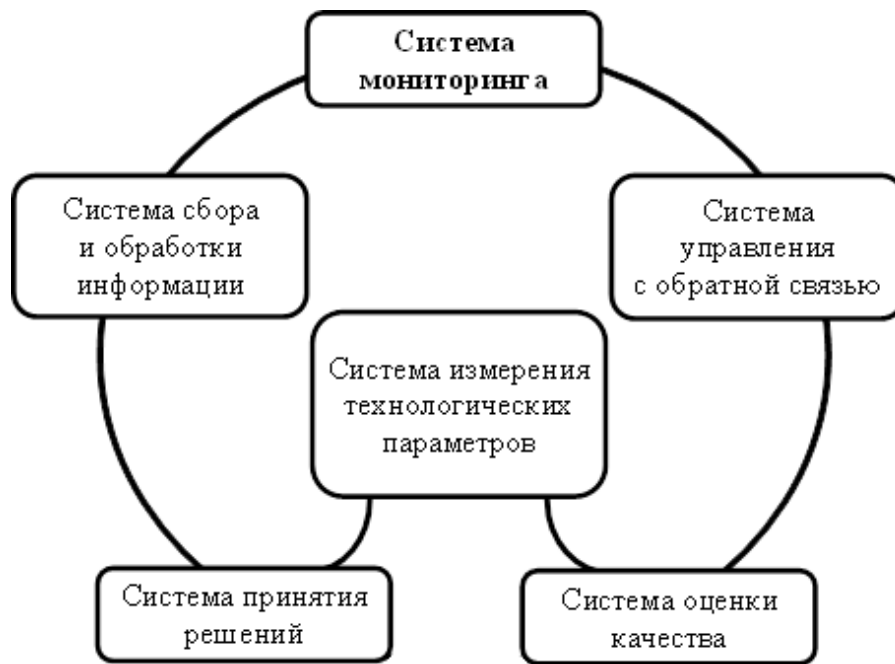


Рис. 3. Функциональная схема системы мониторинга
Fig. 3. A functional diagram of the monitoring system

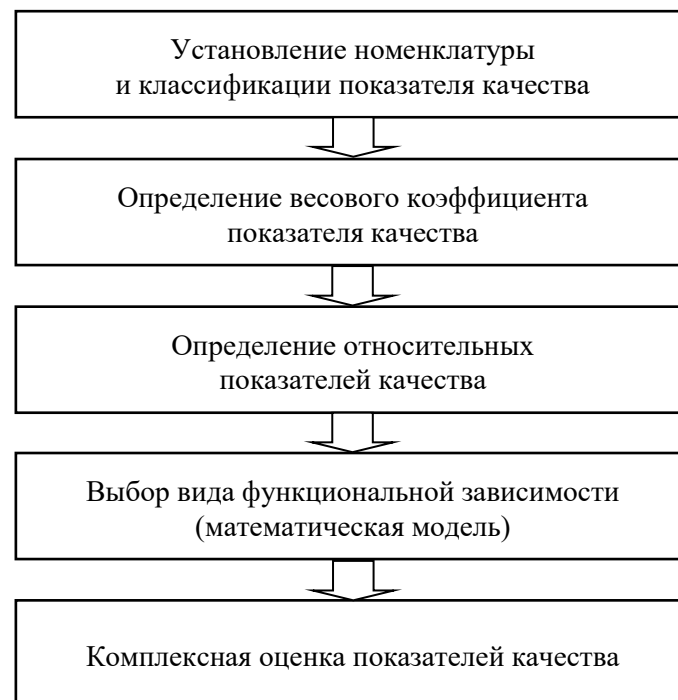


Рис. 4. Сложный алгоритм расчета показателя качества
Fig. 4. A complex algorithm for calculating the quality indicator

Заключение

Таким образом, впервые была разработана автоматизированная интеллектуальная контрольно-измерительная система и ее информационное обеспечение для определения (сканирования) количественных и качественных свойств веществ (материалов). Благодаря применению этой системы в технологии производства можно добиться высокой эффективности и качества. Это более важно для технологии производства конструкций из металла и других материалов. Таким образом, она незаменима при разработке состава материалов для производства металлоконструкций, эксплуатируемых в морской среде и других тяжелых природных условиях.

Роль автоматизированной интеллектуальной системы сканирования на всех этапах производственного процесса заключается в контроле состава материалов, высокой точности измерений и предотвращении разрушений.

Применение данной системы характерно для всех нефтегазовых терминалов, построенных в азербайджанском секторе Каспийского моря за последние годы.

Поэтому основной целью статьи является разработка и применение интеллектуальной системы сканирования на уровне современных требований для достижения высокого качества и точности в процессе производства металлических материалов. Для этого были изучены физико-химические свойства и характеристики металлов, проведена их широкая классификация и реализовано их применение при осуществлении текущих измерений и разверток на примере интеллектуальных систем.

Таким образом, эти данные играют роль основного источника информации при формировании базы знаний и экспертной системы интеллектуальной сканирующей системы. В то же время система обеспечивает высокоточный контроль физико-химического состава материалов в реальных производственных процессах. Все это достигается за счет высокоточного сканирования каждого показателя. В результате обеспечивается производство высококачественной продукции, соответствующей требованиям международных стандартов.

Список источников

1. Демина Л.Н. Методы и средства измерений, испытаний и контроля: учеб. пособие. М.: НИЯУ «МИФИ», 2010. 292 с.

2. Ультразвуковой контроль металлических конструкций: учеб. пособие / А.И. Коротин, А.Л. Лазарев, Г.Н. Святкина [и др.]. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2015. 112 с.
3. Совершенствование процесса изготовления сложных изделий с использованием PDM-систем / В.Б. Кузнецова, А.И. Сергеев, А.И. Сердюк, А.В. Попов. Оренбург: ОГУ, 2013. 143 с.
4. Мясников В.В., Глумов Н.И., Сергеев В.В. Методы обнаружения и распознавания объектов на цифровых изображениях. Самара: Изд-во СГАУ, 2006. 168 с.
5. Ребрин Ю.И. Управление качеством: учеб. пособие. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2004. 174 с.
6. Селиванова З.М., Хоан Т.А. Методы и алгоритмы повышения точности информационно-измерительных систем теплофизических свойств теплоизоляционных материалов: монография. Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2018. 160 с.
7. Страхов А.Ф. Многопараметровые измерительные системы // Измерительная техника. 2005. №4. С. 3-7.
8. Толмачев И.И. Магнитные методы контроля и диагностики: учеб. пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 2008. 216 с.
9. Эгертон Р.Ф. Физические принципы электронной микроскопии. Введение в просвечивающую, растровую и аналитическую электронную микроскопию: монография / пер. с англ. С.А. Иванова. М.: Техносфера, 2010. 300 с.
10. <http://ntcexpert.ru/953-metody-nerazrushayushchego-kontrolya> (Дата обращения: 12.03.2023)
11. XRF Анализаторы металлов, РФА спектрометры: цены, состав и принцип спектрального анализа сплавов / ООО «ПВП «СНК» в Москве (pvp-snk.ru) (дата обращения 15.03.2023)
12. <https://hub.exponenta.ru/post/raspoznavanie-obektov-3-veshchi-kotorye-neobkhodimo-znat244> (дата обращения 15.03.2023)

References

1. Demina L.N. *Metody i sredstva izmereniy, ispytaniy i kontrolya: ucheb. posobie* [Measurement, testing and control methods and tools: Study guide]. Moscow: National Research Nuclear University Moscow Engineering Physics Institute, 2010, 292 p. (In Russ.)
2. Korotin A.I., Lazarev A.L., Svyatkina G.N. et al. *Ultrazvukovoy kontrol metallicheskikh konstruktсий: ucheb. posobie* [Ultrasonic testing of steel structures: Study guide]. Saransk: Publishing House of Mordovia University, 2015, 112 p. (In Russ.)
3. Kuznetsova V.B., Sergeev A.I., Serdyuk A.I., Popov A.V. *Sovershenstvovanie protsessa izgotovleniya slozhnykh izdeliy s ispolzovaniem PDM-sistem* [Improving the process of manufacturing complex products using PDM systems]. Orenburg: Orenburg State University, 2013, 143 p. (In Russ.)
4. Myasnikov V.V., Glumov N.I., Sergeev V.V. *Metody obnaruzheniya i raspoznavaniya obektov na tsifrovyykh izobrazheniyakh* [Methods for detecting

- and recognizing objects in digital images]. Samara: Publishing House of Samara State Aerospace University, 2006, 168 p. (In Russ.)
5. Rebrin Yu.I. *Upravlenie kachestvom: ucheb. posobie* [Quality management: Study guide]. Taganrog: Publishing House of Taganrog Radio Engineering University, 2004, 174 p. (In Russ.)
 6. Selivanova Z.M., Joan T.A. *Metody i algoritmy povysheniya tochnosti informatsionno-izmeritelnykh sistem teplofizicheskikh svoystv teploizolyatsionnykh materialov: monografiya* [Methods and algorithms for improving accuracy of information and measuring systems of thermo-physical properties of heat-insulating materials: Monograph]. Tambov: Publishing House of Tambov State Technical University, 2018, 160 p. (In Russ.)
 7. Strakhov A.F. Multi-parameter measuring systems. *Izmeritelnaya tekhnika* [Measurement Equipment]. 2005;(4):3-7. (In Russ.)
 8. Tolmachev I.I. *Magnitnye metody kontrolya i diagnostiki: ucheb. posobie* [Magnetic methods of control and diagnostics: Study guide]. Tomsk: Publishing House of Tomsk Polytechnic University, 2008, 216 p. (In Russ.)
 9. Egerton R.F. *Fizicheskie printsipy elektronnoy mikroskopii. Vvedenie v prosvechivayushchuyu, rastrovuyu i analiticheskuyu elektronnyuyu mikroskopiyu: monografiya* [Physical principles of electron microscopy. Introduction to transmission, scanning and analytical electron microscopy: Monograph]. Moscow: Technosphere, 2010, 300 p. (In Russ.)
 10. <http://ntcexpert.ru/953-metody-nerazrushayushchego-kontrolya> (Accessed on March 12, 2023)
 11. XRF metal analyzers, XRF spectrometers: prices, configuration and the principle of a spectral analysis of alloys. LLC PVP SNK in Moscow (pvp-snk.ru) (Accessed on March 15, 2023)
 12. <https://hub.exponenta.ru/post/raspoznavanie-obektov-3-veshchi-kotorye-neobkhodimo-znat244> (Accessed on March 15, 2023)

Поступила 22.03.2023; принята к публикации 17.05.2023; опубликована 27.06.2023
Submitted 22/03/2023; revised 17/05/2023; published 27/06/2023

Исаев Мазахир Мамедович – доктор технических наук, доцент,
Азербайджанский архитектурно-строительный университет, Баку, Азербайджан.
Email: mezahir@bk.ru. ORCID 0000-0003-0515-5725

Махмудбейли Лейла Салы кызы – докторант, Азербайджанский архитектурно-строительный университет,
Баку, Азербайджан. Email: leyla.shakaralieva@gmail.com. ORCID 0009-0007-6618-3443

Хасеева Натаван Маммад кызы – докторант,
Азербайджанский технический университет, Баку, Азербайджан.
Email: nxasayeva1@gmail.com. ORCID 0000-0003-3496-2040

Mazahir M. Isaev – DrSc (Eng.), Associate Professor,
Azerbaijan University of Architecture and Construction, Baku, Azerbaijan.
Email: mezahir@bk.ru. ORCID 0000-0003-0515-5725

Leyla S. Mahmudbeyli – doctoral student,
Azerbaijan University of Architecture and Construction, Baku, Azerbaijan.
Email: leyla.shakaralieva@gmail.com. ORCID 0009-0007-6618-3443

Natavan M. Khasayeva – doctoral student,
Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan.
Email: nxasayeva1@gmail.com. ORCID 0000-0003-3496-2040

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 697.13
DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-2-146-155



ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗДАНИЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА АРХИВНЫХ ДАННЫХ УЗЛОВ УЧЕТА ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

Гашо Е.Г.¹, Фокин А.М.²

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

² Филиал Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Смоленске, Россия

Аннотация. На теплоснабжение зданий используется до 45% всех энергетических ресурсов страны. При этом качество и стоимость теплоснабжения – важнейшее условие социальной стабильности и формирования комфортных условий проживания. Уровень потребления тепловой энергии даже в однотипных жилых домах крайне неоднороден. Для планирования и проведения работ по повышению эффективности теплоснабжения жилых домов необходимы дешевые и быстрые инструменты, позволяющие выявить причины, наиболее влияющие на теплопотребление жилого здания. В качестве такого инструмента предлагается использовать зависимость тепловой мощности на отопление жилого дома от различных факторов. Исходными данными для анализа служат архивы общедомовых узлов учета тепловой энергии и данные о среднесуточной температуре наружного воздуха и скорости ветра. При построении зависимости использованы методы математической статистики, строительной теплофизики и инженерных сетей зданий и сооружений. В ходе работы установлено, что отопительная характеристика здания меняется в течение отопительного периода, что свидетельствует о том, что удельное количество тепловой энергии на отопление зависит не только от теплозащитных свойств наружных ограждений, но и от других факторов. Результатом работы является регрессионное уравнение, по которому можно определить количество тепловой энергии на отопление в зависимости от температуры наружного воздуха, скорости ветра, температуры теплоносителя и располагаемого перепада давления на вводе в здание.

Ключевые слова: теплоэнергетика, теплоснабжение, учет тепловой энергии, теплоэнергетические характеристики, отопительная характеристика здания

© Гашо Е.Г., Фокин А.М., 2023

Для цитирования

Гашо Е.Г., Фокин А.М. Определение теплоэнергетических характеристик зданий на основе анализа архивных данных узлов учета тепловой энергии // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №2. С. 146-155. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-2-146-155>



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

DETERMINATION OF THERMAL POWER CHARACTERISTICS OF BUILDINGS BASED ON THE ANALYSIS OF ARCHIVAL DATA OF HEAT METERING STATIONS

Gasho E.G.¹, Fokin A.M.²

¹ National Research University Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russia

² Smolensk Branch of National Research University Moscow Power Engineering Institute, Smolensk, Russia

Abstract. Building heating requires up to 45% of all energy resources of this country. The quality and cost of heat supply is the most important condition for social stability and the formation of comfortable living conditions. A level of the thermal energy consumption even in residential buildings of the same type is extremely inhomogeneous. To plan and carry out work aimed at improving efficiency of heat supply of residential buildings, we need cheap and quick tools to identify the causes, having a major effect on the heat consumption of a residential building. Regarding such tool, it is proposed to use the dependence between heat power for heating a residential building and various factors. Source data for the analysis are taken from history logs of common building heat metering stations and data on average daily outdoor temperature and wind speed. When plotting the curve, we used methods of mathematical statistics, building thermal physics and utility networks of buildings and structures. The research revealed that the heating characteristic of the building varied during the heating period, indicating that the specific quantity of thermal energy for heating depended not only on the heat protection properties of the cladding, but also on other factors. The result of the research is a regression equation used to determine the quantity of thermal energy for heating depending on outdoor temperature, wind speed, heating medium temperature and available pressure drop at the input to the building.

Keywords: thermal power engineering, heat supply, thermal energy metering, thermal power characteristics, building heating characteristic

For citation

Gasho E.G., Fokin A.M. Determination of Thermal Power Characteristics of Buildings Based on the Analysis of Archival Data of Heat Metering Stations. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 2, pp. 146-155. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-2-146-155>

Введение

Повышение эффективности потребления тепловой энергии на отопление зданий является необходимым условием снижения энергопотребления во всей системе теплоснабжения страны. Поэтому в последнее время большое внимание уделяется определению показателей энергоэффективности жилых зданий. При этом, как показывают исследования, энергоэффективность даже однотипных зданий существенно различается.

Определение фактических характеристик зданий с точки зрения потребляемой на отопление тепловой энергии является необходимым условием для принятия решений о мероприятиях по повышению энергоэффективности.

Решению данной проблемы посвящено большое количество публикаций. Так, авторы [1] показывают возможность использования для анализа данных архивов общедомовых приборов учета тепловой энергии. В публикации [2] введено понятие удельной отопительной характеристики здания, согласно которому необходимо оценивать энергоэффективность здания потреблением тепла

на 1 м² отапливаемой площади, и проведена работа по выявлению зданий, имеющих большее энергопотребление на отопление. В статьях [3-5] сделана попытка увязать удельное теплосодержание здания с характеристиками наружных ограждающих конструкций зданий. В работе [6] потребление тепла на отопление рассмотрено в функции времени, то есть полученная модель используется для прогноза потребления тепловой энергии. При этом следует отметить, что в вышеперечисленных публикациях зависимость теплосодержания рассмотрена как бы «снаружи», не затрагивая отопительный комплекс здания в целом. В то время как теплосодержание зависит не только от температуры наружного воздуха и термического сопротивления наружных ограждений, но и от других факторов – скорости ветра, параметров теплоносителя и т.д.

В статье была сделана попытка обобщить опыт предыдущих исследований и построена зависимость тепловой мощности на отопление от различных факторов. Для этого архивные данные общедомового теплосчетчика дополнили информацией о параметрах наружного воздуха, в рассмот-

рение были введены параметры теплоносителя на вводе в здание и построено регрессионное уравнение, связывающее потребляемую тепловую мощность с вышеуказанными величинами. Также была построена зависимость фактической отопительной характеристики от наружной температуры.

В ходе исследования было установлено, что отопительная характеристика здания меняется в зависимости от температуры наружного воздуха. При высоких температурах наружного воздуха отопительная характеристика больше, что свидетельствует о большем расходе тепла на отопление, при низких температурах – меньше. Данный факт позволяет оценить количество тепла, которое можно сэкономить в начале и конце отопительного периода, когда на улице тепло.

Кроме того, построенное уравнение зависимости тепловой мощности от температуры наружного воздуха, скорости ветра, температуры и располагаемого напора теплоносителя показывает хорошую сходимость с фактическими значениями, измеренными теплосчетчиком.

Материалы и методы исследования

Чтобы ответить на вопрос о причине перерасхода тепла на отопление, необходима полная информация о составляющих уравнения теплового баланса отапливаемого здания ($Q_o + Q_{инф} + Q_{вн} + Q_{отр} = 0$). Получить эту информацию можно в результате энергетического обследования здания, что потребует больших затрат времени и финансов. При большом объеме здания работы становятся дорогостоящим и длительным мероприятием.

Хорошим выходом из сложившейся ситуации может быть использование в качестве источника информации коммерческих приборов учета тепловой энергии, которые получили в последнее время большое распространение.

Каждый современный теплосчетчик измеряет и архивирует основные параметры, необходимые для решения поставленной задачи (за час, за сутки, за месяц):

- количество потребленной тепловой энергии;
- расход и объем теплоносителя;
- температуру теплоносителя;
- давление теплоносителя.

Тогда задачу определения теплоэнергетических характеристик зданий можно разбить на следующие этапы:

1. Система отопления.

С одной стороны, мощность системы отопления здания определяется уравнением теплово-

го баланса: $Q = Gc_p(t_3 - t_2)$, где t_3 – температура в подающем трубопроводе системы отопления.

Любая система отопления проектируется на работу по температурному графику. Наиболее распространенный 95/70°C. Именно системы отопления, график тепловой сети в этом случае 150/70°C при коэффициенте смешения $u = (150-70)/(95-70) = 2,2$. На этот график рассчитывается расход теплоносителя тепловой сети. И расход теплоносителя, и температуру в обратном трубопроводе можно оценить по теплосчетчику. Отклонения расхода и температуры от графика будут отражать отклонения в работе системы. Это, так сказать, «снаружи», со стороны тепловой сети.

С другой стороны, мощность системы отопления определяется теплом, отдаваемым отопительными приборами, из уравнения теплопередачи для отопительного прибора: $Q = KF(t_{п} - t_{вн})$, где $t_{п}$ – температура отопительного прибора.

Температура внутреннего воздуха $t_{вн}$ в общем случае неизвестна. Но, при отсутствии жалоб потребителей ее можно считать соответствующей нормативной (для жилых зданий +20°C). Тогда из соотношения тепловой мощности, расхода и температуры можно оценить проблемы в самой системе отопления, так сказать, «изнутри».

2. Здание.

Уравнение теплового баланса отапливаемого помещения:

$$Q_o + Q_{отр} + Q_{инф} + Q_{вн} = 0, \quad (1)$$

где Q_o – мощность системы отопления зависит от типа системы, вида и площади отопительных приборов, расхода и температуры теплоносителя, температуры внутреннего воздуха и т.д.; $Q_{отр}$ – мощность тепловых потерь через наружные ограждения, определяется температурой и скоростью наружного воздуха, температурой внутреннего воздуха, свойствами наружных ограждений; $Q_{инф}$ – потери теплоты с инфильтрацией, зависят как от параметров наружного и внутреннего воздуха, так и от наружных ограждений; $Q_{вн}$ – мощность внутренних источников тепла.

При этом мощность системы отопления Q_o измерена теплосчетчиком. К данному параметру предъявляется одно требование: мощность системы отопления должна быть минимальной при требуемой температуре внутреннего воздуха. Остальные составляющие уравнения теплового баланса можно попробовать определить по часовым архивам теплосчетчика методами статистического анализа.

Потери теплоты через наружные ограждения $Q_{огр}$ определяются как [7]

$$Q_{огр} = \sum_i K_i F_i (t_{вн} - t_n), \quad (2)$$

$$K_i = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{вн}} + \sum_i \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_n}}, \quad (3)$$

где K_i – коэффициент теплопередачи соответствующего наружного ограждения, $\text{Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$; F_i – площадь наружного ограждения, м^2 ; $t_{вн}$ и t_n – температура внутреннего и наружного воздуха, $^\circ\text{C}$; $\alpha_{вн}$ и α_n – коэффициенты теплоотдачи со стороны внутренней поверхности наружного ограждения и с наружной стороны наружного ограждения, $\text{Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$; δ_i – толщина i -го слоя ограждения, м; λ_i – коэффициент теплопроводности i -го слоя наружного ограждения, $\text{Вт/м} \cdot ^\circ\text{C}$.

В принципе, можно рассчитать мощность теплопотерь по подробной методике, но по трудоемкости это будет не сильно отличаться от энергетического обследования.

Если к архивам теплосчетчика добавить температуру наружного воздуха и скорость ветра, можно попробовать из сочетания значений потребленного тепла, температуры воздуха и скорости ветра определить долю тепла, приходящегося на потери теплоты через наружные ограждения.

Затраты тепла на инфильтрацию $Q_{инф}$. Здесь возможен такой же подход, как к потерям теплоты через ограждения: из сочетания параметров наружного воздуха и потребленного тепла попробовать идентифицировать объект, то есть

определить, какая часть из потребленного тепла приходится на теплопотери с инфильтрацией.

Мощность внутренних источников тепла $Q_{вн}$ в каждом конкретном случае будет величиной постоянной, определяться свойствами самого объекта и, в принципе, являться независимым параметром. В основном мощность внутренних источников можно определить по показаниям общедомового узла учета электрической энергии.

Полученные результаты и их обсуждение

Таким образом, анализ архивов теплосчетчиков, установленных в жилых домах, следует проводить в следующем порядке:

1. По данным суточных архивов (средние параметры за сутки) строится зависимость теплопотребления от температуры наружного воздуха, определяется отопительная характеристика здания, а также зависимость отопительной характеристики от температуры наружного воздуха.

2. По данным часовых архивов можно определить зависимость теплоэнергетических характеристик не только от наружной температуры, но и от других факторов – скорости ветра и мощности внутренних источников тепла.

Так, для одного из домов г. Смоленска были сняты архивы теплосчетчика. Данные дополнили температурой наружного воздуха за отопительный период 2021-2022 гг. и построили зависимость теплопотребления здания от наружной температуры (рис. 1).

Стоит отметить, что такой вид зависимость имеет практически для всех жилых домов, то есть является типичной для данного вида объектов.

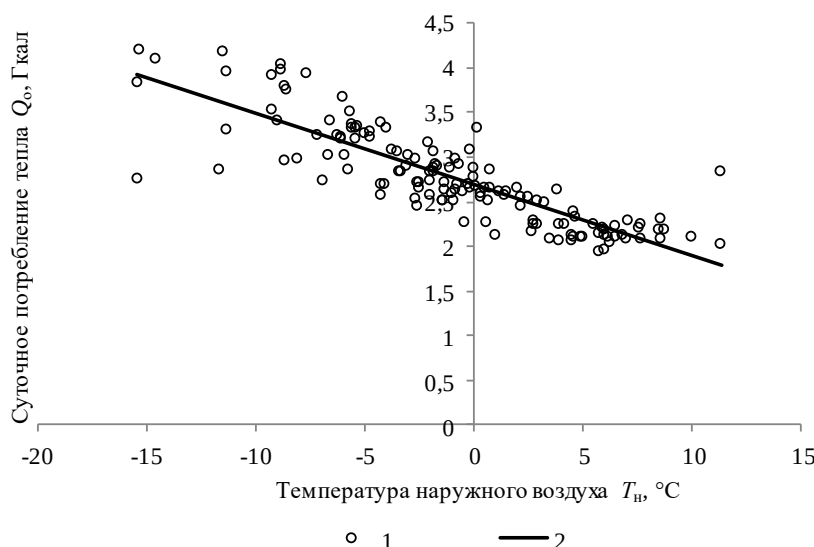


Рис. 1. Зависимость суточного потребления зданием тепла от температуры наружного воздуха:

1 – потребленное тепло; 2 – линия тренда (линейная)

Fig. 1. Dependence between the daily heat consumption of the building and outdoor temperature:

1 is consumed heat, 2 is a trend line (linear)

Кроме того, данная зависимость вполне согласуется с выражением (2). Таким образом, по архивным данным теплосчетчика была построена фактическая зависимость потребления тепла зданием от наружной температуры, Гкал:

$$Q_o = -0,087 \cdot t_n + 2,696. \quad (4)$$

По формуле (4) можно определить среднесуточное потребление тепла зданием.

Если разделить полученные значения потребленного тепла на разность температур между температурой воздуха внутри помещений и температурой наружного воздуха, получим удельное теплopotребление g , Гкал/°C, – фактически отопительную характеристику здания, или, другими словами, тепловую мощность, приходящуюся на 1°C разницы температур воздуха внутри здания и наружного воздуха:

$$q = \frac{Q_o}{20 - t_n}. \quad (5)$$

Так как внутренняя температура в общем случае неизвестна, примем ее значение 20°C.

Зависимость фактической отопительной характеристики здания от температуры наружного воздуха представлена на **рис. 2**.

Из **рис. 2** видно, что фактическая отопительная характеристика здания меняется с температурой наружного воздуха: при высоких температурах наружного воздуха относительное количество тепла на отопление больше, чем при низких температурах.

На **рис. 3** приведена зависимость тепловой мощности от скорости ветра. Значение получено по формуле $q = \frac{Q_o}{24}$, где Q_o – суточное потребление тепла зданием по счетчику. При этом для анализа были выбраны записи архивов при температуре наружного воздуха в диапазоне -1 ÷ +1°C.

Средние значения тепловой мощности при различных температурах и скоростях ветра приведены в **табл. 1**.

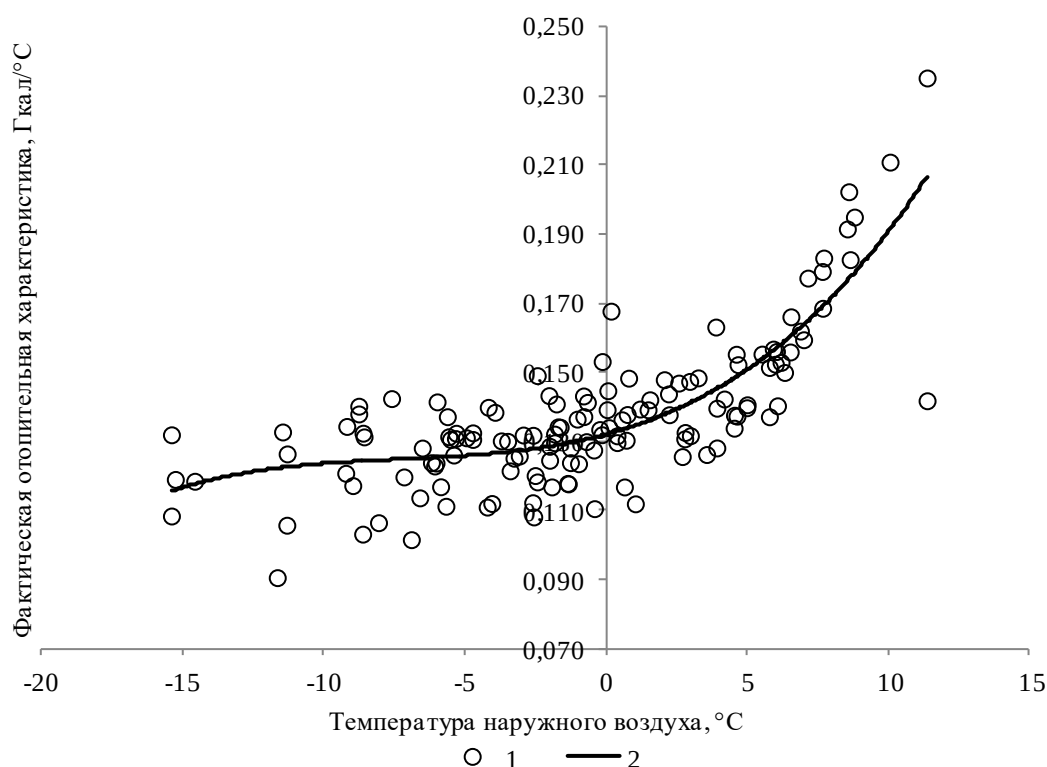


Рис. 2. Зависимость фактической отопительной характеристики здания от температуры наружного воздуха:
1 – фактическая отопительная характеристика; 2 – линия тренда (полиномиальная)

Fig. 2. Dependence between actual heating characteristic of the building and outdoor temperature:
1 is actual heating characteristic; 2 is a trend line (polynomial)

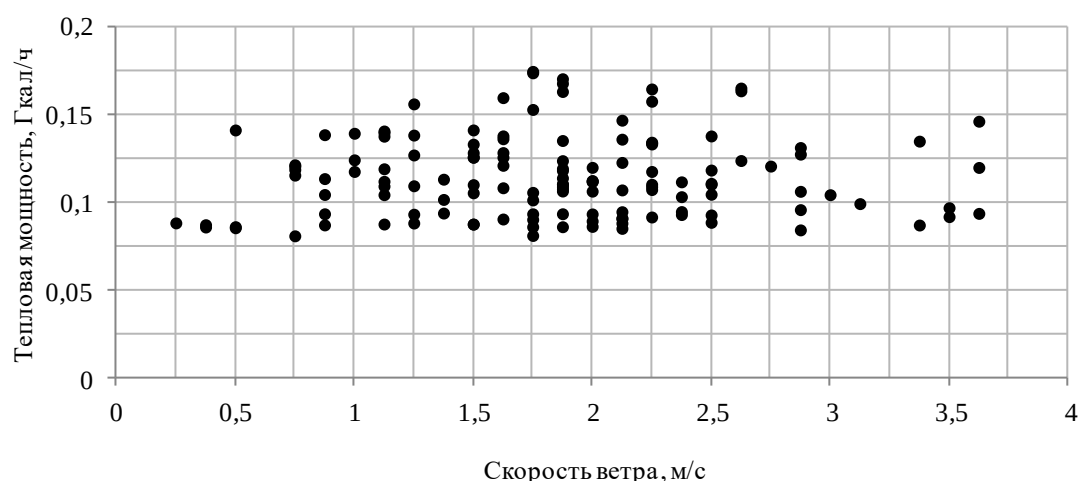


Рис. 3. Зависимость тепловой мощности от скорости ветра

Fig. 3. Dependence between heat power and wind speed

Таблица 1. Средние значения тепловой мощности при различных температурах и скоростях ветра

Table 1. Average heat power at various temperatures and wind speeds

$Q_{\text{ср}}, \text{Гкал/ч}$	$T_{\text{н}}$		$W_{\text{н}}$	
	$T_{\text{н}} < -0,8^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{н}} > -0,8^{\circ}\text{C}$	$W_{\text{н}} < 1,8 \text{ м/с}$	$W_{\text{н}} > 1,8 \text{ м/с}$
0,130	0,125	0,149	0,132	0,142

Таким образом, тепловая мощность на отопление здания зависит от параметров наружного воздуха: при более высокой температуре воздуха потребление тепла больше, при более низкой – меньше. Функционально эта зависимость имеет вид в соответствии с (4). Зависимость тепловой мощности от скорости ветра также измеряется теплосчетчиком, но менее ярко выражена. Это можно объяснить большим количеством шумовых факторов, влияющих на результат.

При сравнении удельного теплопотребления зданий с одинаковыми отопительными характеристиками, расположенных в различных климатических условиях [8], обычно принимается, что удельная отопительная характеристика не зависит от наружной температуры. По этому же принципу проектируются наружные ограждения зданий (СП 50.13330.2012. Свод правил. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003).

Для рассматриваемого здания повышенное относительно среднего значение удельной отопительной характеристики (более $0,140 \text{ Гкал/}^{\circ}\text{C}$) наблюдается более чем в 35 наблюдениях из 221, таким образом, на протяжении по крайней мере 15% отопительного сезона здание получает избыточное количество тепла. Следовательно, данный график может служить для оценки количества тепла, сэкономленного зданием за счет устране-

ния осенне-весенних перетопов.

Изменение удельного теплопотребления можно объяснить действием следующих факторов:

1. Температура внутреннего воздуха, принятая при расчете удельной отопительной характеристики постоянной и равной $+20^{\circ}\text{C}$, на самом деле меняется. Соответственно, при высокой температуре наружного воздуха люди регулируют температуру внутри помещений форточками, сбрасывая «лишнее» тепло на улицу.

2. Как известно, температурный график тепловой сети не соответствует отопительному графику системы отопления здания. Отопительный график имеет зону излома: «зона излома» (диапазон спрямления) графика температур – интервал температур наружного воздуха в переходный (теплый) период отопительного сезона, в котором температура сетевой воды в подающем трубопроводе тепловой сети поддерживается постоянной. Вследствие этого при высокой температуре наружного воздуха (от температуры начала отопительного периода $+8^{\circ}\text{C}$ до примерно $+2^{\circ}\text{C}$) в систему отопления подается избыточное количество тепла, при низкой – недостаточное [9].

По данным архивов теплосчетчика также можно оценить зависимость теплопотребления от гидравлического режима тепловой сети. Зависимость тепловой мощности от располагаемого напора на вводе в здание представлена на рис. 4.

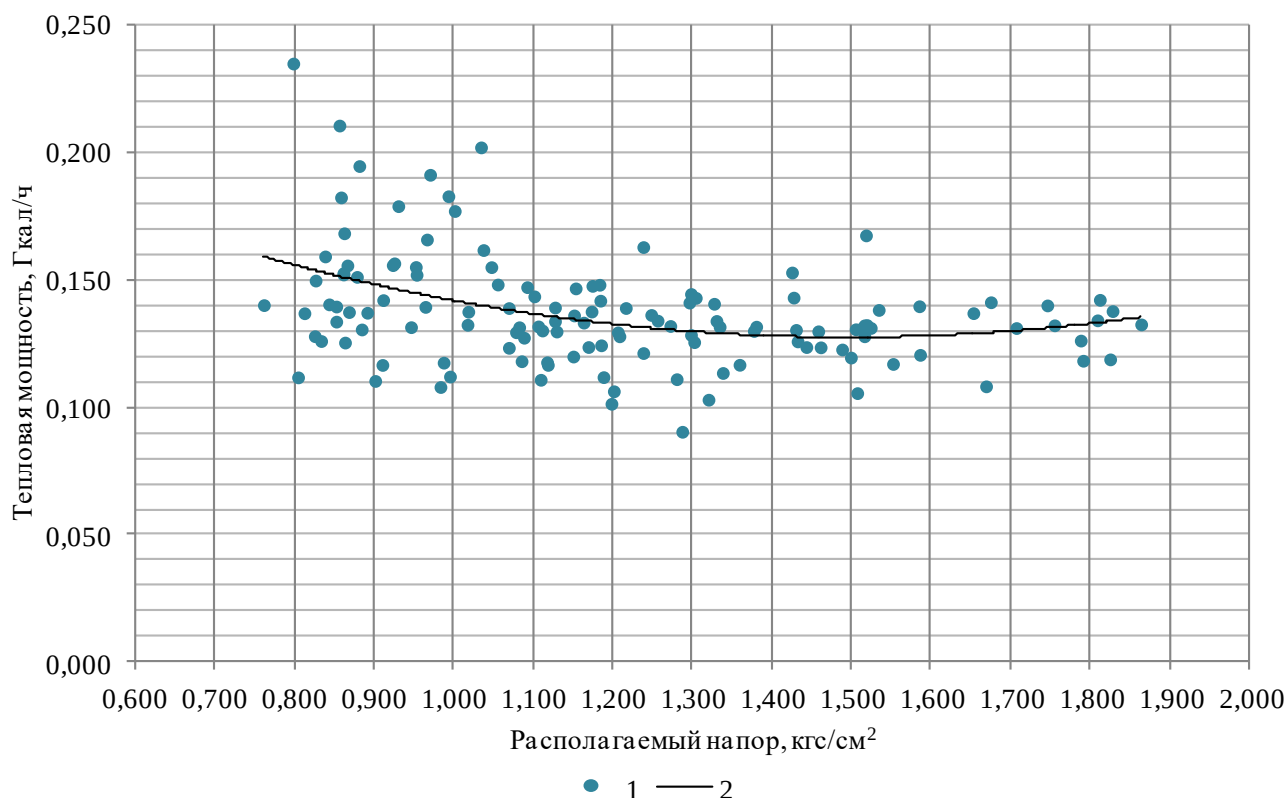


Рис. 4. Зависимость тепловой мощности от располагаемого напора теплоносителя:

1 – часовое потребление тепла; 2 – линия тренда (полиномиальная)

Fig. 4. Dependence between heat power and available pressure of the heating medium:

1 is the hourly heat consumption; 2 is a trend line (polynomial)

На графике виден большой разброс значений теплотребления при изменении располагаемого напора, но при среднем напоре за рассматриваемый период 1,206 кгс/см² среднее значение тепловой мощности на отопление здания при малом напоре (менее 1,206 кгс/см²) 0,130 Гкал/ч, при большом (более 1,206 кгс/см²) – 0,143 Гкал/ч. Таким образом, тепловая мощность меняется с изменением располагаемого напора [10].

Регрессионное уравнение зависимости суточного расхода тепла Q , Гкал/сут, на отопление здания в зависимости от температуры наружного воздуха, скорости ветра и располагаемого напора теплоносителя на вводе в здание имеет вид

$$Q = -0,01624 \cdot T_n + 0,02177 \cdot w + 1,64624 \cdot \Delta P + 0,72807. \quad (6)$$

Для проверки адекватности полученной зависимости по этому уравнению рассчитаем суточный расход тепла за январь 2022 года и сравним с архивными данными узла учета. Полученные результаты сведены в **табл. 2**.

Графически соответствие рассчитанного теплотребления от фактического приведено на **рис. 5**.

Как следует из **рис. 5**, расчетное теплотребление с фактическим практически полностью совпадает.

Таким образом, можно говорить об адекватности модели рассматриваемому объекту.

Таблица 2. Данные узла учета тепловой энергии и расчетное теплотребление
Table 2. Data from the heat metering station and estimated heat consumption

Дата	$Q_{\text{факт}}, \text{Гкал}$	$T_{\text{нгр}}, ^\circ\text{C}$	$w_{\text{ср}}, \text{м/с}$	$\Delta P, \text{кгс/см}^2$	$Q_{\text{расч}}, \text{Гкал}$
01.01.22	3,056	-3,500	1,250	1,458	3,212
02.01.22	3,328	0,163	1,250	1,518	3,252
03.01.22	3,254	-7,175	1,875	1,499	3,353
04.01.22	3,206	-6,088	2,250	1,488	3,326
05.01.22	2,858	-5,688	0,750	1,280	2,944
06.01.22	2,887	0,050	2,000	1,298	2,908
07.01.22	3,086	-0,150	1,500	1,425	3,109
08.01.22	3,231	-4,738	2,250	1,430	3,208
09.01.22	3,204	-5,413	1,500	1,432	3,206
10.01.22	3,272	-4,963	2,125	1,512	3,344
11.01.22	3,679	-6,000	1,750	1,675	3,621
12.01.22	4,035	-8,775	1,875	1,746	3,786
13.01.22	3,840	-15,413	1,625	1,669	3,761
14.01.22	2,868	-11,663	1,125	1,287	3,061
15.01.22	2,850	0,788	2,500	1,183	2,717
16.01.22	2,980	-0,813	2,625	1,304	2,945
17.01.22	2,979	-2,600	1,875	1,334	3,007
18.01.22	3,068	-1,775	2,875	1,327	3,004
19.01.22	3,245	-6,200	3,375	1,443	3,278
20.01.22	3,025	-6,613	1,500	1,338	3,071
21.01.22	3,158	-2,038	2,875	1,427	3,173
22.01.22	3,316	-3,950	2,500	1,534	3,372
23.01.22	3,353	-5,325	1,000	1,516	3,332
24.01.22	3,334	-5,525	0,875	1,513	3,328
25.01.22	3,398	-6,525	0,500	1,516	3,341
26.01.22	3,398	-8,988	1,500	1,552	3,462
27.01.22	3,317	-5,350	1,625	1,505	3,328
28.01.22	3,025	-5,875	1,625	1,359	3,096
29.01.22	2,871	-1,038	1,875	1,248	2,840
30.01.22	2,915	-1,713	1,625	1,256	2,859
31.01.22	2,904	-3,088	2,750	1,302	2,982

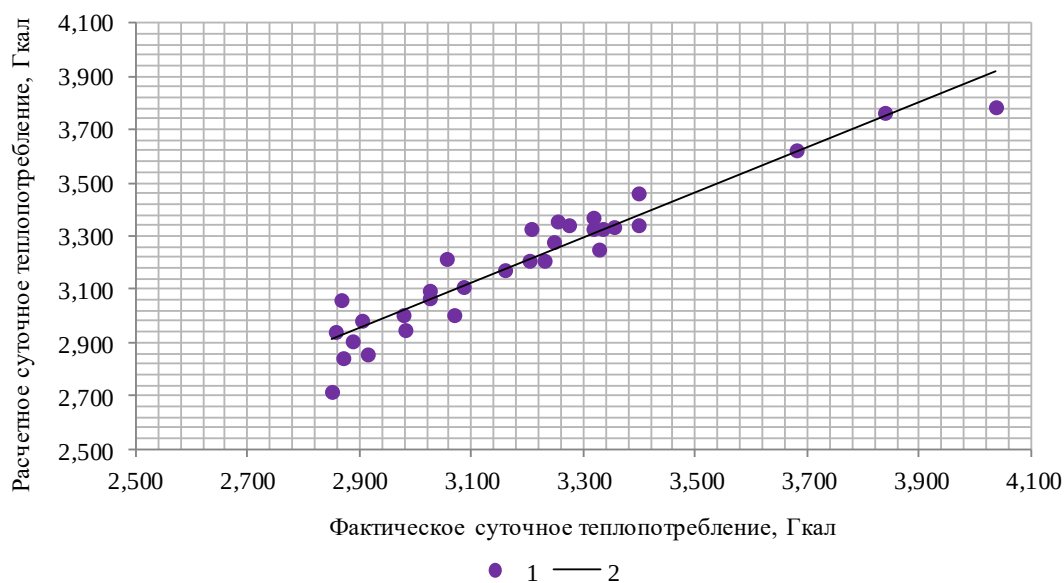


Рис. 5. Фактическое и рассчитанное значения теплотребления: 1 – суточное потребление;
2 – линия тренда (линейная)

Fig. 5. Actual and calculated heat consumption: 1 is the daily heat consumption; 2 is a trend line (linear)

Заключение

Планирование и проведение работ по повышению эффективности потребления тепловой энергии в сфере ЖКХ невозможно без простых инструментов, которые позволят выявить дома, в которых удельное потребление тепловой энергии существенно выше среднего. Основным недостатком существующих методов является большая трудоемкость или недостаточный объем информации о рассматриваемом объекте.

В данной работе предложен способ, сочетающий в себе простоту и, с другой стороны, достаточное количество информации для принятия решения о принимаемых мерах по повышению эффективности теплоснабжения. В результате было построено уравнение, учитывающее основные факторы, влияющие на потребляемую на цели отопления тепловую мощность: температура наружного воздуха, скорость ветра, температура и давление теплоносителя на вводе в здание.

Зависимость отопительной характеристики здания от температуры наружного воздуха может быть использована для выработки решения о повышении эффективности теплоснабжения здания путем установки автоматизированного индивидуального теплопункта. Сравнение теплоснабжения, рассчитанного с помощью полученной зависимости с фактически наблюдаемым за рассматриваемый период показало хорошую сходимость результатов. Большую точность предложенного способа определения отопительной характеристики здания можно было бы достичь при использовании не только суточных архивов теплосчетчиков, но и часовых. Также стоит отметить, что в рамках данной работы не получилось выделить долю тепловой мощности $Q_{\text{инф}}$, расходуемой на нагрев воздуха, инфильтрующегося в здание.

Список источников

1. Пасынков С.Г., Тенякова Р.В. Анализ работы программного комплекса в части учета тепловой энергии в ЖКХ // Энергосбережение. 2008. №2. С. 62-64.
2. Гашо Е.Г., Гилев А.А. Сбалансированность энергетических параметров зданий в городской системе теплоснабжения // Энергосбережение. 2015. №7. С. 36-41.
3. Ливчак В.И. Фактическое теплоснабжение зданий как показатель качества и надежности проектирования // АВОК. 2009. № 2. С. 4-14.
4. Лупей А.Г. О диагностике состояния систем отопления потребителей тепловой энергии // СОК. 2004. №8. С. 48-52.
5. Самарин О.Д. Зависимость теплотехнической однородности наружных стен жилых зданий от их

геометрических характеристик и климатических параметров // СОК. 2022. №03(219). С. 52-54.

6. Басаласев А.А. Прогнозирование потребления тепловой энергии, расходуемой на отопление и горячее водоснабжение // Наука ЮУрГУ: материалы 66-й научной конференции / отв. ред. С.Д. Ваулин. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2014. С. 633-638.
7. Заварзин Б.Б., Рюмин Р.В., Чукарев А.Г. Методика расчета теплопотерь для помещений // Молодой ученый. 2017. № 43(177). С. 40-43.
8. Гашо Е.Г., Фокин А.М. Анализ зависимости тепловой энергии, затраченной на отопление и охлаждение зданий, от различных факторов // СОК. 2022. №02(242). С. 64-67.
9. Борисов К.Б. Влияние качества теплоснабжения на фактические тепловые нагрузки систем отопления и горячего водоснабжения многоквартирных домов. Опыт Кемерово // Энергосбережение. 2021. №7. С. 58-67.
10. Немченко В.И., Посашков М.В. Методика оценки качества теплоснабжения по данным коммерческого учета тепловой энергии // СОК. 2019. №08(212). С. 44-47.

References

1. Pasyнков S.G., Tenyakova R.V. Analysis of the software suite operation in terms of thermal energy metering in housing and communal services. *Energoberezhenie* [Energy Saving]. 2008;(2):62-64. (In Russ.)
2. Gasho E.G., Gilev A.A. Balancing the energy parameters of buildings in the urban heat supply system. *Energoberezhenie* [Energy Saving]. 2015;(7):36-41. (In Russ.)
3. Livchak V.I. Actual heat consumption of buildings as an indicator of the quality and reliability of design. *AVOK* [Association of HVAC Engineers]. 2009;(2):4-14. (In Russ.)
4. Lupey A.G. Diagnostics of the state of heating systems of thermal energy consumers. *SOK* [Plumbing. Heating. Conditioning]. 2004;(8):48-52. (In Russ.)
5. Samarin O.D. Dependence between thermotechnical uniformity of external walls of residential buildings and their geometrical characteristics and climatic parameters. *SOK* [Plumbing. Heating. Conditioning]. 2022;(03(219)):52-54. (In Russ.)
6. Basalasev A.A. Predicting the consumption of thermal energy spent on heating and hot water supply. *Nauka YuURGU: materialy 66-y nauchnoy konferentsii* [SUSU Science: Proceedings of the 66th Scientific Conference]. Chelyabinsk: South Ural State University, 2014, pp. 633-638. (In Russ.)
7. Zavarzin B.B., Ryumin R.V., Chukarev A.G. A method for calculating heat loss for rooms. *Molodoy uchenyi* [Young Scientist]. 2017;(43(177)):40-43. (In Russ.)
8. Gasho E.G., Fokin A.M. Analysis of the dependence between thermal energy spent on heating and cooling buildings and various factors. *SOK* [Plumbing. Heating. Conditioning]. 2022;(02(242)):64-67. (In Russ.)

9. Borisov K.B. The influence of the heat supply quality on the actual heat loads of heating and hot water supply systems in apartment buildings. Experience of Kemerovo. *Energoberezhnie* [Energy Saving]. 2021;(7):58-67. (In Russ.)
10. Nemchenko V.I., Posashkov M.V. Methodology for assessing the quality of heat supply according to the commercial metering of heat energy. *SOK* [Plumbing. Heating. Conditioning]. 2019;(08(212)):44-47. (In Russ.)

Поступила 08.12.2022; принята к публикации 03.03.2023; опубликована 27.06.2023
Submitted 08/12/2022; revised 03/03/2023; published 27/06/2023

Гашо Евгений Геннадьевич – доктор технических наук, профессор,
Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия.
Email: 290461@bk.ru. ORCID 0000-0003-3685-5636

Фокин Алексей Михайлович – старший преподаватель,
Филиал Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Смоленске, Россия.
Email: fokssm@yandex.ru. ORCID 0000-0002-9116-7089

Evgeniy G. Gasho – DrSc (Eng.), Professor,
National Research University Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russia.
Email: 290461@bk.ru. ORCID 0000-0003-3685-5636

Aleksey M. Fokin – Senior Lecturer,
Smolensk Branch of National Research University Moscow Power Engineering Institute, Smolensk, Russia.
Email: fokssm@yandex.ru. ORCID 0000-0002-9116-7089

ЭКОНОМИКА, УПРАВЛЕНИЕ И РЫНОК ПРОДУКЦИИ

ECONOMICS, MANAGEMENT AND PRODUCT MARKET

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 658.562
DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-2-156-166



УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕКЛАМАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НА МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОМ ПРЕДПРИЯТИИ

Вакуленко Э.Ш., Денисова Я.В.

Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия

Аннотация. Высокое качество и надежность продукции в значительной степени зависят от качества используемых при ее создании материалов и комплектующих изделий. В свою очередь, это обеспечивается результатами рекламационной работы, проводимой с поставщиками закупаемой и покупателями готовой продукции. Именно поэтому работа с поставщиками и рекламационная деятельность являются одной из главных составляющих, обеспечивающих качество готовой продукции. В статье рассматривается процесс рекламационной деятельности АО «Казанский вертолетный завод». Объектом исследования является рекламационная деятельность предприятия в процессе изготовления вертолетной техники, предметом – процессный подход. В процессе исследования были установлены виды дефектов при производстве продукции и определено по каждому из них количество выявленных несоответствий. Был сделан вывод о том, что основной проблемой предприятия являются производственные дефекты покупных комплектующих изделий, которые поступают на предприятие от поставщиков. В ходе дальнейшей работы была рассмотрена процедура оценки поставщиков и выделены основные критерии, предъявляемые к ним. Для совершенствования работы с поставщиками авторами был использован процессный подход, применение которого позволило определить «узкие места» и разработать рекомендации для снижения брака и дефектов в процессе производства. Авторами статьи также было отмечено, что одним из существенных недостатков в рекламационной работе является отсутствие методики по оценке результативности рекламационной деятельности на предприятии. В связи с этим были предложены подходы, которые следует использовать для ее разработки. В заключении статьи определены основные направления по совершенствованию процесса рекламационной деятельности и разработаны конкретные мероприятия для повышения удовлетворенности потребителей. Рекомендации, изложенные в статье, будут полезны руководителям предприятий машиностроительной и других отраслей, а также лицам, ответственным за рекламационную работу, и позволят улучшить работу предприятий в этой важной области.

Ключевые слова: качество, рекламация, рекламационная деятельность, покупные комплектующие изделия, оценка поставщиков

© Вакуленко Э.Ш., Денисова Я.В., 2023

Для цитирования

Вакуленко Э.Ш., Денисова Я.В. Усовершенствование процесса рекламационной деятельности на машиностроительном предприятии // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №2. С. 156-166. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-2-156-166>



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

IMPROVING THE CLAIM PROCEDURE AT A MACHINERY MANUFACTURING PLANT

Vakulenko E.Sh., Denisova Ya.V.

Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

Abstract. A high quality and reliability of products largely depend on the quality of the materials and components used in their manufacturing. This is ensured, in turn, by the results of the claim settlement with suppliers of purchased products and buyers of finished products. That is why supplier relationship management and the claim procedure are one of the main components that ensure the quality of finished products. The paper discusses the claim procedure adopted at Kazan Helicopter Plant JSC. The object of the study is the claim procedure adopted at the enterprise, when manufacturing helicopters; the subject of the study is a process approach. In the course of the study, the authors identified the types of manufacturing defects and determined the number of identified non-conformities for every of them. It was concluded that the main difficulty of the enterprise was manufacturing defects in purchased components from suppliers. In the course of further research, the authors considered a supplier evaluation procedure and identified the main criteria set for them. To improve supplier relationship management, the authors used a process approach, whose application contributed to identifying “bottlenecks” and developing recommendations for reducing the volume of rejected products and manufacturing defects. The authors of the paper also noted that one of the significant shortcomings in the claim procedure was the lack of a methodology for assessing effectiveness of the claim settlement at the enterprise. In view of this, the paper contains the proposed approaches to its development. The paper conclusion presents main areas for improving the claim procedure and specific measures aimed at increasing consumer satisfaction. The recommendations set out in the paper will be useful to managers of enterprises in the engineering and other industries, as well as to people responsible for the claim settlement, and will improve the operation of enterprises in this important area.

Keywords: quality, claim, claim settlement, purchased components, supplier evaluation

For citation

Vakulenko E.Sh., Denisova Ya.V. Improving the Claim Procedure at a Machinery Manufacturing Plant. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 2, pp. 156-166. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-2-156-166>

Введение

На предприятии АО «Казанский вертолетный завод» (АО «КВЗ») одним из видов деятельности, обеспечивающих высокое качество конечной продукции, является рекламационная работа. АО «КВЗ» работает с огромным количеством поставщиков и от качества рекламационной деятельности зависит дальнейшее протекание производственного процесса и, соответственно, качество изготавливаемой продукции. Рекламация – это письменное заявление потребителя (получателя) по установленной форме поставщику на обнаруженные в период действия гарантийных обязательств дефекты изделия, несоответствия комплектности или другие несоответствия установленным требованиям, а также требования об их устранении, восстановлении исправного состояния (замене) [1].

Методы исследования

Предприятие может как направлять рекламации поставщикам некачественных покупных комплектующих изделий, так и получать рекламации от эксплуатирующих организаций (покупателей вертолетной техники) [2]. Объектом внимания в данной статье является именно рекламационная деятельность с предприятиями-поставщиками некачественной продукции, у которых АО «КВЗ» закупает покупные комплектующие изделия (ПКИ), а также анализ причин возникновения несоответствий и разработка корректирующих и предупреждающих действий с целью недопущения в производство бракованной покупной продукции.

С целью повышения качества выпускаемой продукции на предприятии АО «КВЗ» одним из подразделений службы качества (рекламационным бюро) ведется рекламационная работа с поставщиками ПКИ и материалов. Рекламационное

бюро ведет строгий учет и контроль актов исследования причин отказа, рекламационных актов, определяет посредством систематического анализа характерные и повторяющиеся дефекты, направляет письма поставщикам и предоставляет данные соответствующим подразделениям для дальнейшего анализа с целью усовершенствования деятельности. На основе полученных данных по рекламационной работе успешно решаются задачи по управлению качеством продукции [3].

В ходе рекламационной работы могут быть установлены следующие виды дефектов [4]:

- конструктивный – в случае, если выявлено, что дефект продукции вызван ошибкой изготовителя при проектировании, несовершенством принятых методов расчёта, недостаточной экспериментальной отработкой, а также недостатками или ошибками в конструкторской или эксплуатационной документации;

- производственный – в случае, если выявлено, что дефект продукции вызван ошибкой

изготовителя ПКИ, нарушением или несовершенством принятой технологии изготовления и контроля, а также недостатками или ошибками в технологической документации;

- эксплуатационный – в случае, если выявлено, что дефект продукции вызван нарушением потребителя требований и правил монтажа, испытаний, эксплуатации, установленных эксплуатационной документацией;

- дефект не подтвердился – в том случае, если в процессе исследования выявлено, что изделие забраковано ошибочно.

С целью выяснения причин возникновения брака покупных комплектующих изделий рассмотрим данные по рекламационной работе предприятия за период 2020-2022 гг. В общей сложности за этот период было составлено 252 рекламационных акта. После исследования забракованных ПКИ в зависимости от выявленного вида дефекта рекламационные акты разделили на 4 группы (табл. 1, рис. 1).

Таблица 1. Количество выявленных дефектов ПКИ за период 2020-2022 гг.

Table 1. Defects found in purchased components for 2020-2022

Период	Количество рекламационных актов на ПКИ, шт.			
	Конструктивный дефект	Производственный дефект	Эксплуатационный дефект	Дефект не подтвердился
2020 г.	2	63	15	7
2021 г.	0	55	21	5
2022 г.	2	53	20	9
Всего	4	171	56	21

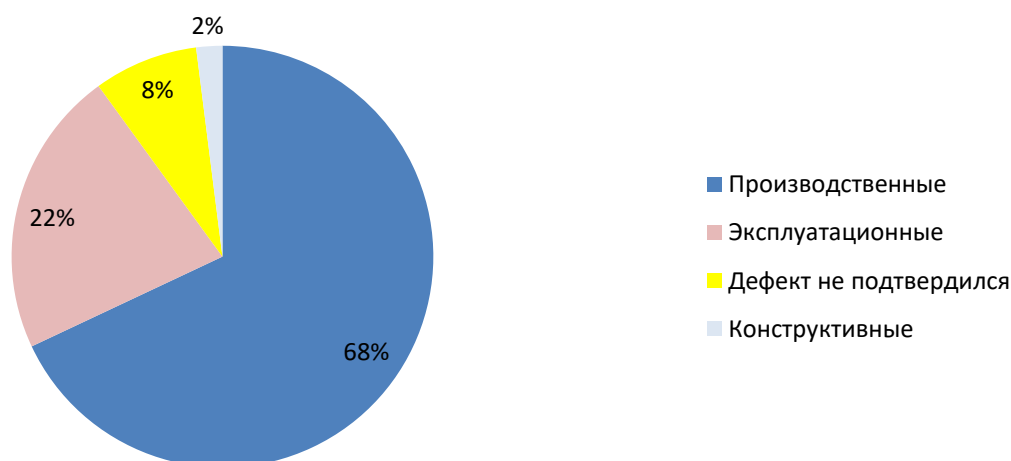


Рис. 1. Количество дефектов ПКИ по видам за период 2020-2022 гг. в процентах

Fig. 1. Defects in purchased components by types for 2020-2022 in percent

На основании представленных данных можно сделать вывод о том, что основной проблемой предприятия из года в год являются производственные дефекты покупных комплектующих изделий, которые поступают на предприятие от поставщиков. Такие дефекты на входном контроле обнаружить практически невозможно, даже при тщательном осмотре изделия [5].

Для улучшения результативности рекламационной работы на предприятии АО «КВЗ» было решено создать новую программу с целью создания общей базы актуальной информации между рекламационным бюро и отделом по работе с поставщиками. По этой причине на предприятии было разработано новое программное обеспечение на основе информационной системы 1С-документооборот, к которой имеют доступ оба подразделения [6].

Информационная база облегчает процесс проведения анализа полученных данных, обобщение результатов и составление отчетов. Далее на основании проведенных анализов можно делать соответствующие заключения по забракованной продукции на предприятии, выяснять причины и принимать конкретные решения. Работа в системе позволяет определить:

1. Общее количество рекламаций.
2. Количество рекламаций по вине поставщиков.
3. Количество рекламаций по вине структурных подразделений (цехов, отделов).
4. Причины возникновения дефектов.

С помощью данной информационной базы были проанализированы данные за 2022 г. по забракованным ПКИ на предмет выявленных дефектов (табл. 2).

Проведенный анализ дополнительно подтверждает, что одной из главных проблем предприятия в области качества является закупка у поставщиков дефектной продукции.

Основными критериями отбора и первичной оценки поставщиков являются:

- качество закупаемой продукции;

- цена закупаемой продукции;
- территориальное расположение предприятия-поставщика;
- условия оплаты;
- условия расчетов;
- наличие СМК;
- информационная готовность поставщика;
- способность осуществлять поставки требуемого объема;
- имидж поставщика на рынке, перспективность поставщика;
- соблюдение сроков поставок продукции.

Повторная оценка поставщиков проводится один раз в полгода в электронном виде, где оцениваются такие критерии, как качество изделий, своевременность поставок, стоимость продукции. Оценивают поставщиков также по результатам входного контроля, по количеству отказов ПКИ в результате сборки и отработки вертолетной техники, а также по количеству отказов изделий в процессе эксплуатации вертолетной техники. За каждый критерий поставщику выставляются баллы [7].

По результатам повторной оценки статус одобрения определяют путем суммирования полученных баллов. При получении свыше 69 баллов поставщику присваивается статус «одобренный», до 50 баллов – «временно одобренный», менее 50 баллов – «неприемлемый». Статус «безальтернативный» присваивается поставщику, который является монополистом или единственным поставщиком данного вида продукции независимо от набранного количества баллов [8]. В случае присвоения единственному поставщику статуса «неприемлемый», сотрудники службы отдела внешней комплектации направляют запрос главному конструктору предприятия для принятия решения о дальнейшем взаимодействии с таким поставщиком. Один поставщик по разным видам продукции может иметь различные статусы одобрения. Критерии оценки поставщиков по степени надежности представлены в табл. 3.

Таблица 2. Установленный характер дефектов ПКИ по актам исследования за 2022 г.

Table 2. Identified nature of defects in purchased components according to examination reports for 2022

Характеристика дефекта по актам исследования	Количество актов исследований в 2022 г.				Всего в 2022 г.
	1-й квартал	2-й квартал	3-й квартал	4-й квартал	
Дефекты поставщика	10	16	9	18	53
Дефект не подтвердился (отклоненные)	2	2	1	4	9
Эксплуатационный (по вине АО «КВЗ»)	6	4	3	7	20
Конструктивный	1	1	–	–	2
Итого	19	23	13	29	84

Таблица 3. Критерии оценки поставщиков
Table 3. Supplier evaluation criteria

Степень надежности поставщика	Описание действий
Более 90 баллов – высокая степень надежности поставщика	Нет необходимости в корректирующих мероприятиях. Формирование ТОП лучших поставщиков
70-89 баллов – средняя степень надежности поставщика	Постановка на контроль улучшения оценок (показателей) в течение 6 месяцев. Возможны плановые и внеплановые аудиты
50-69 баллов – группа риска по надежности поставщика	Обязательное составление планов мероприятий по улучшению ситуации, составление графика и проведение аудитов. Контроль исправления ситуации в течение 6 месяцев, если ситуация не меняется, то перевод поставщика в статус «необходим поиск альтернативы»
Менее 50 баллов – низкая степень надежности поставщика	Перевод в статус «неприемлемый», возможен запрет на закупку у данного поставщика

По результатам оценки поставщиков принимается решение о необходимости проведения аудитов поставщиков наиболее отказных ПКИ или об отказе в сотрудничестве с «неприемлемыми» поставщиками [9]. Процедура оценки поставщиков разработана в целях обеспечения гарантированного качества выпускаемой продукции.

При работе с поставщиками, которые не соответствуют требованиям, могут предприниматься следующие действия:

1) информирование поставщиков о новых требованиях и включение в договоры поставки дополнительных условий с указанием конкретных сроков выполнения этих мероприятий;

2) при работе с монопольными (безальтернативными) поставщиками проводится усиление входного контроля, увеличение запаса сроков поставок, проведение аудитов поставщиков, совместная разработка корректирующих мероприятий, увеличение запаса времени для замены и восстановления закупаемой продукции.

Проблемы, связанные с поставкой некачественных комплектующих, а также своевременный возврат ПКИ после их исследования и восстановления являются для предприятия крайне важными и, несмотря на все предпринимаемые меры, требуют доработки, прежде всего в области рекламационной деятельности. Одним из главных факторов, от которых зависит рекламационная работа, является грамотно выстроенная система управления. В этой связи представляется целесообразным использовать процессный подход, с помощью которого можно проанализировать любые процессы, в том числе и руководящие процессы менеджмента.

Результаты исследования и их обсуждение

Процессный подход, который лежит в основе построения современной СМК, базируется на принципе непрерывного совершенствования всех процессов на всех уровнях управления. Для реализации процессного подхода необходимо проводить: выявление процессов, оформление схемы взаимодействия процессов, идентификацию входов и выходов процессов, идентификацию потребителей и поставщиков, обеспечение процессов необходимыми ресурсами, определение критериев и методов, необходимых для обеспечения уверенности в эффективности управления этими процессами, регулярное наблюдение, измерение и анализ процессов документированными методами, реализацию мероприятий, необходимых для достижения запланированных результатов и постоянного улучшения [10].

Процесс рекламационной деятельности можно отнести к разряду критических, то есть тех процессов, ненадлежащая организация которых или несоблюдение требований к выполнению которых могут представлять фактическую или потенциальную опасность для производственного процесса в целом. Поэтому представляется крайне важным провести его детальный анализ, выявить «слабые» места и разработать предложения по совершенствованию данного процесса.

Рекламационную деятельность АО «КВЗ» можно представить в виде упрощенной схемы процесса (рис. 2).

Для четкого управления процессом необходимо выделить его подпроцессы, установить взаимосвязи между ними, а также их детально описать и проанализировать (рис. 3).

Перечислим их:

- планирование рекламационной деятельности (сбор информации, установление списка работ, извещение поставщика ПКИ о выявлении брака комплектующего изделия);
- составление рекламационных документов (в этом случае необходимо вызвать поставщика забракованного ПКИ, создать комиссию по определению возникновения причин брака на предприятии и принять решение о необходимости отправки изделия на предприятие-изготовитель ПКИ с составлением рекламационного акта);
- восстановление забракованного ПКИ (поставщик ПКИ может проводить указанное действие как на самом АО «КВЗ», так и на своем предприятии с составлением программы исследования, анализом причин брака и оформлением акта исследования причин отказа);
- контроль рекламационной деятельности (проверка работоспособности восстановленного изделия на АО «КВЗ», своевременное получение информации о проведенных исследованиях неисправных изделий, определение виновника возникновения неисправности по результатам акта исследования поставщика, оценка рекламационной работы, проводимой у поставщика, учет и анализ рекламационных актов, повышение ответственности поставщиков за качество поставляемой продукции, а также повышение ответственности работников АО «КВЗ» за соблюдением требований эксплуатационной документации, выполнением требований технических условий, стандартов, контрактов, договоров, условий поставки и совместных решений);
- комплексный анализ поставщика (проводится уже при принятии решения по дальнейшему сотрудничеству с поставщиком ПКИ на основании полученных данных его оценки).

Процесс рекламационной деятельности АО «КВЗ» предусматривает серьезную работу с поставщиками комплектующих изделий – они должны быть, прежде всего, надежными партнерами предприятия в реализации его стратегии организации производства, поэтому выбор поставщика должен осуществляться на основе его оценки. Для выполнения данной задачи на предприятии должна быть разработана и утверждена методика по оценке поставщиков, позволяющая проводить их комплексный анализ, выбирать наиболее надежных поставщиков с проверенной репутацией и высокими ключевыми показателями [11].

Анализируя деятельность предприятия в области улучшения рекламационной работы с по-

ставщиками ПКИ, можно заметить, что одной из основных ошибок является неудовлетворительная организация совместной работы различных отделов предприятия. Руководитель процесса должен умело координировать совместную работу отделов предприятия, поэтому он должен обладать всеми необходимыми компетенциями, опытом, уважением, и для этого его следует наделить всеми необходимыми полномочиями.

Кроме того, для успешной организации работы между отделами должны быть согласованы единые цели, задачи и ожидания. Руководитель процесса должен сообщать сроки и устанавливать четкие цели. Самой большой проблемой в организации совместной работы между отделами является разница приоритетов и ключевых показателей производительности разных отделов. Поэтому необходимо разработать реестр – документ, определяющий последовательность выполнения работ, их исполнителей, результаты каждой работы и всего процесса. Мотивацию сотрудников необходимо осуществлять посредством использования КРП сотрудников и учета степени их активности при выполнении процесса, что позволит достичь быстрого и бесперебойного протекания бизнес-процесса.

На предприятии для регистрации данных по рекламационной деятельности ведется журнал учета предъявляемых рекламаций. Его форма может варьироваться, но в общем случае должны присутствовать графы, перечисленные в Приложении Б.11 ГОСТ РВ 0015-703-2019 [2]. Очевидно, что для полноты оценки качества рекламационной деятельности сведений, содержащихся в журнале, недостаточно. Поэтому рекомендуется к существующим графам добавить следующие показатели:

1. Время рассмотрения рекламации.
2. Мероприятия, проводимые с целью недопущения дефекта.
3. Время устранения несоответствий.
4. Размер ущерба, причиненного предприятию из-за поставки некачественной продукции.

Данные сведения необходимо своевременно вносить в электронную базу и регулярно ее обновлять. Это позволит упростить процедуру систематизации и обработки данных, даст возможность оценивать результативность рекламационной работы за определенный период времени.

Для того чтобы понять, насколько результативна рекламационная деятельность на предприятии, ее необходимо периодически оценивать [12]. На предприятии АО «КВЗ» такая методика отсутствует, что является существенным недостатком.

Оценка результативности рекламационной деятельности должна базироваться на определении плановых и фактических значений показателей качества за рассматриваемый период и коэффициента значимости (весомости) каждого показателя внутри процесса. Для оценки результативности рекламационной деятельности мы выбрали самые главные показатели – время исследования изделия, количество рекламационных актов, время возврата отремонтированных изделий, размер ущерба, причиненного поставщиком из-за поставки некачественного ПКИ. Рассматриваемым периодом может быть месяц, квартал, полугодие, год. Руководителю процесса необходимо для каждого показателя вначале периода анализа установить плановое значение.

Рассмотрим данный вопрос на примере первого показателя качества – времени исследования и восстановления изделия (табл. 4). Согласно п. 5.3.8 ГОСТ РВ 0015-703-2019 этот срок не должен превышать 20 суток, что и можно взять в качестве планового значения. Либо необходимо в течение определенного периода времени (например, нескольких месяцев) собирать данные о времени исследования изделия и устранении несоответствий и определять затем их среднее значение, которое впоследствии будет использоваться как эталонный показатель и служить ориентиром для оценки результативности процесса. Фактические значения подсчитываются в конце каждого анализируемого периода и вносятся в итоговую таблицу (см. табл. 4).

Коэффициент весомости – количественная характеристика значимости показателя среди других показателей качества [13]. Он должен устанавливаться высшим руководством и при необходимости корректироваться в зависимости от сложности конструкции ПКИ, условиям его применения и т.д. Наиболее легким для оценки и

расчета коэффициента весомости является метод предпочтения. При использовании данного метода группу экспертов просят пронумеровать весомости всех критериев в порядке их важности, так что весомость наименее важного критерия получает №1, следующая по важности – №2 и т.д. Применительно к первому показателю (время исследования и устранения несоответствий изделия) могут оцениваться такие критерии, как удаленность поставщика, сложность изделия (наличие в нем комплектующих изделий других изготовителей), повторяемость дефекта, ремонтпригодность изделия и т.д. Коэффициент весомости g рассчитывается по формуле

$$g = \frac{\sum_{i=1}^n R_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m R_{ij}}, \quad (1)$$

где n – количество экспертов, участвующих в оценке; m – число оцениваемых показателей; R_{ij} – место, на которое поставил i -й критерий j -й эксперт.

Затем вычисляются значения результативности показателя процесса P_{Π} , представляющего отношение фактического значения показателя качества к плановому значению этого показателя в процентах:

$$P_{\Pi} = \frac{Q_{\Phi}}{Q_{\Pi}}; \quad (2)$$

$$P_{\Pi} = \frac{Q_{\Pi}}{Q_{\Phi}}. \quad (3)$$

Формула (2) применяется в случае, если фактическое значение меньше планового значения, формула (3) – в случае, если фактическое значение больше планового.

Таблица 4. Данные для оценки результативности рекламационной деятельности

АО «Казанский вертолетный завод»

Table 4. Data used to evaluate effectiveness of the claim procedure at Kazan Helicopter Plant JSC

Параметры и показатели	Плановое значение Q_{Π}	Фактическое значение Q_{Φ}	Коэффициент весомости g	Результативность показателя процесса P_{Π}
Время исследования и восстановления изделия				
Количество рекламаций по вине:				
– поставщиков ПКИ				
– АО «КВЗ»				
Время возврата кондиционной (отремонтированной) продукции				
Размер ущерба, причиненного предприятию из-за поставки некачественной продукции				

После вычисления результативности показателя для каждого параметра все данные заносятся в итоговую табл. 4. Качество процесса будет тем выше, чем ниже значения его показателей качества.

После заполнения таблицы рассчитывается результативность процесса рекламационной деятельности и осуществляется ее оценка. При $0 < P_{\Pi} < 0,5$ результативность процесса определяется как недопустимая, при $0,51 < P_{\Pi} < 0,65$ – низкий уровень результативности, при $0,66 < P_{\Pi} < 0,75$ – средний уровень, при $0,76 < P_{\Pi} < 0,85$ – выше среднего и при $0,86 < P_{\Pi} < 1$ – высокий уровень результативности.

Итоговая результативность процесса P вычисляется по следующей формуле

$$P = \frac{P_{i\Pi} + P_{i\Pi} + P_{i\Pi} + P_{i\Pi}}{4}, \quad (4)$$

где i – порядковый номер показателя процесса рекламационной деятельности; 4 – количество показателей процесса рекламационной деятельности.

Процесс будет оценен как «достаточно результативный» при нахождении в диапазоне $0,75 < P < 0,85$, при $P < 0,65$ процесс будет признан «нерезультативным».

Данные, полученные при оценке результативности процесса, должны быть проанализированы руководством и положены в основу управленческих решений, направленных на улучшение процесса рекламационной деятельности.

Кроме того, «Карточки поставщиков» необходимо дополнить следующими сведениями:

- процентное соотношение бракованной продукции к каждой партии поступившей продукции;
- способность предоставления сервисного обслуживания;
- предоставление обменного фонда (для исключения срывов сдачи основного изделия по контракту).

Полученные данные также необходимо оценить и проанализировать.

Помимо оценки результативности работы со стороны предприятия-потребителя (АО «КВЗ») должна оцениваться результативность действий, проводимых со стороны поставщиков. Результативность должна измеряться на основании следующих показателей:

- уровень брака по результатам входного контроля: отношение процента ПКИ, забракованных по результатам входного контроля, к общему количеству поставленных ПКИ;

- своевременность поставок: отношение количества договоров (заявок), по которым поставки были осуществлены в срок, к общему количеству договоров (заявок);

- компенсация поставщиками затрат на некачественную продукцию: отношение суммы компенсации к сумме затрат;

- повышение рейтинга поставщика ПКИ: количество поставщиков, достигших улучшения рейтинга.

В случае «единственного поставщика» необходимо проведение ряда предупреждающих мероприятий:

- ужесточение входного контроля ПКИ (переход к сплошному контролю);

- включение в договор поставки требования на обязательное предоставление подменного фонда ПКИ на период проведения исследования;

- включение в договор поставки требования по максимальному сроку восстановления отказавшего изделия, не превышающему 60 дней с даты поступления изделия поставщику, и обязательно оформлению решения о продлении срока восстановления согласно ГОСТ РВ 0015-703-2019.

С каждым предприятием-поставщиком необходимо работать индивидуально. В случае повторяющихся дефектов комплектующих изделий следует вырабатывать совместные решения по совершенствованию процессов производства ПКИ [14]. Если результаты проведенных мероприятий оказываются неудовлетворительными и продолжается дальнейшая поставка несоответствующих комплектующих изделий, то необходимо принимать решение о замене поставщика [15].

Заключение

В ходе проделанной работы было установлено, что основными направлениями по улучшению процесса рекламационной деятельности следует считать: своевременное и качественное устранение неисправностей ПКИ, всестороннее проведение исследований забракованных изделий, повышение ответственности поставщиков за качество поставляемой продукции и, самое главное, принятие управленческого решения по дальнейшей работе с поставщиком отказавшего изделия после проведения комплексного анализа его деятельности.

Для повышения удовлетворенности потребителей вертолетной техники и улучшения качества рекламационной деятельности на предприятии рекомендовано:

- а) разработать новый программный продукт по ведению рекламационной работы;

б) обучить сотрудников рекламационного бюро работе с новым программным продуктом;
в) на регулярной основе проводить оценку результативности рекламационной деятельности АО «КВЗ»;

г) расширить критерии при проведении оценки поставщиков;

д) улучшить обратную связь с поставщиками продукции;

е) обеспечить слаженную работу отдела закупок, отдела по работе с поставщиками и рекламационного бюро, разработав регламент для участников процесса рекламационной деятельности;

ж) в целях предоставления данных входного контроля от поставщиков ПКИ задействовать в процесс рекламационной деятельности сектор входного контроля.

Для выполнения вышеперечисленных задач и эффективного функционирования СМК необходимо осуществлять тщательный подбор персонала, обладающего соответствующим образованием, квалификацией, опытом работы и компетенциями, требования к которым должны быть определены в должностных инструкциях и подтверждаться результатами аттестации. Кроме того, необходимо регулярно проводить повышение квалификации персонала, обучать работников современным приемам и методам, необходимым им для выполнения своей повседневной работы, а также разъяснять Политику предприятия в области качества. При отсутствии необходимой подготовки персонала невозможно добиться качественного протекания процессов и обеспечить полноценный вклад каждого члена трудового коллектива в достижение стратегических целей.

Список источников

- ГОСТ РВ 0015-703-2019. Система разработки и постановки на производство военной техники. Порядок предъявления и удовлетворения рекламаций. Основные положения / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. М.: Стандартинформ, 2019.
- Порядок проведения рекламационной работы: учеб. пособие / Д.В. Марусов [и др.]; Балт. гос. техн. ун-т. СПб., 2019. 26 с.
- СТО 617.110.131-2022. СМК. Входной контроль ПКИ. Порядок проведения. Казань, 2022.
- СТО 617.110.001-2018. СМК. Учет брака в производстве. Казань, 2018.
- Shetwan A.G., Vitanov V.I., Tjahjono B. Allocation of quality control stations in multistage manufacturing systems, *Computers & Industrial Engineering*. 2017, vol. 60, pp. 473-484.
- СТО 617.110.241-2019. СМК. Управление несоответствующей продукцией. Казань, 2019.
- СТО 617.115.246-2021. СМК. Закупки. Порядок управления. Казань, 2021.
- Wenliang Chen and Zheng Wang, Senior Member, Integrated Capacity Planning and Production Control of an Assembly Manufacturing System, *IEEE Transactions on engineering management*, june 2021, vol. 68, no. 3, pp. 868-880.
- СТО 617.176.367-2020. СМК. Порядок проведения аудита предприятий-поставщиков (изготовителей) покупных комплектующих изделий и материалов. Казань, 2020.
- Что такое процессный подход и как его внедрить / iteam [Электронный ресурс]. URL: <https://blog.iteam.ru/chto-takoe-protsessnyj-podhod-i-kak-ego-vnedrit>, (свободный, дата обращения: 05.12.2022).
- Козлова Д.Ю., Денисова Я.В., Сопин В.Ф. Методические подходы по созданию эффективной системы входного контроля и управления поставками // *Контроль. Диагностика*. 2021. Т. 24. №7. С. 42-49.
- Школина Т.В, Изотикова Е.Ю. Оценка и улучшение качества процессов рекламационной деятельности // *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2017. №1(54). С. 254-260.
- ГОСТ 15467-79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения / Государственный комитет СССР по стандартам. М.: Стандартинформ, 2009.
- Денисова Я.В., Козлова Д.Ю., Сопин В.Ф. Управление несоответствиями на предприятии с помощью статистических методов // *Вестник технологического университета*. 2021. Т. 24. №2. С. 93-97.
- Eusébio Nunes, Sérgio Sousa. A dynamic programming model for designing a quality control plan in a manufacturing process // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2019, vol. 38, pp. 581-588.

References

- State standard GOST RV 0015-703-2019. *Sistema razrabotki i postanovki na proizvodstvo voennoy tekhniki. Poryadok predyavleniya i udovletvoreniya reklamatsiy. Osnovnye polozheniya* [The system of development and launching into production of military vehicles. The procedure for filing and settling of claims. Main provisions]. Federal Agency on Technical Regulation and Metrology. Moscow: Standartinform, 2019. (In Russ.)
- Marusov D.V. et al. *Poryadok provedeniya reklamatsionnoy raboty: ucheb. posobie* [The claim procedure: study guide]. Saint Petersburg: Baltic State Technical University, 2019, 26 p. (In Russ.)
- Company standard STO 617.110.131-2022. *SMK. Vkhodnoy kontrol PKI. Poryadok provedeniya* [QMS. Incoming control of purchased components. Procedure]. Kazan, 2022. (In Russ.)

4. Company standard STO 617.110.001-2018. *SMK. Uchet braka v proizvodstve* [QMS. Recording rejected products]. Kazan, 2018. (In Russ.)
5. Shetwan A.G., Vitanov V.I., Tjahjono B. Allocation of quality control stations in multistage manufacturing systems. *Computers & Industrial Engineering*. 2017;60:473-484.
6. Company standard STO 617.110.241-2019. *SMK. Upravlenie nesootvetstvuyushchey produktsiyey*. [QMS. Control of non-conforming products]. Kazan, 2019. (In Russ.)
7. Company standard STO 617.115.246-2021. *SMK. Zakupki. Poryadok upravleniya* [QMS. Procurement. Control procedure]. Kazan, 2021. (In Russ.)
8. Wenliang Chen, Zheng Wang. Integrated capacity planning and production control of an assembly manufacturing system. *IEEE Transactions on Engineering Management*. 2021;68(3):868-880.
9. Company standard STO 617.176.367-2020. *SMK. Poryadok provedeniya audita predpriyatiy-postavshchikov (izgotoviteley) pokupnykh komplektuyushchikh izdeliy i materialov* [QMS. The procedure for auditing suppliers (manufacturers) of purchased components and materials]. Kazan, 2020. (In Russ.)
10. What a process approach is and how to introduce it. Available at: <https://blog.iteam.ru/chto-takoe-protsessnyj-podhod-i-kak-ego-vnedrit>. (Accessed on December 05, 2022).
11. Kozlova D.Yu., Denisova Ya.V., Sopin V.F. Methodological approaches to developing an efficient incoming control and supply management system. *Kontrol. Diagnostika* [Control. Diagnostics]. 2021;24(7):42-49. (In Russ.)
12. Shkolina T.V., Izotikova E.Yu. Evaluation and improvement of the quality of the claim procedure. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Bryansk State Technical University]. 2017;(1(54)):254-260. (In Russ.)
13. State standard GOST 15467-79. *Upravlenie kachestvom produktsii. Osnovnye ponyatiya. Terminy i opredeleniya* [Product-quality control. Basic concepts. Terms and definitions]. State Committee of the USSR for Standards. Moscow: Standartinform, 2009. (In Russ.)
14. Denisova Ya.V., Kozlova D.Yu., Sopin V.F. Managing non-conformities at an enterprise using statistical methods. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of Technological University]. 2021; 24(2):93-97. (In Russ.)
15. Eusébio Nunes, Sérgio Sousa. A dynamic programming model for designing a quality control plan in a manufacturing process. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2019;38:581-588.

Поступила 20.03.2023; принята к публикации 02.05.2023; опубликована 27.06.2023
Submitted 20/03/2023; revised 02/05/2023; published 27/06/2023

Вакуленко Эльмира Шамилевна – магистрант кафедры аналитической химии, сертификации и менеджмента качества, Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия. Email: v.elmira@mail.ru.

Денисова Яна Владимировна – кандидат экономических наук, доцент кафедры аналитической химии, сертификации и менеджмента качества, Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия. Email: yana-denisova@inbox.ru.

Elmira Sh. Vakulenko – master's student of the Department of Analytical Chemistry, Certification and Quality Management, Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia. Email: v.elmira@mail.ru.

Yana V. Denisova – PhD (Economics), Associate Professor of the Department of Analytical Chemistry, Certification and Quality Management, Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia. Email: yana-denisova@inbox.ru.