

ВЕСТНИК

Магнитогорского государственного технического
университета им. Г.И. Носова

2022. Т.20, №3

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

Издается с марта 2003 года

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Председатель редакционной коллегии
В.М. Колокольников (Россия)

Ж.-Б. Вогт (Франция), 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), 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

© ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2022

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

Адрес издателя:

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

Адрес типографии:

455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», участок оперативной полиграфии
Выход в свет 26.09.2022. Заказ 232. Тираж 500 экз. Цена свободная.

VESTNIK

of Nosov Magnitogorsk State Technical University

2022. Vol.20, no.3

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

PUBLISHED SINCE MARCH, 2003

EDITORIAL BOARD MEMBERS

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

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

EDITORIAL STAFF

Editor-in-Chief O.N. Tulupov

First Deputy Chief Editor M.A. Polyakova

Deputy Chief Editors:

A.G. Korchunov, O.S. Logunova,
V.R. Khrashin, N.N. Orekhova

Editor N.P. Boyarova

Technical Editor A.A. Neroda

Translated into English O.E. Sukhikh

© Federal State Budgetary Institution of Higher Education
Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2022

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

Publisher office:

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

Printing office:

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

Publication date: 26.09.2022. Order 232. Circulation: 500. Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

Разработка полезных ископаемых.....	5
<i>Медяник Н.Л., Смирнова А.В., Коляда Л.Г., Бессонова Ю.А.</i>	
Комплексная переработка железного концентрата титаномагнетитовой руды селективным разделением и концентрированием железа, ванадия и титана химическими методами.....	5
<i>Гордеев Д.В., Петров Г.В., Никитина Т.Ю.</i>	
Применение двухстадийного сернокислого и хлоридного выщелачивания для переработки сульфидных полиметаллических концентратов.....	13
<i>Хрунина Н.П.</i>	
Моделирование гидродинамических эффектов при микродезинтеграции высокоглинистых минеральных компонентов в гидросмесьях.....	26
<i>Чебан А.Ю., Секисов А.Г.</i>	
Совершенствование технологии разработки сложноструктурных месторождений с применением комбинированной выемки руд.....	35
<i>Зубков А.А., Калмыков В.Н., Кулсайтов Р.В., Кутлубаев И.М., Неугомонов С.С., Туркин И.С.</i>	
Оценка рисков крепления поверхностей выработок фрикционной анкерной крепью	45
<i>Кузнецов Д.В., Косолапов А.И.</i>	
Методология обоснования горнотранспортного оборудования для рудных карьеров	54
Технологии переработки и утилизации техногенных образований и отходов	64
<i>Дорош Е.А., Тальгаммер Б.Л.</i>	
Обоснование рациональных способов вовлечения в разработку отвалов россыпной золотодобычи.....	64
<i>Сафарова Л.Р.</i>	
Планирование порождения отходов и разработка технологии их жизненного цикла в APQP-проектах подготовки производства нового изделия.....	77
Технологии обработки материалов.....	87
<i>Муллина Э.Р., Мишурина О.А., Бессонова Ю.А., Басков В.А., Гамиров Д.Р., Волкова Д.В., Жамбуришина К.Б.</i>	
Анализ факторов, влияющих на качество топливных брикетов.....	87
<i>Дегтярева-Кашутина А.С., Болдырев И.С.</i>	
Математическая модель определения температуры в зоне контакта при круглом врезном шлифовании	94
<i>Акинцева А.В., Переверзев П.П.</i>	
Модель расчета текущего значения глубины резания в автоматическом ступенчатом цикле программной подачи на операции плоского шлифования с ЧПУ	103
<i>Федоров А.А., Полонянкин Д.А., Бредгауэр Ю.О., Жданова Ю.Е., Линовский А.В., Бобков Н.В.</i>	
Влияние фазового состава на образование нано- и микротрещин в приповерхностном слое титановых сплавов, подвергнутых электроэрозионной обработке.....	111

CONTENTS

Mining.....	5
<i>Medyanik N.L., Smirnova A.V., Kolyada L.G., Bessonova Yu.A.</i>	
Comprehensive Processing of an Iron Concentrate of Titanomagnetite Ore by A Selective Separation and Concentration of Iron, Vanadium and Titanium by Chemical Methods	5
<i>Gordeev D.V., Petrov G.V., Nikitina T.Yu.</i>	
The Use of Two-Stage Sulphuric Acid and Chloride Leaching for the Processing of Sulphide Polymetallic Concentrates	13
<i>Khrunina N.P.</i>	
Modeling of Hydrodynamic Effects in Microdisintegration of High-Clay Mineral Components in Slurries	26
<i>Cheban A.Yu., Sekisov A.G.</i>	
Improvement in the Technology for the Development of Complex Deposits Applying Combined Ore Extraction.....	35
<i>Zubkov A.A., Kalmykov V.N., Kulsaitov R.V., Kutlubaev I.M., Neugomonov S.S., Turkin I.S.</i>	
Risk Assessment of Supporting Surfaces of Workings with Friction Roof Bolting.....	45
<i>Kuznetsov D.V., Kosolapov A.I.</i>	
Methodology for Justifying the Selection of Mining and Conveyor Equipment for Ore Quarries	54
Recycling of Man-Made Mineral Formations and Waste	64
<i>Dorosh E.A., Talgamer B.L.</i>	
Rationale for Feasible Ways of Involving Dumps of Placer Gold Mining in the Development	64
<i>Safarova L.R.</i>	
Planning Waste Generation and Developing the Technology for the Life Cycle in APQP Projects for the Preparation of Manufacturing a New Product	77
Material Process Engineering	87
<i>Mullina E.R., Mishurina O.A., Bessonova Yu.A., Baskov V.A., Gamirov D.R., Volkova D.V., Zhamburshina K.B.</i>	
Analysis of Factors Influencing the Quality of Fuel Briquettes	87
<i>Degtyareva-Kashutina A.S., Boldyrev I.S.</i>	
Mathematical Model for Determining Contact Zone Temperature During Cylindrical Plunge Grinding.....	94
<i>Akintseva A.V., Pereverzev P.P.</i>	
Model of Calculating the Current Value of the Cutting Depth in an Automatic Stepwise Cycle of the Programmed Feed on a CNC-Controlled Flat Grinding Operation.....	103
<i>Fedorov A.A., Polonyankin D.A., Bredgauer Iu.O., Zhdanova Iu.E., Linovsky A.V., Bobkov N.V.</i>	
Effect of a Phase Composition on Nano- and Microcrack Formation in the Near-Surface Layer of Titanium Alloys after Electrical Discharge Machining	111

**Стандартизация, сертификация
и управление качеством..... 122**

Васецкая Н.О.

Изобретательская деятельность в условиях
неопределённости будущего технического
прогресса: стандартизация и проблемы
повышения качества научных разработок 122

**Новые технологические процессы
и оборудование..... 130**

Груба О.Н., Ардашев Д.В.

Особенности электрохимического поведения
металлических электродов в модельных
растворах хромирования..... 130

Попов И.П.

Автостабилизированный ротатор 141

**Энергетика металлургии, энергосбережение
и электротехнические комплексы..... 147**

Дзюба М.А., Сафонов В.И.

Вклад питающей сети и промышленного
предприятия в качество электроэнергии в точке
поставки электроэнергии..... 147

**Standardization, Certification
and Quality Management.....122**

Vasetskaya N.O.

Inventor Work Amid Uncertainty
of the Future Technical Progress:
Standardization and Problems
of Improving R&D Quality..... 122

**New Technological Processes
and Equipment..... 130**

Gruba O.N., Ardashev D.V.

Electrochemical Behaviour of Metal
Electrodes in Model Chrome
Plating Solutions..... 130

Popov I.P.

Automatic Stabilized Rotator..... 141

**Metallurgical Power Engineering, Energy Saving
and Electrical Systems..... 147**

Dziuba M.A., Safonov V.I.

Contribution of a Supply Network and an Industrial
Site to the Electric Power Quality at the Point
of Delivery 147

РАЗРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ MINING

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

УДК 622.349.4'341.1:[669.295:669.292.3]

DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-3-5-12



КОМПЛЕКСНАЯ ПЕРЕРАБОТКА ЖЕЛЕЗНОГО КОНЦЕНТРАТА ТИТАНОМАГНЕТИТОВОЙ РУДЫ СЕЛЕКТИВНЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ И КОНЦЕНТРИРОВАНИЕМ ЖЕЛЕЗА, ВАНАДИЯ И ТИТАНА ХИМИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Медяник Н.Л., Смирнова А.В., Коляда Л.Г., Бессонова Ю.А.

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

Аннотация. В настоящее время комплексные титаномагнетитовые руды являются одним из ведущих промышленных источников железа и основным типом минерального сырья для получения титана, ванадия и других ценных компонентов. Руды Волковского месторождения по своему составу и генетическим особенностям являются уникальными. Единственное аналогичное месторождение за рубежом – Енжелес, США – не перерабатывается. Рентабельная переработка этих руд возможна только при применении комплексного подхода. На Красноуральской обогатительной фабрике «Святогор» из титаномагнетитовой руды Волковского месторождения получают железный концентрат с содержанием ценных компонентов в количестве, достаточном для их извлечения. Комплексная переработка железного концентрата предусматривает получение не только железа, но и приоритетно присутствующих в концентрате ванадия, титана химическими методами. Таким образом, целью работы являлось изучение возможности комплексной переработки железного концентрата титаномагнетитовой руды. В работе показана возможность селективного разделения и концентрирования ценных компонентов железного концентрата, полученного при обогащении титаномагнетитовой руды Волковского месторождения. Ввиду особенности химического и минералогического состава железного концентрата и опираясь на результаты гранулометрического, рентгеноструктурного и рентгенофлуоресцентного анализов в работе предлагается использовать химические методы обогащения. В ходе проведения исследований было установлено, что хлороводородным кислотным выщелачиванием железного концентрата возможно селективно разделить ванадий от железа и титана, выделяя в раствор, а титан сконцентрировать в кеке. В работе доказано, что нецелесообразно использовать растворы серной кислоты для селективного разделения железа, ванадия и титана из-за потерь титана в растворе.

Ключевые слова: железо, ванадий, титан, титаномагнетитовая руда, железный концентрат, селективное разделение, концентрирование, химические методы

© Медяник Н.Л., Смирнова А.В., Коляда Л.Г., Бессонова Ю.А., 2022

Для цитирования

Комплексная переработка железного концентрата титаномагнетитовой руды селективным разделением и концентрированием железа, ванадия и титана химическими методами / Медяник Н.Л., Смирнова А.В., Коляда Л.Г., Бессонова Ю.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №3. С. 5-12. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-3-5-12>



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

COMPREHENSIVE PROCESSING OF AN IRON CONCENTRATE OF TITANOMAGNETITE ORE BY A SELECTIVE SEPARATION AND CONCENTRATION OF IRON, VANADIUM AND TITANIUM BY CHEMICAL METHODS

Medyanik N.L., Smirnova A.V., Kolyada L.G., Bessonova Yu.A.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Now, complex titanomagnetite ores are one of leading industrial sources of iron and a main type of mineral raw materials used to produce titanium, vanadium and other valuable components. The ores of the Volkovsky deposit are unique in their composition and genetic features. The only similar foreign deposit (Angeles, USA) is not processed. Profitable processing of these ores is possible only if applying a comprehensive approach. The Krasnouralsk concentrating plant of JSC Svyatogor produces an iron concentrate containing valuable components in an amount sufficient for their extraction from titanomagnetite ore of the Volkovsky deposit. The comprehensive processing of the iron concentrate provides for the production of not only iron, but also vanadium and titanium, which are predominantly present in the concentrate, by chemical methods. Thus, the research was aimed at studying potential comprehensive processing of the iron concentrate of titanomagnetite ore. The paper describes a selective separation and concentration of valuable components of the iron concentrate produced during enrichment of titanomagnetite ore from the Volkovsky deposit. It is proposed to use chemical methods of enrichment in view of the peculiarity of the chemical and mineralogical composition of the iron concentrate and the particle size, X-ray diffraction and X-ray fluorescence analyses. The studies revealed that it was possible to selectively separate vanadium from iron and titanium by hydrochloric acid leaching of the iron concentrate, releasing into the solution, and concentrate titanium in the cake. The paper demonstrates that it is not feasible to use sulfuric acid solutions for the selective separation of iron, vanadium and titanium due to titanium losses in the solution.

Keywords: iron, vanadium, titanium, titanomagnetite ore, iron concentrate, selective separation, concentration, chemical methods

For citation

Medyanik N.L., Smirnova A.V., Kolyada L.G., Bessonova Yu.A. Comprehensive Processing of an Iron Concentrate of Titanomagnetite Ore by a Selective Separation and Concentration of Iron, Vanadium and Titanium by Chemical Methods. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 3, pp. 5-12. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-3-5-12>

Введение

Полиминеральные титаномагнетитовые руды в настоящее время являются одним из ведущих промышленных источников железа и основным типом сырья для получения ванадия, титана и других ценных компонентов. Применение комплексного подхода при переработке титаномагнетитов с целью получения не только железного концентрата, но и других ценных компонентов, содержащихся в них, позволяет повысить инвестиционную привлекательность освоения таких месторождений. Кроме того, известно, что металлургическая отрасль испытывает определённые трудности в сырьевом сегменте в связи с истощением запасов высоколиквидных железных руд, альтернативой которых являются титаномагнетиты. Также на мировом рынке увеличивается спрос на ванадий и

титан, 90 и 60% мирового запаса данных металлов сосредоточены в титаномагнетитовых рудах [1, 9, 11]. Таким образом, проблема комплексной переработки титаномагнетитов является остроактуальной и требует новых подходов к ее решению.

Титаномагнетиты Волковского месторождения – это полиметаллическая руда, содержащая: Fe – 9,970%, Cu – 0,760%, P_2O_5 – 1,780%, V_2O_5 – 0,117%. По своему составу и генетическим особенностям данная руда является уникальной. Единственное аналогичное месторождение за рубежом – Енжелес, США – не перерабатывается [5]. В России на Красноуральской обогатительной фабрике АО «Святогор» из титаномагнетитовой руды Волковского месторождения получают медный и железный концентраты. На **рис. 1** представлена схема переработки руды Волковского месторождения [4, 12].

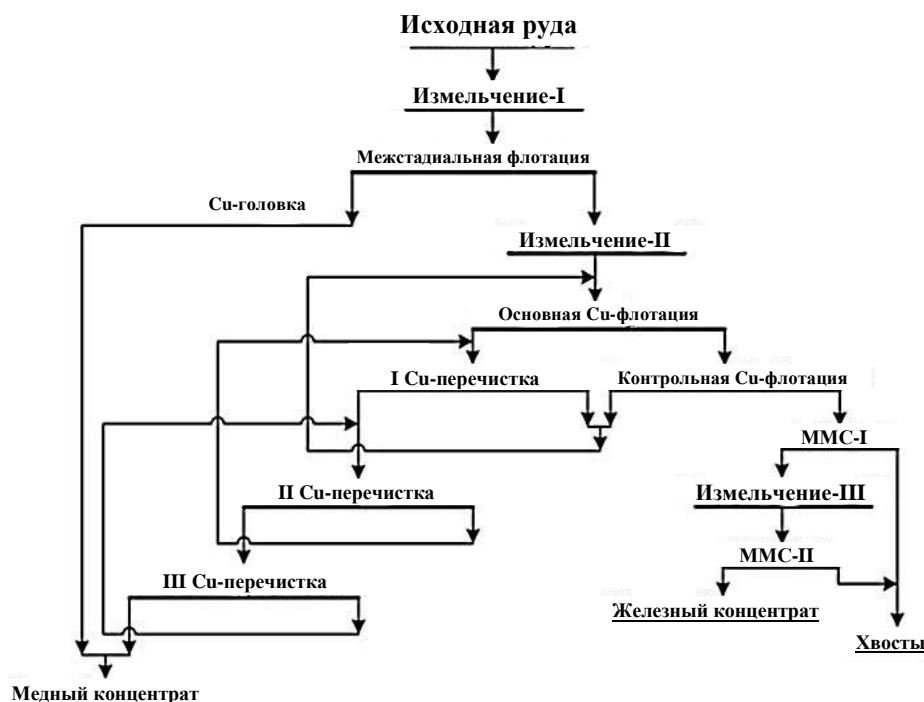


Рис. 1. Технологическая схема обогащения руды на АО «Святогор»
Fig. 1. Ore processing flow chart for JSC Svyatogor

Железный концентрат получают путем мокрой магнитной сепарации с предшествующими стадиями основной и контрольной медной флотации. Такой метод позволяет получать железный концентрат с содержанием самого железа до 59,09% [13]. Однако ванадий также попадает в магнитную фракцию, поскольку находится внутри титаномагнетитовой матрицы в виде катионов V^{3+} , главной формой нахождения которых является изоморфное замещение некоторых двух-, трех- и четырехвалентных катионов. Наибольшее сродство кристаллических свойств наблюдается у ванадия с рядом элементов семейства железа Fe, Cr, Ti, а также алюминия и магния [1].

Кроме того, в титаномагнетите обычно присутствуют тончайшие пластинчатые вrostки ильменита менее 0,01 мм [13], которые традиционным физико-механическим способам обогащения не поддаются [2].

Следовательно, ввиду изоморфизма ванадия с железом и крайне тонкого вкрапления ильменита в титаномагнетитовые зерна целью исследования являлось изучение возможности комплексной переработки железного концентрата титаномагнетитовой руды селективным разделением и концентрированием железа, ванадия и титана химическими методами.

В промышленности для извлечения ценных компонентов из титаномагнетитового сырья ис-

пользуют два основных способа: пирометаллургический (выплавка ванадиевого чугуна в доменных или электропечах с последующим получением из него ванадиевого шлака для гидрометаллургического извлечения ванадия) и гидрометаллургический (химическое извлечение ванадия из сырья). Но именно химическое извлечение является наиболее перспективным методом, поскольку оно отличается более высоким извлечением ванадия из руд и продуктов их обогащения по сравнению с пирометаллургическим. Этот способ основан на процессах выщелачивания [7, 16, 17].

Ванадийсодержащие материалы могут выщелачиваться по различным схемам, например, они могут обрабатываться кислотами (соляной, серной) различной концентрации, при этом используется одно-, двух-, трёх- и более стадийное выщелачивание. В качестве выщелачивающего реагента возможно применение и водных растворов соды с дальнейшей обработкой одноатомным спиртом и расслаиванием смеси на две фазы, а также растворов, состоящих из свободной и связанной серной кислоты. Изменяются время и температура процесса выщелачивания [7, 8, 13, 17].

Материалы и методы исследования

Объектом исследования служил железный концентрат, полученный на АО «Святогор» из титаномагнетитовой руды Волковского месторождения.

В работе использован комплекс методов исследований, включающий гранулометрический, рентгеноструктурный и рентгенофлуоресцентный анализы.

Гранулометрический состав железного концентрата определялся по ГОСТ 27562-87 «Руды железные, концентраты, агломераты и окатыши. Определение гранулометрического состава методом ситового анализа».

Химический состав исходного материала определен методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии на энергодисперсионном спектрометре «ARLQUANT'X».

Минеральный состав железного концентрата исследован рентгеноструктурным анализом на дифрактометре SHIMADZU XRD-6000 в $\text{CrK}\alpha$ -излучении со стандартным фильтром К β .

В первой серии экспериментов образцы концентрата массой 10 г подвергали кислотному выщелачиванию при соотношении Т:Ж=1:10 при температуре 60-65°C и атмосферном давлении 725 мм рт. ст. Процесс выщелачивания проводили в течение одного часа при постоянном перемешивании интенсивностью 90 об/мин. В качестве выщелачивающих реагентов использовали соляную и серную кислоты с варьированием концентрации от 10 до 30%.

Во второй серии экспериментов выщелачивание проводили по аналогичной методике, но при температуре 92-98°C.

Осадок, полученный после фильтрования растворов выщелачивания, анализировали методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии на энергодисперсионном спектрометре «ARLQUANT'X».

Полученные результаты и их обсуждение

Химический состав железного концентрата представлен в **табл. 1**.

Таблица 1. Химический состав железного концентрата
Table 1. Chemical composition of the iron concentrate

Содержание компонентов, %											
Fe общ.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	V ₂ O ₅	SO ₃	Cl	MnO	CaO	TiO ₂	ZnO	CuO
59,1	4,0	2,70	2,83	1,42	0,30	0,06	0,35	1,29	10,10	0,13	0,059

Таблица 2. Результаты извлечения железа и ванадия при температуре 60-65°C
Table 2. Iron and vanadium extraction at 60-65°C

Выщелачивающий реагент	HCl			H ₂ SO ₄		
Концентрация, %	10	20	30	10	20	30
Степень извлечения железа, %	3,55	23,86	84,01	1,86	6,09	31,98
Степень извлечения ванадия, %	4,93	18,31	61,27	0	4,93	63,38

По результатам рентгенофазового анализа в состав концентрата железной титаномагнетитовой руды входят магнетит Fe₃O₄ (84%), ильменит FeTiO₃ (10%), а также смешанный оксид магния и ванадия (MgO·V₂O₃) и различные силикаты.

Гранулометрическим анализом установлено, что в железном концентрате преобладает материал крупностью менее 0,14 мм (более 80%), в том числе: фракция (-0,14+0,075) мм составляет 54%, фракция (-0,075+0,045) мм – 23% и менее 0,045 мм – 6%. Исходя из результатов анализа, в дальнейшем для проведения экспериментов был взят материал с крупностью зерен менее 0,14 мм. Именно в этой крупности происходит полное раскрытие рудных минералов [4].

Результаты экспериментов по извлечению железа и ванадия из железного концентрата титаномагнетитовой руды Волковского месторождения при кислотном выщелачивании (60-65°C) представлены в **табл. 2**.

Анализ полученных данных первой серии экспериментов показал, что при кислотном выщелачивании ванадий экстрагируется вместе с железом, поскольку ванадий в виде твердого раствора связан с титаномагнетитовой матрицей. С увеличением концентрации кислот от 10 до 30% степень извлечения ванадия возрастает в 12 раз. При 30%-й концентрации кислот степень извлечения ванадия примерно одинакова на уровне 61-63%. Для экстрагирования железа во всем диапазоне исследуемых концентраций эффективна только соляная кислота – степень извлечения железа достигает 84%.

После обработки железного концентрата кислотами титан не извлекается в раствор и концентрируется в кеке.

Результаты второй серии экспериментов представлены в **табл. 3**.

Таблица 3. Результаты извлечения железа и ванадия при температуре 92-98°C
Table 3. Iron and vanadium extraction at 92-98°C

Выщелачивающий реагент	HCl			H ₂ SO ₄		
Концентрация, %	10	20	30	10	20	30
Степень извлечения железа, %	56,01	77,30	87,92	46,19	63,45	4,91
Степень извлечения ванадия, %	42,25	43,66	68,31	55,63	62,68	19,01

При повышении температуры выщелачивания до 92-98°C степень извлечения ванадия и железа значительно возрастает при обработке как соляной, так и серной кислотой, то есть нагрев способствует растворению железа и ванадия, улучшая кинетику выщелачивания. При использовании 30%-й серной кислоты степень извлечения ванадия и железа снижается, возможно, в результате частичной пассивации.

Экспериментальным путем было установлено, что дальнейшее повышение $C_{HCl} > 30\%$ при температуре ведения процесса 92-98°C не приводит к увеличению степени извлечения железа и ванадия, а лишь «способствует» активному разрушению технологического оборудования.

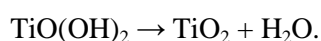
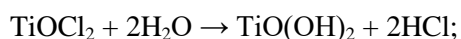
Концентрирование титана при обработке серной кислотой не происходит, так как оксид титана начинает растворяться в горячей серной кислоте [11, 15].

При кислотном выщелачивании железного концентрата возможны следующие химические реакции:

1) Реакция взаимодействия ильменита с соляной кислотой:

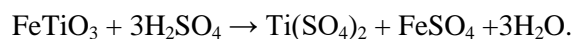


Далее хлорид титанила гидролизует, в результате чего титан выделяется в твердую фазу:

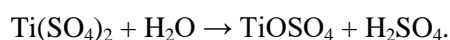


Таким образом, в результате выщелачивания соляной кислотой титан концентрируется в осадке (кеке).

2) Реакция взаимодействия ильменита с серной кислотой первоначально протекает с образованием нормального сульфата:



Нормальный сульфат титана подвергается гидролизу с образованием сульфата титанила:



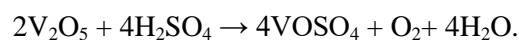
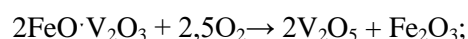
Титанил гидролизует до геля гидратированного диоксида титана состава $TiO_2 \cdot nH_2O$ и

$TiO_2 \cdot 2H_2O$ [6]. Образование гелеобразной массы, затрудняющей процесс отделения фильтрата от кека, наблюдался при фильтровании раствора, полученного растворением концентрата в 30%-й серной кислоте.

3) Реакции взаимодействия магнетита с кислотами, в результате которых железо переходит в раствор, выражаются следующими уравнениями:



4) В железном концентрате ванадий присутствует в виде V^{3+} . Он не образует индивидуальных фаз, а входит в состав твердых растворов – шпинелидов. Реакции выщелачивания ванадия можно выразить следующими уравнениями:



Сульфат ванадила $VOSO_4$ хорошо растворим в воде и образует кристаллогидраты типа $VOSO_4 \cdot nH_2O$, где $n = 2, 3, 5, 7$ и 13 [3].

Заключение

Опираясь на результаты химических, минералогических, гранулометрических и инструментальных методов исследований железного концентрата, полученного при обогащении титаномagnetитовой руды, в работе предлагается для селективного разделения и концентрирования входящих в его состав Fe, Ti и V использовать химические методы обогащения, а именно хлороводородное вскрытие:

– процесс рекомендуется проводить с использованием 30%-й соляной кислоты при температуре 92-98°C. Ванадия при этом извлекается до 68,31%, а титан индифферентен к таким растворам и полностью концентрируется в кеке;

– выбор граничного уровня концентрации хлороводородной кислоты в 30% обусловлен лучшими показателями по извлечению Fe, V и возможностью меньшего износа технологического оборудования;

– в работе доказано, что для селективного разделения титана и ванадия предпочтительно использовать именно соляную кислоту, а не серную, ввиду растворения диоксида титана в горячей серной кислоте, приводящего к потере титана.

Список источников

1. Алекторов Р.В., Дмитриев А.Н., Витькина Г.Ю. Исследование и совершенствование технологии переработки титаномагнетитового концентрата Гусевгорского месторождения текущего производства // Физико-химические основы металлургических процессов: Международная научная конференция имени академика А.М. Самарина, Москва, 25-28 ноября 2019 года. М.: Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН), 2019. С. 65.
2. Бузмаков В.Н., Володина Ю.В. Оценка влияния минерального состава рудных тел титаномагнетитов Гусевгорского месторождения на концентрацию ванадия в продуктах их переработки // Известия Уральского государственного горного университета. 2020. № 3(59). С. 62-68. DOI: 10.21440/2307-2091-2020-3-62-68.
3. Вытоптова А.И., Тихомирова А.В. Извлечение соединений ванадия из отработанного ванадиевого катализатора // Химия и химическая технология: достижения и перспективы: сборник материалов V Всероссийской конференции, Кемерово, 26-27 ноября 2020 года. Кемерово: Кузбасский гос. техн. ун-т им. Т.Ф. Горбачева, 2020. С. 81-85.
4. Газалеева Г.И. Развитие технологии обогащения титаномагнетитов // Современные тенденции в области теории и практики добычи и переработки минерального и техногенного сырья: материалы международной научно-практической конференции, приуроченной к 90-летию со дня основания института «Уралмеханобр». Екатеринбург, 2019. С. 14-18.
5. Комплексное обогащение медно-апатит-железо-ванадийсодержащих руд Волковского месторождения / Б.М. Корюкин, В.А. Бочаров, Л.О. Макаранец, И.Ф. Гарифулин // Горный информационно-аналитический бюллетень. 1999. № 3. С. 115-117.
6. Малдыбаев Г.К., Найманбаев М.А., Лохова Н.Г. Влияние типа кислоты на структуру диоксида титана // Промышленность Казахстана. №2 (103). 2018. С. 28-31.
7. Махоткина Е.С., Шубина М.В. Извлечение ванадия кислотным выщелачиванием концентратов титаномагнетитовых руд Урала // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2019. №1. С. 17-20.
8. Махоткина Е.С., Шубина М.В., Сучкова А.Я. Исследование режимов гидрометаллургического извлечения ванадия из «хвостов» титаномагнетитовой руды // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докладов 76-й международной научно-технической конференции, Магнитогорск, 16-20 апреля 2018 года. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2018. С. 19-20.
9. Махоткина Е.С., Шубина М.В. Экологические и ресурсосберегающие аспекты использования техногенного ванадийсодержащего сырья // Бюллетень «Черная металлургия». №3. 2018. С. 81-85.
10. Медяник Н.Л., Смирнова А.В., Горбулина Д.П. Необходимость исследования вещественного состава титаномагнетитовых руд Волковского месторождения при выборе способа технологической переработки // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2021. Т. 12. № 1. С. 108-110.
11. Орлов В.В., Медведев Р.О., Амеличкин И.В. Выделение титана из титаномагнетитовой руды // Перспективы развития фундаментальных наук: сборник научных трудов XV Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 24-27 апреля 2018 года. В 7-ми томах / под ред. И.А. Курзиной, Г.А. Вороновой. Томск: Национальный исследовательский Томский государственный университет, 2018. С. 234-236.
12. Смирнова А.В., Медяник Н.Л., Горбулина Д.П. Изучение возможности комплексной переработки железного концентрата титаномагнетитовых и меднотитаномагнетитовых руд // Современные достижения университетских научных школ: сборник докладов национальной научной школы-конференции, Магнитогорск, 25-26 ноября 2021 года. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2021. С. 156-161.
13. Смирнова А.В., Медяник Н.Л., Горбулина Д.П. Особенности переработки титаномагнетитовых и медно-титаномагнетитовых руд Волковского месторождения Среднего Урала // Проблемы комплексной и экологически безопасной переработки природного и техногенного минерального сырья (Плаксинские чтения – 2021), Владикавказ, 04-08 ноября 2021 года. Владикавказ: Северо-Кавказский горно-металлургический институт (Государственный технологический университет), 2021. С. 71-73.
14. Чижевский В.Б., Шавакулева О.П., Гмызина Н.В. Обогащение титаномагнетитовых руд Южного Урала // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2012. № 2(38). С. 5-7.
15. Шарипов Х.Б., Джуракулов И.Х., Кабутов К. Исследование термического разложения метатитановой кислоты при получении рутильного диоксида титана // Вестник Филиала Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова в городе Душанбе. 2019. № 1, 3(9, 11). С. 55-60.
16. Li R., Liu T., Zhang Y., Huang J., Xu C. Efficient Extraction of Vanadium from Vanadium-Titanium Magnetite Concentrate by Potassium Salt Roasting Additives // Minerals. 2018. 8 (25). Pp. 2-14.

17. Sachkov V.I., Nefedov R.A., Orlov V.V., Medvedev R.O., Sachkova A.S. Hydrometallurgical Processing Technology of Titanomagnetite Ores // Minerals. 2018. 8 (1). P. 2.

References

1. Alektorov R.V., Dmitriev A.N., Vitkina G.Yu. Studying and improving the technology for processing the currently produced titanomagnetite concentrate of the Gusevogorsk deposit. *Fiziko-khimicheskie osnovy metallurgicheskikh processov: Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya imeni akademika A.M. Samarina* [Physics and Chemistry of Metallurgical Processes: Samarin International Scientific Conference]. Moscow: Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of the Russian Academy of Sciences, 2019, 65 p. (In Russ.)
2. Buzmakov V.N., Volodina Yu.V. Assessing the effect of a mineral composition of ore bodies of titanomagnetites from the Gusevogorsk deposit on the concentration of vanadium in products of their processing. *Izvestiya Uralskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta* [News of Ural State Mining University], 2020, no. 3 (59), pp. 62-68. (In Russ.) DOI: 10.21440/2307-2091-2020-3-62-68
3. Vytoptova A.I., Tikhomirova A.V. Extraction of vanadium compounds from a processed vanadium catalyst. *Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya: dostizheniya i perspektivy. Sbornik materialov v vse-rossiyskoy konferentsii* [Chemistry and Chemical Technology: Achievement and Prospects. Proceedings of the 5th All-Russian Conference]. Kemerovo: Gorbachev Kuzbass State Technical University, 2020, pp. 81-85. (In Russ.)
4. Gazaleeva G.I. Development of the titanomagnetite beneficiation technology. *Sovremennye tendentsii v oblasti teorii i praktiki dobychi i pererabotki mineralnogo i tekhnogennogo syrya: Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, priurochennoy k 90-letiyu so dnya osnovaniya instituta «Uralmekhanobr»* [Current Trends in Theory and Practice of Mining and Processing of Mineral and Technology-Related Raw Materials: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference Dedicated to the 90th Anniversary of the Founding of the Uralmekhanobr Institute]. 2019, pp. 14-18. (In Russ.)
5. Koryukin B.M., Bocharov V.A., Makaranets L.O., Garifulin I.F. Comprehensive beneficiation of copper-apatite-iron-vanadium-containing ores from the Volkovsky deposit. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Information and Analytical Bulletin], 1999, no. 3, pp. 115-117. (In Russ.)
6. Maldybaev G.K., Naimanbaev M.A., Lokhova N.G. Influence of the type of acid on the structure of titanium dioxide. *Promyshlennost Kazakhstana* [Industry of Kazakhstan], 2018, no. 2 (103), pp. 28-31. (In Russ.)
7. Makhotkina E.S., Shubina M.V. Extraction of vanadium by acid leaching of concentrates of titanomagnetite ores of the Urals. *Aktualnye problemy sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya* [Current Problems of Modern Science, Technology and Education], 2019, no. 1, pp. 17-20. (In Russ.)
8. Makhotkina E.S., Shubina M.V., Suchkova A.Ya. Study on schedules of the hydrometallurgical extraction of vanadium from tailings of titanomagnetite ore. *Aktualnye problemy sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya: tezisy dokladov 76-y mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Current Problems of Modern Science, Technology and Education: abstracts of the 76th International Scientific and Technical Conference]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2018, pp. 19-20. (In Russ.)
9. Makhotkina E.S., Shubina M.V. Ecological and resource-saving aspects of using technology-related vanadium-containing raw materials. *Chernaya metallurgiya* [Ferrous Metallurgy], 2018, no. 3, pp. 81-85. (In Russ.)
10. Medyanik N.L., Smirnova A.V., Gorbulina D.P. Need for analyzing a material composition of titanomagnetite ores from the Volkovsky deposit, when choosing a processing method. *Aktualnye problemy sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya* [Current Problems of Modern Science, Technology and Education], 2021, vol. 12, no. 1, pp. 108-110. (In Russ.)
11. Orlov V.V., Medvedev R.O., Amelichkin I.V. Extraction of titanium from titanomagnetite ore. *Perspektivy razvitiya fundamentalnykh nauk: Sbornik nauchnykh trudov XV Mezhdunarodnoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Prospects for the Development of Basic Sciences: Proceedings of the 15th International Conference of Students, Postgraduate Students and Young Scientists]. Tomsk: Tomsk State University, 2018, pp. 234-236. (In Russ.)
12. Smirnova A.V., Medyanik N.L., Gorbulina D.P. Study on potential comprehensive processing of the iron concentrate of titanomagnetite and copper-titanomagnetite ores. *Sovremennye dostizheniya universitetskikh nauchnykh shkol: sbornik dokladov natsionalnoy nauchnoy shkoly-konferentsii* [Modern achievement of university scientific schools: Collection of reports of the national scientific workshop-conference]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2021, pp. 156-161. (In Russ.)
13. Smirnova A.V., Medyanik N.L., Gorbulina D.P. Features of processing titanomagnetite and copper-titanomagnetite ores from the Volkovsky deposit of the Middle Urals. *Problemy kompleksnoy i ekologicheskoy bezopasnoy pererabotki prirodnogo i tekhnogennogo mineralnogo syrya (Plaksinskie chteniya – 2021)* [Problems of integrated and environmentally safe processing of natural and technology-related mineral raw materials (Plaksin Readings - 2021)]. Vladikavkaz: North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), 2021, pp. 71-73. (In Russ.)

14. Chizhevskiy V.B., Shavakuleva O.P., Gmyzina N.V. Beneficiation of titanomagnetite ores of the South Urals. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2012, no. 2(38), pp. 5-7. (In Russ.)
15. Sharipov Kh.B., Dzhurakulov I.Kh., Kabutov K. Study on a thermal decomposition of metatitanic acid, when producing rutile titanium dioxide. *Vestnik Filiala Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta imeni M.V. Lomonosova v gorode Dushanbe* [Bulletin of the Dushanbe Branch of Lomonosov Moscow State University], 2019, no. 1, 3 (9, 11), pp. 55-60. (In Russ.)
16. Li R., Liu T., Zhang Y., Huang J., Xu C. Efficient extraction of vanadium from vanadium–titanium magnetite concentrate by potassium salt roasting additives. *Minerals*, 8 (25), 2-14 (2018).
17. Sachkov V.I., Nefedov R.A., Orlov V.V., Medvedev R.O., Sachkova A.S. Hydrometallurgical processing technology of titanomagnetite ores. *Minerals*, 8 (1), 2 (2018).

Поступила 03.06.2022; принята к публикации 04.07.2022; опубликована 26.09.2022
Submitted 03/06/2022; revised 04/07/2022; published 26.09.22

Медяник Надежда Леонидовна – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой химии, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: medyanikmagnitka@mail.ru. ORCID 0000-0003-0973-8899

Смирнова Анастасия Владиславовна – старший преподаватель кафедры химии, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: a-kremneva@mail.ru. ORCID 0000-0003-3916-6051

Коляда Людмила Григорьевна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры химии, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: kl174@mail.ru. ORCID 0000-0002-9021-009X

Бессонова Юлия Александровна – кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры химии, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: bessonova74@mail.ru. ORCID 0000-0001-8027-3567

Nadezhda L. Medyanik – DrSc (Eng.), Professor, Head of the Chemistry Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: medyanikmagnitka@mail.ru. ORCID 0000-0003-0973-8899

Anastasiya V. Smirnova – Senior Lecturer of the Chemistry Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: a-kremneva@mail.ru. ORCID 0000-0003-3916-6051

Lyudmila G. Kolyada – PhD (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chemistry Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: kl174@mail.ru. ORCID 0000-0002-9021-009X

Yuliya A. Bessonova – PhD (Econ.), Associate Professor, Associate Professor of the Chemistry Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: bessonova74@mail.ru. ORCID 0000-0001-8027-3567

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 669.053.4
DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-3-13-25



ПРИМЕНЕНИЕ ДВУХСТАДИЙНОГО СЕРНОКИСЛОГО И ХЛОРИДНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ СУЛЬФИДНЫХ ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНЦЕНТРАТОВ

Гордеев Д.В., Петров Г.В., Никитина Т.Ю.

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Общемировая тенденция истощения и ухудшения качества сырьевой базы металлургических производств постепенно заставляет вовлекать в переработку все более сложные виды сырья. Такие материалы требуют разработки новых технологий вскрытия. Одним из наиболее перспективных направлений переработки полиметаллического сырья является автоклавная гидрометаллургия. Настоящая работа посвящена исследованию возможности применения двухстадийного выщелачивания (автоклавное + атмосферное) в сернокислых и хлоридных средах для переработки полиметаллических сульфидных концентратов, содержащих никель, медь, кобальт, а также благородные металлы. **Используемые методы.** В работе было исследовано 3 концентрата, полученные в результате обогащения руд Забайкальского региона, содержащих 9, 6 и 4% никеля соответственно. Для первичного разложения минералов цветных металлов использовался автоклав при следующих параметрах: температура 220°C и давление кислорода 0,7-1,0 МПа, после чего материал подвергался атмосферному выщелачиванию в хлоридной среде при температуре 95°C в течение 4 ч. **Новизна.** Заключается в принципиально новом подходе к переработке сульфидных полиметаллических материалов, содержащих никель, кобальт, медь, а также благородные металлы. В предлагаемом методе переработки первая стадия выщелачивания проходит в высоких автоклавных условиях (температура 220°C и общее давление до 40 бар) для вскрытия основных макрокомпонентов, а именно сульфидов меди, никеля и кобальта. Вторая стадия выщелачивания проходит в хлоридной среде в атмосферных условиях, ее цель заключается в переводе в жидкую фазу благородных металлов. **Результат.** Материал месторождения оказался упорным, для первичного разложения минералов цветных металлов в автоклаве из концентрата потребовались высокие параметры. Получаемые при этом твердые остатки, коллектирующие в себе благородные металлы, также проявили себя как трудновскрываемое сырьё. Проведённый комплекс исследований по хлоридному выщелачиванию кеков автоклавного окисления показал, что в ранее опробованных условиях можно добиться удовлетворительных результатов по извлечению в раствор Pd, Au и Ag. Оно колеблется в пределах 75-95%, тогда как максимальный переход в раствор платины ограничен значением 33%. Технологические приёмы, направленные на повышение извлечения Pt, сопровождаются весьма высоким переходом в раствор железа, что значительно осложняет последующее эффективное выделение всех благородных металлов из раствора. **Практическая значимость.** Результаты исследований, изложенных в статье, могут быть использованы для разработки полноценной технологии, позволяющей перерабатывать упорное полиметаллическое сульфидное сырьё, содержащее никель, медь, кобальт, а также благородные металлы по гидрометаллургической схеме без использования пирометаллургического обогащения.

Ключевые слова: сульфидный концентрат, автоклавное окисление, благородные металлы, медь, никель, кобальт, хлоридное выщелачивание

© Гордеев Д.В., Петров Г.В., Никитина Т.Ю., 2022

Для цитирования

Гордеев Д.В., Петров Г.В., Никитина Т.Ю. Применение двухстадийного сернокислого и хлоридного выщелачивания для переработки сульфидных полиметаллических концентратов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №3. С. 13-25. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-3-13-25>



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

THE USE OF TWO-STAGE SULPHURIC ACID AND CHLORIDE LEACHING FOR THE PROCESSING OF SULPHIDE POLYMETALLIC CONCENTRATES

Gordeev D.V., Petrov G.V., Nikitina T.Yu.

Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). Due to the global trend of depleting raw materials and ore grade deterioration, metallurgical companies are forced to utilize more and more complex ores. Such ores require new stripping methods to be developed. One of the most promising areas in polymetallic ore processing includes autoclave technology. This paper looks at the possibility of using two-stage (autoclave + atmospheric) leaching in sulphuric acid and chloride media for the processing of polymetallic sulphide concentrates containing nickel, copper, cobalt, and precious metals.

Methods Applied. The paper examines 3 concentrates obtained as a result of processing ores from the Transbaikalian region, containing 9, 6 and 4% of nickel, respectively. The following pressure leaching parameters were used for the initial decomposition of minerals: temperature – 220°C, oxygen pressure – 0,7-1,0 MPa. After that, the material was subjected to atmospheric leaching in a chloride environment at a temperature of 95°C for 4 hours. **Originality.** This paper offers a completely new approach to the processing of sulphide polymetallic materials containing nickel, cobalt, copper, and precious metals. The proposed technique involves the use of high autoclave conditions (i.e. the temperature of 220°C and the total pressure of up to 40 bar) at the first leaching stage to dissolve the main macrocomponents, namely copper, nickel and cobalt sulphides. The second stage of leaching takes place in a chloride environment under atmospheric conditions, with the aim to transfer precious metals into liquid phase. **Result.** The primary material turned out to be refractory ore. That's why high parameters were required for the initial decomposition of minerals in an autoclave. The resulting solid residues, which collected the precious metals, also proved to be of refractory nature. A series of studies on chloride leaching of pressure oxidation cakes showed that satisfactory results can be achieved for the extraction of Pd, Au and Ag into liquor under the previously tested conditions. It varies between 75 and 95%, while the maximum extraction of platinum is limited to 33%. The process tricks that aim to raise the recovery of Pt cause a large amount of iron to transfer into liquor, which greatly affects the subsequent recovery of all PMs. **Practical Relevance.** The findings described in this paper can be used to develop a full-fledged hydrometallurgical process that would be relevant for refractory polymetallic sulphide ores containing nickel, copper, cobalt and precious metals and that would save pyrometallurgical processing.

Keywords: Sulphide concentrate, pressure oxidation, noble metals, copper, nickel, cobalt, chloride leaching

For citation

Gordeev D.V., Petrov G.V., Nikitina T.Yu. The Use of Two-Stage Sulphuric Acid and Chloride Leaching for the Processing of Sulphide Polymetallic Concentrates. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 3, pp. 13-25. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-3-13-25>

Введение

Общемировая тенденция истощения и ухудшения качества сырьевой базы металлургических производств постепенно заставляет вовлекать в переработку все более сложные виды сырья [1-8]. В металлургии цветных металлов это, например, низкосортные и некондиционные концентраты обогащения медных руд, характеризующиеся, наряду с низким содержанием меди (менее 20%), повышенным содержанием железа, цинка и свинца [6-12]. Сложный минералогический состав таких материалов неизбежно приводит к необходимости применения комплексных технологий, позволяющих выделить

основные ценные компоненты сырья и обеспечивать рентабельность переработки [1-8].

Существующие технологии переработки сульфидных медно-никелевых руд отличаются большим разнообразием схем [1-3]. Как правило, на первом этапе переработки таких руд производится флотационное отделение сульфидов от породы. Полученные сульфидные концентраты далее подвергаются пирометаллургической переработке (плавке и конвертированию) с получением промежуточных продуктов – фэйштейнов (штейнов) [5-8]. Эти продукты, представленные сульфидами цветных металлов и частично железа, коллектируют в своём составе все ценные компоненты исходного сырья, в том числе благо-

родные металлы. Дальнейшая переработка файнштейна заключается в гидрометаллургическом рафинировании (выделении) ценных компонентов. Описанный способ применяется на большинстве действующих предприятий [1-8].

В России на предприятиях компании «Норильский никель», применяющих селективную флотацию руды, технология переработки медно-никелевого файнштейна включает медленное охлаждение файнштейна, флотационное разделение на медный и никелевый концентраты с последующим рафинированием их до товарных металлов [1-3]. Товарными продуктами технологии являются катодные никель, медь и огневой металлический кобальт, а также концентраты благородных металлов, которые получают в металлургическом цехе в результате переработки электролитных шламов [1-3].

Для зарубежных предприятий характерна гидрометаллургическая переработка файнштейнов, реализуемая в различных вариантах технологии. Все они основаны на процессах выщелачивания сульфидов в сернокислых, солянокислых или аммиачных средах [12-16]. В отдельную группу можно выделить процесс с электролитическим рафинированием сульфидных анодов, реализованный на заводах Vale в Томпсоне, Канада, и Jinchuan Group в Цзиньчане, Китай [15, 16]. Наибольшего внимания заслуживают первые три способа переработки файнштейнов (выщелачивание в различных средах), именно они получили наибольшее распространение в мировой гидрометаллургии цветных металлов [17-26].

Основные задачи, решаемые при гидрометаллургической переработке файнштейнов, – это разделение никеля и меди и вывод серы в виде товарного или экологически безопасного продукта [1-8]. Выделение меди из растворов во всех трёх промышленных методах выщелачивания – сернокислотном, хлоридном и аммиачном – осуществляется, как правило, в форме сульфида, поскольку растворимость сульфидов меди значительно ниже, чем никеля и кобальта [26-30]. В отдельных случаях медь выделяется электроэкстракцией.

При хлоридном выщелачивании сульфидная сера окисляется до элементной. При сернокислотном выщелачивании элементная сера образуется в ограниченном количестве в зависимости от параметров процесса и состава сырья [1-8].

Альтернативой способам, основанным на получении файнштейна, является прямая гидрометаллургическая переработка концентратов, реализуемая в сернокислых, солянокислых или ам-

миачных средах. Прямое автоклавное выщелачивание в аммиачных средах по технологии Sherritt применялось на заводах Fort Saskatchewan (Канада) и Kwinana (Австралия) до их перехода на работу с пирометаллургическим сырьём. Выщелачивание в серно- и солянокислых средах или их комбинации является основой для таких технологий, как Activox, CESL, Voisey's Bay, HydroNic. Одной из разновидностей прямой гидрометаллургической переработки сульфидного сырья является кучное выщелачивание руды, применяемое на заводе Talvivaara (Финляндия) [11, 20-25].

Анализ литературных данных по способам переработки сульфидных медно-никелевых концентратов показывает, что, несмотря на многообразие технологических схем различных предприятий, подавляющее большинство из них сводится к плавке и конвертированию концентрата с получением файнштейна и его дальнейшей гидрометаллургической переработке [30-36]. Одновременно с этим возможна прямая гидрометаллургическая переработка концентрата флотации без промежуточного пирометаллургического обогащения. При этом принципы гидрометаллургического извлечения ценных компонентов в обоих случаях идентичны. Наиболее подходящими способами переработки такого сырья следует признать технологии на основе сульфатного или сульфатно-хлоридного выщелачивания.

В рамках данной работы были проведены исследования по двухстадийному выщелачиванию сульфидного концентрата, содержащего медь, никель, кобальт, а также благородные металлы. Первая стадия выщелачивания проводилась в автоклавных условиях для вскрытия основной части сульфидов и извлечения основных макрокомпонентов, на второй стадии проводилось хлоридное выщелачивание в атмосферных условиях для перевода благородных металлов в жидкую фазу. Основные результаты проведенного исследования представлены в данной статье.

Исходные материалы

Химический состав исходных концентратов представлен в **табл. 1**.

Данные по исследованию минералогического состава проб:

- Никель (и кобальт) на 97-99% присутствуют в пентландите. Доли процента никеля имеются в пирротине, макинавите $(\text{Fe}, \text{Ni})_9\text{S}_8$ и в нерудных компонентах.
- Медь на 70-76% находится в халькопирите; 7-16% – в валлериите $x(\text{Fe}, \text{Cu}, \text{Ni})\text{S} \cdot y\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot z\text{Al}(\text{OH})_3$;

3-14% – кубаните CuFe_2S_3 ; 3-9% в ковеллине CuS , халькозине Cu_2S и борните Cu_3FeS_4 .

- Магний от 38 до 52% присутствует в виде серпентина; от 17 до 35% – в виде талька $\text{Mg}_3[(\text{OH})_2\cdot\text{Si}_4\text{O}_{10}]$; остальное в виде хлорита, форстерита, пироксена и валлериита.

- Количество собственно карбонатов невелико: 0,2-0,9%. Однако значительна часть минералов, содержащих кислотопоглощающие группы (ОН): серпентин, тальк, хлорит.

- Железо: основа пирротин и магнетит. Кроме того: пентландит, халькопирит, пирит, тальк, валлериит.

- Нерудные: хлорит, тальк, серпентин.

Определение массовых долей компонентов в исходных материалах, а также технологических продуктах проводили с использованием следующих методов: гравиметрический; пробирный и атомно-абсорбционный; атомно-эмиссионный; потенциометрического титрования – титриметрический (определение массовых концентраций серной кислоты и железа(II)); инфракрасной спектроскопии (определение массовых долей углерода общего и органического).

Измерения проведены на следующем оборудовании лаборатории аналитического контроля: атомно-эмиссионный спектрометр iCAP 6300; атомно-абсорбционный спектрометр iCE 3500; масс-спектрометр с индукционно-связанной плазмой Agilent 7700 X; анализатор серы и углерода LECO SC-144DR.

Таблица 1. Химический состав исходных концентратов
Table 1. Chemical composition of initial concentrates

Компонент	Ед. изм.	Концентрат 1	Концентрат 2	Концентрат 3
Ni	%	9,78	6,00	4,00
Co	%	0,31	0,19	0,13
Cu	%	3,15	1,95	1,31
Fe	%	29,82	21,55	17,17
S	%	20,05	12,71	8,82
S(SO ₄)	%	0,06	0,07	0,07
Al	%	0,52	0,89	1,09
Si	%	6,68	10,74	12,89
Ca	%	0,61	0,93	1,09
Mg	%	6,75	10,80	12,94
S(2-)	%	19,99	12,64	8,75
Ag	г/т	36,50	21,78	13,99
Au	г/т	2,40	1,48	1,00
Pt	г/т	5,95	3,63	2,40
Pd	г/т	6,19	3,81	2,54

Методика проведения экспериментов

Измельчение. Измельчение исходного материала проводили в виде пульпы с дистиллированной водой (отношение жидкой и твердой фаз Ж:Т составляло 1 л/кг) в планетарной мельнице Pulverisette 6 (Fritsch). Режим измельчения соответствовал умеренному (обозначение – РЗ: диаметр шаров – 20 мм; загрузка шаров – 30 шт.; время измельчения – 5 мин, класс крупности –45 мкм – 85-90%).

Репульпация (кислотная обработка). Репульпацию материала проводили с использованием дистиллированной воды в термостойком стакане с непрерывным перемешиванием пульпы. Отношение Ж:Т составляло 2 л/кг; температура – 60°C. После достижения рабочей температуры в пульпу подавали концентрированную серную кислоту. Расход концентрированной H_2SO_4 рассчитывали предварительно, исходя из стехиометрии полного разложения магниевых минералов. Продолжительность операции составляла 1 ч. По окончании репульпации пульпу переносили в автоклав.

Автоклавное окисление. Автоклавное окисление проводили в титановом автоклаве Büchi ёмкостью 1,1 л. Автоклав снабжен электрическим нагревателем, внутренним водоохлаждаемым змеевиком и контроллером, позволяющим задавать и автоматически поддерживать температуру процесса (с точностью $\pm 0,5^\circ\text{C}$) и скорость вращения перемешивающего устройства. Интенсивность перемешивания была выбрана таким образом, чтобы обеспечивать растворение 0,5 моль кислорода в литре раствора сульфата натрия за час при давлении кислорода 0,1 МПа и комнатной температуре. Кислород в автоклав подавали из баллона через заглублённую трубку, используя систему автоматического поддержания давления и непрерывного измерения расхода подаваемого газа Bronkhorst.

Материал подавали в автоклав в виде пульпы, которую готовили с использованием дистиллированной воды. Объём пульпы рассчитывали, исходя из коэффициента заполнения автоклава 0,6. Окисление проводилось при температуре 220°C и избыточном давлении кислорода 0,7-1,0 МПа. По завершении процесса выщелачивания автоклавную пульпу охлаждали до температуры 80-90°C и сбрасывали избыточное давление. Далее полученную пульпу направляли на непосредственно разделение твёрдой и жидкой фаз либо на кон-

диционирование. Пульпу фильтровали на вакуум-фильтре, кек промывали на фильтре дистиллированной водой. В растворе, охлажденном до комнатной температуры, определяли величину pH и ОВП.*

Пробы раствора и промывной воды передавали на химический анализ для определения содержания Ni, Co, Cu, Fe, S, Fe(2+), H₂SO₄, Al, Si, Ca, Mg, Ag, Au, Pt, Pd. От кек отбирали пробу для определения влажности и анализа на Ni, Co, Cu, Fe, S, S(SO₄), S(0), Al, Si, Ca, Mg, Ag, Au, Pt, Pd.

Кондиционирование. С целью растворения образовавшихся на стадии автоклавного окисления основных сульфатов автоклавную пульпу подвергали кондиционированию. Процесс вели в термостойком стакане при постоянном перемешивании и температуре 95-99°C в течение 2 ч. Для компенсации испарения в пульпу кондиционирования добавляли дистиллированную воду в количестве, соответствующем разнице масс пульпы в начале и конце процесса. По окончании кондиционирования пульпу фильтровали на вакуум-фильтре, кек промывали на фильтре дистиллированной водой. В растворе, охлажденном до комнатной температуры, определяли величину pH и ОВП. Пробы раствора и промывной воды передавали на химический анализ для определения содержания Ni, Co, Cu, Fe, S, Fe(2+), H₂SO₄, Al, Si, Ca, Mg, Ag, Au, Pt, Pd. От кек отбирали пробу для определения влажности и анализа на Ni, Co, Cu, Fe, S, S(SO₄), S(элементарная), Al, Si, Ca, Mg, Ag, Au, Pt, Pd.

Хлоридное выщелачивание. Из-за ограниченного количества исходного сырья тесты по извлечению благородных металлов вели на объединенных остатках его автоклавного вскрытия.

Опыты по хлорному выщелачиванию проводили в стеклянном реакторе с механическим перемешиванием при температуре 90-95°C. Навеску тестируемого материала репульпировали (при Ж:Т 5 или 10 м³/т) в модельном оборотном растворе с содержанием хлорид ионов 2,3-6,0 моль/л. Хлоридный фон в таких растворах создавался преимущественно хлоридом кальция, в отдельных случаях хлоридом натрия или соляной кислотой. В качестве окислителя использовали гипохлорит натрия (раствор) с содержанием активного хлора 190 г/л или гипохлорит кальция (твердый) с содержанием ак-

тивного хлора 45%. Продолжительность выщелачивания составляла от 2 до 4 ч. В процессе опыта подачей в пульпу либо раствора NaClO, либо твердого Ca(ClO)₂ поддерживали ОВП в диапазоне 1000-1050 мВ (относительно насыщенного хлорсеребряного электрода). Для поддержания pH в диапазоне 1,0-1,5 при необходимости добавляли концентрированную HCl (36%). Уровень пульпы в эксперименте поддерживали постоянным, компенсируя испарение добавлением воды.

После завершения опыта пульпу фильтровали. Чистый фильтрат оставляли на хранение, а кек промывали избытком горячей дистиллированной воды (тремя порциями из расчета не менее 5 м³/т). Пробы раствора передавали на химический анализ для определения содержания Ni, Co, Cu, Fe, S, Fe(2+), Al, Si, Mg, Ag, Au, Pt, Pd, Cl. После промывки кек сушили при температуре 80°C в течение 10-12 ч. Сухой кек усредняли и отбирали пробу для анализа на Ni, Co, Cu, Fe, S, Al, Si, Mg, Ag, Au, Pt, Pd.

Результаты экспериментов и их обсуждение

Первая стадия: автоклавное сернокислотное выщелачивание. Цель первого этапа испытаний – отработать головные операции гидрометаллургической технологии для максимального разложения минералов, содержащих магний и цветные металлы (Ni, Cu, Co). Для этого была предложена схема с кислотной обработкой материала на первой атмосферной стадии и высокотемпературное автоклавное окислительное выщелачивание (АОВ) полученного материала на следующей стадии. Первоначальная схема эксперимента приведена на **рис. 1**.

Опыты проведены на 3-х концентратах, содержащих Ni 9,8, 6,0 и 4,0%. Крупность концентратов отвечала содержанию в них класса -45 мкм 77,2, 81,0 и 83,1% соответственно.

Всю пульпу после АОВ перемещали в стеклянный стакан, где проводили кондиционирование пульпы в надежде дополнительно извлечь в раствор магний и цветные металлы. Эту операцию проводили, перемешивая пульпу при 95°C в течение 2 ч.

Всего было проведено три опыта на 3-х разных концентратах при близких условиях. Качество полученных продуктов в каждом опыте приведено в **табл. 2** и **3**. Параметры и главные показатели операций представлены в **табл. 4**.

* Здесь и далее: окислительно-восстановительный потенциал (ОВП) измерен относительно хлорсеребряного электрода сравнения.

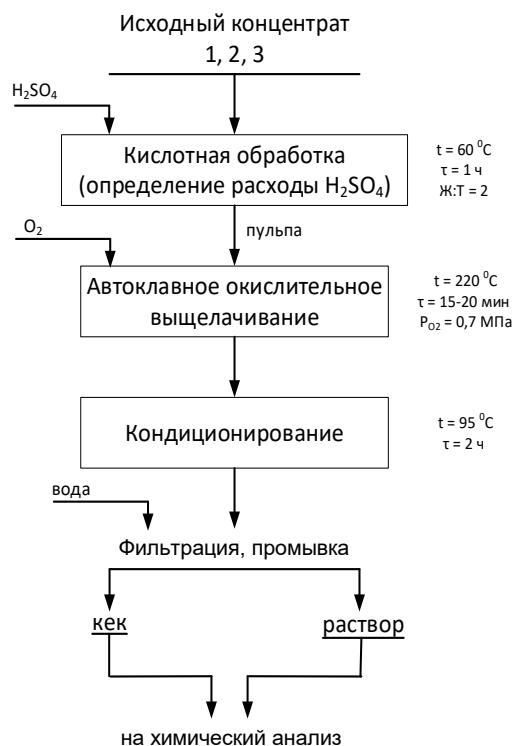


Рис. 1. Схема проведения экспериментов
Fig. 1. Scheme of experiments

Таблица 2. Состав кеков после автоклавного окислительного выщелачивания и кондиционирования
Table 2. Chemical composition of cakes after pressure oxidation (POX) leaching and conditioning

Номер концентрата	Ni, %	Cu, %	Fe, %	S, %	Mg, %	S ²⁻ , %	Au, г/т	Pt, г/т	Pd, г/т
1	0,85	0,12	38,23	2,22	4,00	1,11	3,10	5,60	6,50
2	0,49	0,16	24,95	1,65	7,10	0,65	2,10	3,40	4,40
3	0,34	0,14	17,40	1,52	8,42	0,39	1,10	2,60	3,30

Таблица 3. Состав растворов после выщелачивания и кондиционирования
Table 3. Chemical composition of solutions after pressure oxidation (POX) leaching and conditioning

Номер концентрата	Стадия	Ni	Co	Cu	Fe	Fe ²⁺	H ₂ SO ₄	Ag	Au	Pt	Pd
		г/л						мг/л			
1	После АОВ	14,4	0,45	4,3	0,64	0,28	39	0,11	<0,01	<0,01	<0,01
	После кондиционирования	14,8	0,51	4,9	3,36	1,28	31	0,09	<0,01	<0,01	<0,01
2	После АОВ	12,5	0,44	3,7	2,75	1,87	23	0,04	<0,01	<0,01	<0,01
	После кондиционирования	12,5	0,43	4,0	3,63	2,82	19	0,04	<0,01	<0,01	<0,01
3	После АОВ	10,4	0,37	3,2	6,08	3,30	23	0,11	<0,01	<0,01	<0,01
	После кондиционирования	10,2	0,35	3,3	7,27	3,97	17	0,09	<0,01	<0,01	<0,01

Установлено, что переход цветных металлов в раствор на автоклавном переделе колеблется в пределах 94-95% для Cu, 92-97% – для Ni, 94-96% для – Co и он мало зависит от качества исходного концентрата. Суммарное извлечение Mg в раствор за 3 стадии (декарбонизация – АОВ – кондиционирование) составляет 54-61%.

Каждый опыт по АОВ характеризовался своим удельным расходом кислорода, поскольку концентраты отличаются содержанием сульфидной серы. Если привести кривые поглощения O₂ в ходе АОВ к единице окисленной серы, то окажется, что во всех опытах этот показатель примерно одинаков. Это наглядно отражено на рис. 2.

Извлечение в раствор благородных металлов во всех опытах менее 1%. Таким образом, задачу разделения цветных и благородных металлов технологической схемы можно считать решённой: цветные металлы на 92-97% переходят в раствор, благородные металлы на 99% остаются в нерастворимом остатке АОВ.

Таблица 4. Параметры и показатели гидрометаллургической переработки
 Table 4. Main parameters of hydrometallurgical treatment

Параметр	Номер концентрата		
	1	2	3
Содержание Ni	9,8	6,0	4,0
Исходная крупность, %<45 мкм	77,2	81,0	83,1
Кислотная обработка	да	да	да
Расход H ₂ SO ₄ , кг/т	80	160	260
Конечный pH	1,95	2,04	1,29
АВТОКЛАВНОЕ ОКИСЛЕНИЕ			
Ж:Т в автоклаве, мл/г	6,2	4,4	3,4
T, °C	220	220	220
P(O ₂), бар	7	7	7
Q(O ₂), нм ³ /т	295,06	183,5	122,3
Q(O ₂), нм ³ /т окисленной серы	1533	1506	1443
Процент O ₂ от стехиометрии	96,9	95,1	91,4
Время окисления, мин	15,0	20,1	20,1
ОВП, мВ	469,5	440,1	448
КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ			
Время, мин	120	120	120
T, °C	95	95	95
ОВП, мВ	+471	+428	+448
pH	0,51	0,76	0,92
Выход кека, %	66,4	69,6	71,2
Извлечение Cu в раствор, %	94,3	94,4	93,9
Извлечение Ni в раствор, %	97,4	94,4	92,2
Извлечение Co в раствор, %	96,2	96,1	94,5
Извлечение Mg в раствор, %	60,7	54,3	53,7
Извлечение Ag в раствор, %	0,5	0,5	0,22
Извлечение в раствор остальных благородных металлов, %	Менее 1%		

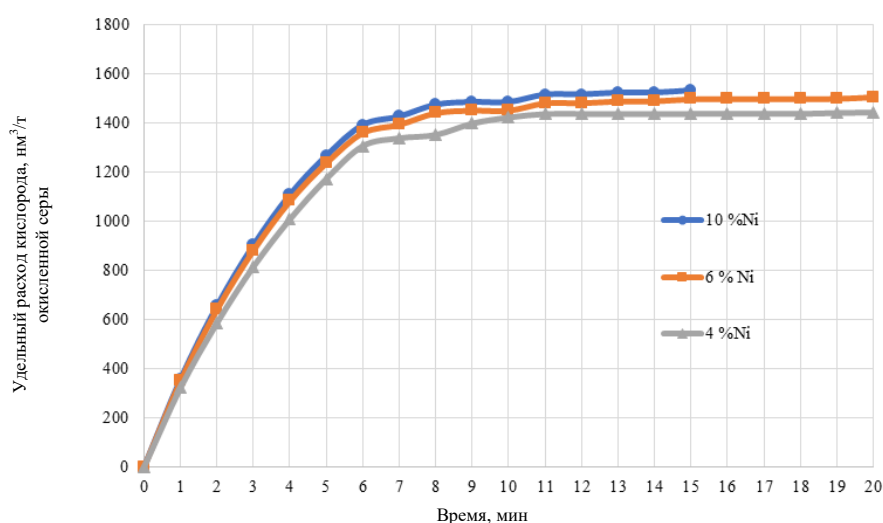


Рис. 2. Удельный расход кислорода при автоклавном окислении концентратов
 Fig. 2. Specific oxygen consumption during pressure oxidation of concentrates

Вторая стадия: хлоридное атмосферное выщелачивание. Изначально все опыты проводили при Ж:Т = 5 без дополнительного измельчения исходного кека.

В процессе проведения экспериментов изменяли следующие параметры:

- тип окислителя;
- использование соляной кислоты с исходной концентрацией 170 г/л;
- время процесса (2 и 4 ч);
- двухстадийное выщелачивание (2+2 ч с заменой фаз между стадиями);
- использование хлорида натрия вместо CaCl_2 .

Результаты (показатели) экспериментов приведены в **табл. 5**; составы получаемых продуктов – в **табл. 6**. На **рис. 3, 4** представлены графики зависимости извлечения металлов в раствор от выбранного способа хлоридного выщелачивания.

Как следует из **табл. 5** и **рис. 3, 4**, в отношении поведения благородных металлов можно констатировать, что в выделенной серии опытов удовлетворительный результат достигается только для палладия, его извлечение в раствор составляет 80-90%. В гораздо меньшей степени в раствор переходит платина – 18-30%. Золото и серебро в этом ряду занимают промежуточное положение. Цветные металлы ведут себя аналогично серебру, их извлечение в раствор колеблется от 52 до 90%, они значительно в меньшей степени переходят в раствор почти во всех опытах, что особенно характерно для никеля. Извлечение Ni в раствор, как правило, составляет 6-15% и многократно уступает по этому показателю меди.

В отношении палладия можно констатировать, что извлечение его в раствор находится на удовлетворительном уровне (87-97%). В отношении платины извлечение её в раствор не превышает 1/3.

Удовлетворительные результаты по всем ценным металлам получены только при выщелачивании кека автоклавного окисления с помощью соляной кислоты (опыт 3). Однако аналогия распространяется и на поведение железа – оно переходит в раствор более чем на 93%. Концентрация его в растворе при исходном Ж:Т = 5 достигает 46 г/л, что весьма затрудняет эффективное извлечение благородных и цветных металлов при последующей переработке растворов хлорного выщелачивания.

Увеличение продолжительности выщелачивания с 2 до 4 ч (опыт 2) в общем благоприятно сказывается на извлечении всех ценных металлов в раствор.

Замена гипохлорита натрия на кальциевый реагент в опыте 4 не дала положительного результата. Показатели извлечения как цветных, так и благородных металлов в этом опыте не превы-

сили уровня базового опыта. Замена хлорида кальция на NaCl (опыт 5) позволила несколько увеличить извлечение ценных металлов, но при этом, как и в случае с HCl, многократно увеличился переход в раствор железа: его концентрация в растворе выросла до 20,8 г/л.

Опыт с двухстадийным выщелачиванием и заменой фаз между стадиями (опыт 6) позволил несколько увеличить извлечение в раствор как цветных, так и благородных металлов. Однако данный показатель для платины не превысил значение 33%. В данном опыте содержание благородных металлов в растворе было проанализировано после каждой стадии. На второй стадии выщелачивания в раствор переходит ещё от 10 до 30% благородных металлов. В этом же опыте имеет место относительно высокий переход в раствор никеля и меди. В то же время отмечен повышенный переход в раствор железа, который составил 7,6%.

Таким образом, удовлетворительные (кроме платины) результаты могут быть достигнуты в условиях, близких к параметрам базового опыта: опыты 1 и 4. Все воздействия, положительно сказывающиеся на извлечении Pt в раствор, связаны с растворением железистых соединений, что, в свою очередь, делает данный технологический приём малорентабельным. Это наблюдение наталкивает на мысль о том, что при автоклавном высокотемпературном выщелачивании рудные минералы платины в значительной мере подвергаются химическому (возможно, поверхностному) воздействию, в результате которого ассоциируются со вторичными соединениями Fe(III).

Лучшие результаты, не связанные с избыточным переходом железа в раствор, достигаются при условиях:

- температура 95°C;
- продолжительность 4 ч;
- отношение Ж:Т = 5;
- концентрация в исходном растворе $\text{Cl}^- = 4,5 \text{ М/л}$;
- расход раствора NaClO (120 г/л свободного хлора) соответствует 40 мл на 0,5 л исходного раствора или 400 мл на 1 кг автоклавного кека;
- редокс-потенциал процесса 1000-1050 мВ по х.с.э.;
- pH = 1,3-1,6.

При таких параметрах рекомендуемый процесс может обеспечить извлечение в хлоридный раствор из автоклавного кека, %:

- палладия на 90-95;
- платины на 20-33;
- золота и серебра на 75-80;
- никеля на 15-25;
- меди на 55%;
- железа и магния на 0,4-1,0%.

Таблица 5. Условия и показатели опытов по хлорному выщелачиванию окисленного кека
 Table 5. Conditions and indicators of experiments on chlorine leaching of oxidized cake

Номер опыта	Условия					Показатели							
	Время, ч	Окислитель	[HCl] исх., г/л	Cl в исходном растворе	Выход твердого, %	Извлечение в раствор, %							
						Ni	Cu	Fe	Mg	Pd	Pt	Ag	Au
1	2	NaClO	–	CaCl ₂	97,9		55,5	0,44	0,92	94,6	20,1	75,5	77,0
2-1	2	NaClO	–	CaCl ₂		10,5	47,3	0,16	0,72	87,1	19,2	82,8	67,1
2-2	2				96,8	12,8	53,9	0,54	1,25	93,1	16,7	83,4	79,2
3	2	NaClO	170	CaCl ₂	55,2	84,1	93,2	93,6	19,2	96,7	65,8	91,7	82,1
4	2	Ca(ClO) ₂	–	CaCl ₂	82,1	28,8	58,2	0,1	1,0	87,6	33,9	87,4	76,2
5	2	NaClO	–	NaCl	76,6	47,2	80,8	41,3	7,1	97,2	25,4	87,4	79,7
6	2+2	NaClO	–	CaCl ₂	94,1	35,6	71,6	7,6	8,7	97,1	32,9	90,4	89,8

Таблица 6. Состав продуктов, полученных в опытах табл. 5
 Table 6. Composition of products from Table 5

Номер опыта	Продукт	Содержание элемента										
		Ni	Cu	Si	Fe	S	Al	Mg	Pd	Pt	Ag	Au
		%, г/л							г/г, мг/л			
1	твёрдое	0,39	0,10	н.д.	26,1	1,18	н.д.	8,00	0,29	3,10	6,4	0,47
	раствор	0,17	0,26	н.д.	0,22	0,16	н.д.	0,14	0,82	0,07	3,06	0,21
2-1	твёрдое	0,42	0,12	15,4	27,3	1,00	1,15	7,54	0,71	3,17	4,54	0,68
	раствор	0,17	0,22	0,09	0,08	0,19	0,03	0,11	0,67	0,12	3,06	0,17
2-2	твёрдое	0,41	0,10	15,4	26,7	1,19	1,13	7,60	0,38	3,27	4,38	0,43
	раствор	0,18	0,26	0,11	0,27	0,22	0,06	0,19	0,72	0,15	3,21	0,22
3	твёрдое	0,13	0,03	27,5	2,93	0,13	1,00	9,72	0,32	2,36	3,85	0,65
	раствор	0,77	0,42	0,06	46,60	2,41	0,95	2,92	0,59	0,11	2,92	0,18
4	твёрдое	0,39	0,11	15,9	27,0	1,03	1,06	7,89	0,80	3,06	3,93	0,58
	раствор	0,15	0,19	0,08	0,05	0,20	0,03	0,15	0,81	н.д.	3,70	0,27
5	твёрдое	0,31	0,06		18,8	0,59	1,19	8,71	0,19	3,70	4,22	0,53
	раствор	0,44	0,33	0,10	20,8	0,59	0,34	1,07	0,77	0,17	4,42	0,24
6	твёрдое	0,30	0,07		24,2	1,16	1,05	7,22	0,16	2,64	2,53	0,21
	раствор	0,21	0,28	0,07	2,85	0,17	0,19	0,69	0,89/0,08*	0,10/0,04	3,83/0,57	0,22/0,06

*Первая цифра соответствует содержанию элемента в растворе 1-й стадии, вторая – в конечном растворе.

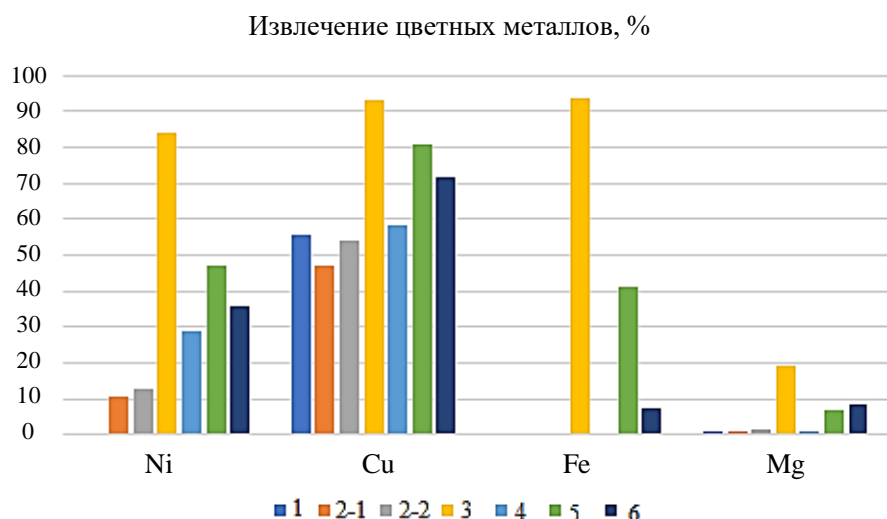


Рис. 3. Извлечения цветных металлов в раствор
 Fig 3. Extraction of non-ferrous metals into liquor

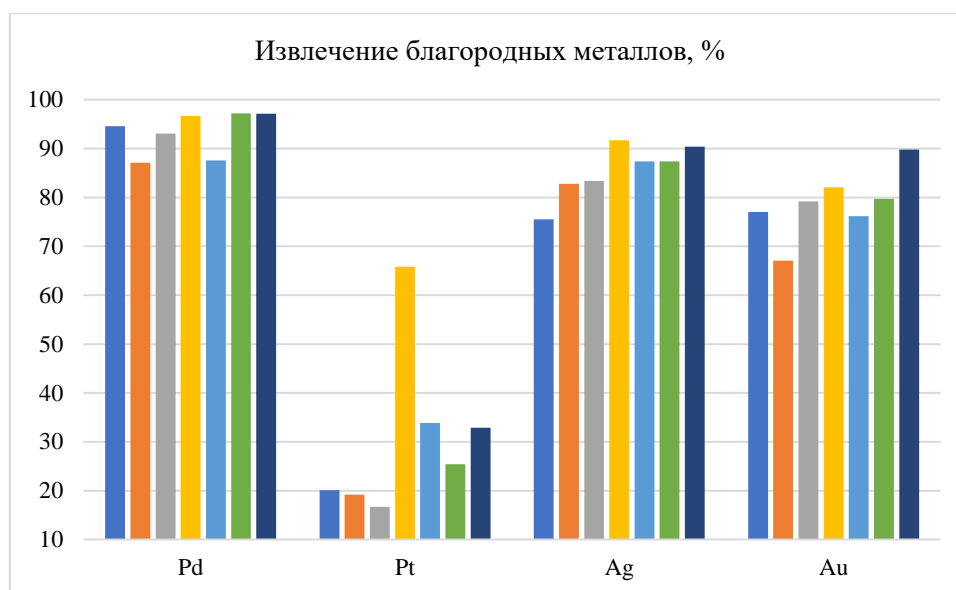


Рис. 4. Извлечение благородных металлов в раствор
Fig 4. Extraction of precious metals into liquor

Выводы

Материал месторождения оказался упорным, для первичного разложения минералов цветных металлов в автоклаве из концентрата потребовались высокие параметры, а именно температура 220°C и давление кислорода 0,7-1,0 МПа. Получаемые при этом твёрдые остатки, коллектирующие в себе благородные металлы, также проявили себя как трудновскрываемое сырьё.

Проведённый комплекс исследований по хлорному выщелачиванию кеков автоклавного окисления показал, что в ранее опробованных условиях можно добиться удовлетворительных результатов по извлечению в раствор Pd, Au и Ag. Оно колеблется в пределах 75-95%, тогда как максимальный переход в раствор платины ограничен значением 33%. Технологические приёмы, направленные на повышение извлечения Pt, сопровождаются весьма высоким переходом в раствор железа, что значительно осложняет последующее эффективное выделение всех благородных металлов из раствора.

При хлоридном выщелачивании кеков автоклавного окисления не следует рассчитывать на значимое дорастворение цветных металлов. Проблему наиболее полного извлечения никеля и меди в раствор необходимо решать на первой стадии гидрометаллургической технологии, то есть на АОВ.

Результаты проведенных исследований могут быть использованы для создания полноценной технологии гидрометаллургической переработки сульфидных полиметаллических концен-

тратов, которые в настоящий момент в РФ перерабатываются по пирометаллургической схеме.

Дальнейшее направление исследований должно быть связано, во-первых, с оптимизацией обеих стадий выщелачивания, а именно в увеличении извлечений ценных компонентов, а во-вторых, в изучении дальнейших стадий переработки полученных технологических растворов, то есть выделения ценных компонентов из растворов с высоким коэффициентом разделения, нейтрализации кислых растворов.

Список источников

1. Автоклавная гидрометаллургия цветных металлов: В 2 т. Ч. 2 / С.С. Набойченко, Я.М. Шнеерсон, М.И. Калашникова, Л.В. Чугаев. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2009.
2. Шнеерсон Я.М., Набойченко С.С. Тенденции развития автоклавной гидрометаллургии цветных металлов // Цветные металлы. 2011. №3. С. 15-20.
3. Набойченко С.С. Развитие отечественной автоклавной металлургии // Цветные металлы. 1992. №6. С. 27-30.
4. Сульфидное выщелачивание медного концентрата с высоким содержанием мышьяка / Бодуэн А.Я., Петров Г.В., Кобылянский А.А., Булаев А.Г. // Обогащение руд. 2022. № 1. С. 14-19.
5. Dreisinger D. Copper leaching from primary sulfides: Options for biological and chemical extraction of cooper // Hydrometallurgy. 2006. Vol. 83. P. 10-20.
6. Mc Donald R.G., Muiz D.M. Pressure oxidation leaching of chalcopyrite. Part 1. Comparison of high a. low temperature reaction kinetics a. product // Hydrometallurgy. 2007. Vol. 86. P. 1991-2005.

7. Mackiw V.N., Benz T.W. and Evans D.J.I., 1966, A Review of Recent Developments in Pressure Hydrometallurgy, *Metall. Review*, 11(109). 143-158 pp.
8. Зайцев П.В., Шнеерсон Я.М. Автоклавные технологии переработки медьсодержащего сырья // Цветные металлы. 2016. №4. С. 26-31.
9. Wilmot J.C., Smith R.I., Brewer R.E. Concentrate leach start-up a. optimization at the Phelps Dodge Bagdad mine Arizona // *Pressure Hydrometallurgy*. 2004. P. 77-79.
10. Marsden J.O., Brewer R.E., Haazen H. Copper concentrates leaching developments by Phelps Dodge Corporation // *Hydrometallurgy*. 2003. Vol. 2. P. 1429-1446.
11. Marsden J.O. Keynote Address: lesson learned from the copper industry applied to gold extraction // *World Gold*. 2009. P. 231-240.
12. Крылова Л.Н., Мощанецкий П.В., Шириня Н.В. Выщелачивание металлов из труднообогатимого промпродукта флотации медно-цинковых колчеданных руд // *Обогащение руд*. 2015. №6. С. 14-16.
13. Anderson C.G. Applications of NSC pressure leaching // *Pressure Hydrometallurgy* 2004. Banff, Alberta, 2004. P. 855-886.
14. Aleksandrova T., Romanenko S., Arustamian K. Research of slurry preparation before selective flotation for sulphide-polymetallic ores // *IMPC 2018-29th International Mineral Processing Congress*. 2019. C. 2071-2078.
15. Zalesov M.V., Grigoreva V.A., Trubilov V.S., Boduen A.Ya. Designing of engineering solutions to enhance efficiency of high-copper gold-bearing ore processing. *Gornaya promyshlennost = Russian Mining Industry*. 2021;(5):51-56. (In Russ.) DOI: 10.30686/1609-9192-2021-5-51-56.
16. Crundwell F. et al. *Extractive Metallurgy of Nickel, Cobalt and Platinum Group Metals*. Elsevier, 2011.
17. Deng Q. et al. Ramu nickel cobalt project: NI 43-101 Technical report. North Sydney: Behre Dolbear, 2019. 98 c.
18. Ege D.E. et al. Ramp-up experience at Meta Nikel HPAL plant // *ALTA 2017 Nickel-Cobalt-Copper*. Perth, 2017. C. 1-16.
19. O'Callaghan J. Murrin Murrin Operations – Overview // 2010. C. 155.
20. Shibayama K. et al. Taganito HPAL Plant Project // *Miner. Eng.* 2016. T. 88. C. 61-65.
21. Valle L. et al. Completing the Ambatovy ramp-up: The road to successful financial completion // *ALTA 2016 Ni-Co-Cu*. Perth, 2016. C. 62-80.
22. Valle L., Dickson P., Curtis A. The HPAL plants that SNC-Lavalin built: Where are they now? // *ALTA 2017 Ni-Co-Cu*. Perth, 2017. C. 410-436.
23. Assessment of refractory gold-bearing ores based of interpretation of thermal analysis data // *TN Aleksandrova, G Heide, AV Afanasova. Journal of Mining Institute*, 2019, № 235.
24. Bulaev A.G., Boduen, A.Y., Ukraintsev, I.V. Biooxidation of persistent gold-bearing ore concentrate of the Bestobe deposit // *Obogashchenie Rud*, 2019, 2019(6), pp. 9-14.
25. Boduen A.Y., Fokina S.B., Polezhaev S.Y. The hydrometallurgical pretreatment of a refractory gold sulfide concentrate // *Innovation-Based Development of the Mineral Resources Sector: Challenges and Prospects – 11th conference of the Russian-German Raw Materials*, 2018, 2019, pp. 331-340.
26. Совершенствование технологии селективного разделения медно-никелевых фэйнштейнов / Алексеев Л.И., Ершов С.Ф., Кайтмазов Н.Г., Беккер В.Г., Матвиенко З.И., Юрьев А.И., & Джусоев Ф.З. // *Записки Горного института*, 2005. Т. 165. С. 18.
27. Александрова Т.Н., & О'Коннор С. Переработка платинометаллических руд в России и Южной Африке: состояние и перспективы // *Записки Горного института*. 2020. Т. 244. С. 462-473.
28. Рогожников Д.А. Азотнокислотное выщелачивание ажалского сульфидного мышьяковистого медьсодержащего концентрата // *Цветные металлы*. 2020. № 8. С. 11-17.
29. Hosseini Seyes Abolfazl. Leaching of nickel from a secondary source by sulfuric acid / Seyed Abolfazl Hosseini, Shahram Raygana, Ahmad Rezaeia, Ali Jafarib. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. Volume 5, Issue 4, August 2017, pp. 3922-3929.
30. The total pressure oxidation of copper concentrates / King J.A., Dreisinger D.B., Knight D.A., Paul E. // *Extract. Metallurgy of Copper, Nickel and Cobalt*. 1993. V. 1. P. 735-756.
31. McDonald R.G., Li J., Austin P.J. High Temperature Pressure Oxidation of a Low-Grade Nickel Sulfide Concentrate with Control of the Residue Composition. *Minerals*, 2020, 10, 249.
32. Jafari M., Karimi G., Ahmadi R. Improvement of chalcopyrite atmospheric leaching using controlled slurry potential and additive treatments. *Physicochem. Probl. Miner*, 2017, 53, 1228-1240.
33. McDonald R.G., Li J. The high temperature co-processing of nickel sulfide and nickel laterite sources. *Minerals* 2020, in press.
34. Qian G., Xia F., Brugger J., Skinner W.M., Bei J., Chen G., Pring A. Replacement of pyrrhotite by pyrite and marcasite under hydrothermal conditions up to 220°C: An experimental study of reaction textures and mechanisms. *Am. Mineral*. 2011, 96, 1878-1893.
35. McDonald R., Rodriguez M., Li J., Robinson D., Jackson M., Hosken T. The co-processing of nickel sulphide and laterite materials using low oxygen pressures. In *Pressure Hydrometallurgy 2012, Proceedings of the COM 2012, Niagara Falls, ON, Canada, 30 September-3 October 2012*; Collins M.J., Filippou D., Harlamovs J.R., Peek E., Eds.; MetSoc: Montreal, QC, Canada, 2012, pp. 211-225.
36. Булаев А.Г., Бодуэн А.Я., Украинцев И.В. Биокисление упорного золотосодержащего концентрата руды месторождения Бестобе // *Обогащение руд*. 2019. №6. С. 8-13.

References

- Naboychenko S.S., Shneerson Ya.M., Kalashnikova M.I., Chugaev L.V. *Avtoklavnaya gidrometallurgiya tsvetnykh metallov* [Autoclave hydrometallurgy of non-ferrous metals]. In 2 volumes. Part 2. Yekaterinburg: USTU-UI, 2009. (In Russ.)
- Shneerson Ya.M., Naboychenko S.S. Autoclave hydrometallurgy of non-ferrous metals: Industry trends. *Tsvetnye Metally* [Non-ferrous metals], 2011, no. 3, pp. 15-20. (In Russ.)
- Naboychenko S.S. Development of domestic autoclave metallurgy. *Tsvetnye Metally* [Non-ferrous metals], 1992, no. 6, pp. 27-30. (In Russ.)
- Boduen A.Ya., Petrov G.V., Kobylansky A.A., Bulaev A.G. Sulphide leaching of copper concentrate with high arsenic content. *Obogashchenie Rud* [Ore beneficiation], 2022, no. 1, pp. 14-19. (In Russ.)
- Dreisinger D. Copper leaching from primary sulfides: Options for biological and chemical extraction of copper. *Hydrometallurgy*, 2006, vol. 83, pp. 10-20.
- Mc Donald R.G., Muiz D.M. Pressure oxidation leaching of chalcopyrite. Part 1. Comparison of high a. low temperature reaction kinetics a. product. *Hydrometallurgy*, 2007, vol. 86, pp. 1991-2005.
- Mackiw V.N., Benz T.W., Evans D.J.I. A Review of Recent Developments in Pressure Hydrometallurgy. *Metall. Review*, 1966, 11(109), pp. 143-158.
- Zaitsev P.V., Shneerson Ya.M. Autoclave technologies for processing copper-bearing raw materials. *Tsvetnye Metally* [Non-ferrous metals], 2016, no. 4, pp. 26-31. (In Russ.)
- Wilmot J.C., Smith R.I., Brewer R.E. Concentrate leach start-up a. optimization at the Phelps Dodge Bagdad mine Arizona. *Pressure Hydrometallurgy*, 2004, pp. 77-79.
- Marsden J.O., Brewer R.E., Haazen H. Copper concentrates leaching developments by Phelps Dodge Corporation. *Hydrometallurgy*, 2003, vol. 2, pp. 1429-1446.
- Marsden J.O. Keynote Address: lesson learned from the copper industry applied to gold extraction. *World Gold*, 2009, pp. 231-240.
- Krylova L.N., Moshchanetsky P.V., Shirinya N.V. Leaching of metals from refractory middlings of flotation of copper-zinc pyrite ores. *Obogashchenie Rud* [Ore beneficiation], 2015, no. 6, pp. 14-16. (In Russ.)
- Anderson C.G. Applications of NSC pressure leaching. *Pressure Hydrometallurgy*, 2004. Banff, Alberta, 2004, pp. 855-886.
- Aleksandrova T., Romanenko S., Arustamian K. Research of slurry preparation before selective flotation for sulphide-polymetallic ores. *IMPC 2018-29th International Mineral Processing Congress*, 2019, pp. 2071-2078.
- Zalesov M.V., Grigoreva V.A., Trubilov V.S., Boduen A.Ya. Designing of engineering solutions to enhance efficiency of high-copper gold-bearing ore processing. *Gornaya promyshlennost* [Russian Mining Industry], 2021; (5):51-56. (In Russ.) DOI: 10.30686/1609-9192-2021-5-51-56.
- Crundwell F. et al. *Extractive Metallurgy of Nickel, Cobalt and Platinum Group Metals*. Elsevier, 2011.
- Deng Q. et al. Ramu nickel cobalt project: NI 43-101 Technical report. North Sydney: Behre Dolbear, 2019. 98 p.
- Ege D.E. et al. Ramp-up experience at Meta Nikel HPAL plant. *ALTA 2017 Nickel-Cobalt-Copper*. Perth, 2017, pp. 1-16.
- O'Callaghan J. Murrin Murrin Operations – Overview. 2010, p. 155.
- Shibayama K. et al. Taganito HPAL Plant Project. *Miner. Eng.*, 2016, vol. 88, pp. 61-65.
- Valle L. et al. Completing the Ambatovy ramp-up: The road to successful financial completion. *ALTA 2016 Ni-Co-Cu*. Perth, 2016, pp. 62-80.
- Valle L., Dickson P., Curtis A. The HPAL plants that SNC-Lavalin built: Where are they now? *ALTA 2017 Ni-Co-Cu*. Perth, 2017, pp. 410-436.
- Aleksandrova T.N., Heide G., Afanasova A.V. Assessment of refractory gold-bearing ores based of interpretation of thermal analysis data. *Journal of Mining Institute*, no. 235, 2019.
- Bulaev A.G., Boduen A.Ya., Ukraintsev I.V. Biooxidation of persistent gold-bearing ore concentrate of the Bestobe deposit. *Obogashchenie Rud* [Ore beneficiation], 2019, no. 6, pp. 9-14. (In Russ.)
- Boduen A.Ya., Fokina S.B., Polezhaev S.Y. The hydrometallurgical pretreatment of a refractory gold sulfide concentrate. *Innovation-Based Development of the Mineral Resources Sector: Challenges and Prospects – 11th Conference of the Russian-German Raw Materials*, 2018, 2019, pp. 331-340.
- Alekseev L.I., Ershov S.F., Kaitmazov N.G., Becker V.G., Matvienko Z.I., Yuriev A.I., Dzhusoev F.Z. Optimizing the process of selective separation of copper-nickel mattes. *Zapiski Gornogo instituta* [Proceedings of the Mining Institute], 2005, 165, p. 18. (In Russ.)
- Aleksandrova T.N., O'Connor S. Processing of platinum-metal ores in Russia and South Africa: Status and prospects. *Zapiski Gornogo instituta* [Proceedings of the Mining Institute], 2020, 244, pp. 462-473. (In Russ.)
- Rogozhnikov D.A. Nitric acid leaching of the copper-bearing arsenic sulphide concentrate of Akzhal. *Tsvetnye Metally* [Non-ferrous metals], 2020, no. 8, pp. 11-17. (In Russ.)
- Hosseini Seyes Abolfazl, Raygana Shahram, Rezaeia Ahmad, Jafarib Ali. Leaching of nickel from a secondary source by sulfuric acid. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 5, iss. 4, August 2017, pp. 3922-3929.
- King J.A., Dreisinger D.B., Knight D.A., Paul E. The total pressure oxidation of copper concentrates. *Extract. Metallurgy of Copper, Nickel and Cobalt*, 1993, vol. 1, pp. 735-756.
- McDonald R.G., Li J., Austin P.J. High Temperature Pressure Oxidation of a Low-Grade Nickel Sulfide Concentrate with Control of the Residue Composition. *Minerals* 2020, 10, 249. <https://doi.org/10.3390/min10030249>

32. Jafari M., Karimi G., Ahmadi R. Improvement of chalcopyrite atmospheric leaching using controlled slurry potential and additive treatments. *Physicochem. Probl. Miner.*, 2017, 53, 1228-1240.
33. McDonald R.G., Li J. The high temperature co-processing of nickel sulfide and nickel laterite sources. *Minerals* 2020, in press.
34. Qian G., Xia F., Brugger J., Skinner W.M., Bei J., Chen G., Pring A. Replacement of pyrrhotite by pyrite and marcasite under hydrothermal conditions up to 220°C: An experimental study of reaction textures and mechanisms. *Am. Mineral.*, 2011, 96, 1878-1893.
35. McDonald R., Rodriguez M., Li J., Robinson D., Jackson M., Hosken T. The co-processing of nickel sulphide and laterite materials using low oxygen pressures. In *Pressure Hydrometallurgy 2012, Proceedings of the COM 2012, Niagara Falls, ON, Canada, 30 September-3 October 2012*; Collins M.J., Filippou D., Harlamovs J.R., Peek E., Eds. *MetSoc: Montreal, QC, Canada*, 2012, pp. 211-225.
36. Bulaev A.G., Boduen A. Ya., Ukrantsev I.V. Biooxidation of refractory gold-bearing ore concentrate from the Bestobe deposit. *Obogashchenie Rud* [Ore beneficiation], 2019, no. 6, pp. 8-13. (In Russ.)

Поступила 25.07.2022; принята к публикации 13.09.2022; опубликована 26.09.2022
Submitted 25/07/2022; revised 13/09/2022; published 26/09/2022

Гордеев Даниил Валерьевич – аспирант кафедры металлургии,
Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия.
Email: danya.gordeev.2014@mail.ru

Петров Георгий Валентинович – доктор технических наук, профессор кафедры металлургии,
Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия.
Email: petroffg@yandex.ru

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

Daniil V. Gordeev – Postgraduate Student at the Department of Metallurgy,
St. Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia.
Email: danya.gordeev.2014@mail.ru

Georgiy V. Petrov – DSc (Eng.), Professor at the Department of Metallurgy,
St. Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia.
Email: petroffg@yandex.ru

Tatyana Yu. Nikitina – Postgraduate Student at the Department of Metallurgy,
St. Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia.
Email: nikatatka@yandex.ru

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 622.271.1:622.236.73
DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-3-26-34



МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ ПРИ МИКРОДЕЗИНТЕГРАЦИИ ВЫСОКОГЛИНИСТЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ КОМПОНЕНТОВ В ГИДРОСМЕСЯХ

Хрунина Н.П.

Хабаровский Федеральный исследовательский центр, Институт горного дела ДВО РАН, Хабаровск, Россия

Аннотация. В настоящее время рост ресурсного потенциала страны зависит от освоения глубокозалегающих месторождений, большая часть которых представлена глинистыми золотоносными россыпями с повышенным содержанием тонких и мелких фракций ценных компонентов. Данное обстоятельство зависит от развития более совершенных способов и установок, обеспечивающих разрушение структурных связей глинистых минералов. Особое значение приобретают теоретические исследования и численные методы расчета, пригодные для проектирования установок нового типа, исключающих использование дополнительных энергозатрат при разрушении структурных связей минеральной составляющей в гидросмесьях и работающих на основе модулирования гидродинамических эффектов и кавитации. На основе аналитического расчета получены данные по изменению массовой гидродинамической мощности и термодинамического потенциала системы в процессе деструкции минеральной составляющей гидросмеси в предлагаемой автором установке, моделирующей гидродинамические эффекты с учетом объемного расхода гидросмеси. В результате расчетов установлено, что определяющую роль в процессе микродезинтеграции минеральных частиц на первой ступени турбулизации играет изменение термодинамического потенциала системы, зависящего от изменения массовой гидродинамической мощности системы и времени воздействия. При увеличении расхода и скорости потока в 5 раз величина давления, массовая гидродинамическая мощность и термодинамический потенциал системы увеличиваются в среднем в 25 раз. При уменьшении выходного диаметра сопла, согласно расчетным данным, массовая гидродинамическая мощность и термодинамический потенциал системы увеличивается в среднем в 2,8 раза. Развитие численных методов исследования и проектирования гравитационных установок нового типа позволит адаптировать их к использованию на объектах добычи полезных ископаемых. Прогнозируется при активизации микродезинтеграции сокращение потерь тонких частиц ценных компонентов, снижение потребления энергоресурсов и повышение экологической безопасности за счет использования гидродинамического эффекта преобразования среды непосредственно, в том числе в обогащательных процессах, обеспечивая снижение расхода поверхностно-активных веществ и реагентов.

Ключевые слова: высокоглинистые пески, микродезинтеграция, термодинамический потенциал, массовая гидродинамическая мощность, гидродинамический генератор

Исследования проводились с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием «Центр обработки и хранения научных данных Дальневосточного отделения Российской академии наук», финансируемого Российской Федерацией в лице Министерства науки и высшего образования РФ по проекту № 075-15-2021-663.

© Хрунина Н.П., 2022

Для цитирования

Хрунина Н.П. Моделирование гидродинамических эффектов при микродезинтеграции высокоглинистых минеральных компонентов в гидросмесьях // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №3. С. 26-34. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-3-26-34>



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

MODELING OF HYDRODYNAMIC EFFECTS IN MICRODISINTEGRATION OF HIGH-CLAY MINERAL COMPONENTS IN SLURRIES

Khrunina N.P.

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

Abstract. Now, the growth of Russia's resource potential depends on the development of deep-seated deposits, mostly represented by clay gold-bearing placers with a higher content of thin and fine fractions of valuable components. This circumstance depends on development of improved methods and facilities, breaking structural bonds of clay minerals. A particular importance is given to theoretical studies and numerical methods applied to design a new type of facilities, excluding the use of additional power consumption, when breaking structural bonds of mineral components in slurries and operating by modeling hydrodynamic effects and cavitation. The analytical calculations provided data on changes in mass hydrodynamic power and thermodynamic potential of the system, when destructing mineral components of slurries in the unit suggested by the author and modeling hydrodynamic effects subject to the volume flow of slurries. The calculations showed that a decisive role in microdisintegration of mineral particle at the first stage of turbulization was played by changes in thermodynamic potential of the system, depending on changes in mass hydrodynamic power of the system and exposure time. When consumption and flow rate increase by 5 times, pressure, mass hydrodynamic power and thermodynamic potential of the system increase by 25 times on average. When a nozzle exit diameter decreases, according to the calculated data, mass hydrodynamic power and thermodynamic potential of the system increase by 2.8 times on average. Development of numerical methods and design of a new type of gravitation facilities contribute to adapting them to the use at mining sites. When activating microdisintegration, it is expected that utility consumption will decrease and environmental safety will improve due to hydrodynamic effect of transforming environment directly, including in beneficiation processes, ensuring lower consumption of surfactants and chemical agents.

Keywords: high clay sands, microdisintegration, thermodynamic potential, mass hydrodynamic power, hydrodynamic generator

This research was carried out using the facilities of the Shared Knowledge Centre located at the Centre for Scientific Data Processing and Storage at the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences and funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under Project No. 075-15-2021-663.

For citation

Khrunina N.P. Modeling of Hydrodynamic Effects in Microdisintegration of High-Clay Mineral Components in Slurries. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 3, pp. 26-34. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-3-26-34>

Введение

Одним из важнейших факторов обеспечения ресурсной составляющей в Хабаровском крае является освоение глубокозалегающих и древних погребенных месторождений, большая часть которых представлена глинистыми золотоносными россыпями. Кроме глинистой составляющей месторождения имеют повышенное содержание мелких и тонких частиц ценных компонентов. На объектах месторождений Колчан, Каменистый, Кедровка, Рокосуевский, Ангочикан, Кайгачан, Благодатный-Майнура, Майский содержание мелкого золота фракции размером менее 0,5 мм составляет более 90%, с преобладанием большей частью фракций размером менее 0,3 мм – в некоторых случаях до 88% [1, 2].

В настоящее время потери мелкого и тонкого

золота в процессе эксплуатации высокоглинистых россыпей порой достигают 80%. Присутствие глинистых минералов, которые образуют трудноразрушаемые структурные связи, предопределяет усложнение процесса глубокой дезинтеграции песков до микроуровня. Естественная влажность проб чаще всего в пределах от 0,4 до 1%, что также увеличивает трудоемкость переработки [3-5]. Характеристика вмещающих пород, величина глинистой составляющей, крупность и форма золотин, повышенное содержание мелких и тонких фракций, режим работы промывочных агрегатов и ряд других факторов влияют на технологические параметры переработки золотоносных песков, увеличивая капитальные и энергетические затраты.

К интенсифицирующим дезинтеграционные процессы факторам можно отнести прямое ме-

ханическое воздействие на конгломераты песков и гидродинамические эффекты. Особое значение в настоящее время приобретает направление исследований на основе инициирования развитой турбулентности, гидравлических ударов, кавитации в гидросмесьях, обеспечивающих микродезинтеграцию твердой составляющей.

Состояние вопроса и постановка проблемы

Поиски решения проблемы микродезинтеграции высокоглинистых песков россыпей осуществлялись на основе использования гравитационных методов динамического типа в тонкослойных потоках на аппаратах и в зумпфовых накопителях, сочетающих элементы вибрационного или волнового излучающего воздействия, на концентрационных столах обычного типа и вращающихся с активизацией процесса обезвреживания промпродукта [6-8]. Предпринимались попытки использования комбинированного воздействия гравитации и ультразвука при переработке тяжелых минералов из труднопромывистых россыпных месторождений, в частности высокоглинистых, с повышенным содержанием мелкого золота [9, 10].

В настоящее время получает развитие исследование процессов дезинтеграции гидросмесей в устройствах, реализующих эффект Вентури, кавитации и других гидродинамических явлений. Известны разработки, в основе которых лежит активизация гидродинамических эффектов посредством гибких препятствий и отражателей в виде механических резонаторов, формирующих в текучей среде параметрические резонансные колебания. Интересна разработка многоступенчатого гидроударно-кавитационного устройства для мелкодисперсного измельчения в проточном режиме [11]. Однако, в силу определенных условий, в том числе необходимости создания не только мощных энергетических установок, способных обеспечить разрушение минеральных частиц, но и менее энергозатратных, данная разработка не отвечает необходимым требованиям.

Идея по пути развития менее энергозатратных установок, В.П. Терехиным в соавторстве [12] предложено устройство, инициирующее гидродинамические колебания в текучей среде за счет ее движения относительно гибких препятствий, снабженных кавитаторами, установленными на механических резонаторах с образованием пульсирующей кавитационной зоны. Однако низкий КПД, обусловленный геометрической зависимостью условий возбуждения колебаний и невозможностью использования высоких скоростей потока для обработки сред высокой плотности,

ограничивает применение устройства для дезинтеграции минеральных компонентов гидросмесей. Следует отметить, что инициирование кавитации посредством модулирования гидродинамических истечений струй и потоков минеральных гидросмесей с использованием стационарных элементов в настоящее время получает свое развитие.

Известны исследования, связанные с обобщением математических моделей гидродинамических и кавитационных явлений [13], комбинации ультразвука и поверхностно-активных веществ [14], влияния ударных волн и кавитации, возбуждаемых в начальной стадии каналом электрического разряда при воздействии на частицы в водных суспензиях [15]. В работе [16] предложена приближенная модель вихревого потока, инициируемого воздействием газообразного продукта, завихрителей и стержней. Установлено, что энергия вихревого потока пропорциональна расходу потока, разности давлений на входе и выходе устройства. Моделирование гидродинамических процессов фильтрации пластовой жидкости является важным элементом при интерпретации кривых притока и восстановления давления, а также позволяет решать ряд задач, касающихся режима испытания объекта и выбора компоновки испытательного оборудования. Расширяются области применения кавитаторов в лабораторных условиях для получения металлов, оксидов металлов, халькогенидов, карбидов металлов и углерода. Отмечается значительное затруднение дальнейшего применения кавитаторов в промышленных масштабах из-за проблем масштабирования [17-20]. Отмечается также необходимость развития теоретических, вычислительных и экспериментальных методов исследования механизма генерации кавитации, которые еще недостаточно изучены при использовании экспериментальной визуализации потока, изображений частиц. Универсальные методы исследования и проектирования, закон масштабирования и метод оптимизации в данном направлении еще не созданы [21, 22].

Исследования дезинтеграции высокоглинистых песков с повышенным содержанием ценных компонентов мелких и тонких фракций лежат в области происходящих физико-механических, физико-химических и гидродинамических явлений при взаимодействии гидросмеси с рабочими органами путем регулирования истечения потока в соответствии с заданными параметрами. Срабатывают разнообразные эффекты понижения прочности вследствие влияния гидродинамических эффектов, инициирующих по-

нижение удельной свободной поверхностной энергии твердого тела.

Целью исследования является анализ изменения массовой гидродинамической мощности и термодинамического потенциала системы в процессе деструкции минеральной составляющей гидросмеси при подаче потока через сопло в предлагаемой установке, моделирующей гидродинамические эффекты на первой ступени генерации с учетом объемного расхода гидросмеси на основе аналитических расчетов.

Полученные результаты и их обсуждение

Для решения вопроса глубокой переработки труднообогатимых высокоглинистых песков россыпей, с целью эффективного вскрытия измельчаемого материала на уровне дисперсности фракций десятков и менее микрометров более экологически и технологически эффективными средствами, разработана и предлагается система, моделирующая процессы многоступенчатой струйно-акустической дезинтеграции минеральной составляющей гидросмеси. Конструктивное выполнение гидродинамического генератора, обеспечивающего деструкцию связей глинистой составляющей минеральных компонентов для интенсификации выделения мелких частиц ценных минералов, включает сопло 1 (рис. 1), диффузор 2, в который посредством сопла осуществляется скоростная подача струи минеральной гидросмеси на плоскую поверхность рассекателя 3 и последующее поступление ее в конфузор 4 с рассекателями в виде балок-уголков 5, расположенных с накло-

ном вдоль стенок конфузора и балок-уголков 6, расположенных в центральной части с противоположным наклоном по отношению к стенкам.

Существующая техническая возможность регулирования параметров скоростных режимов подачи гидросмеси при определенном соотношении твердой фракции к жидкой, расхода гидросмеси и времени деструкции материала делает процесс достаточно управляемым при необходимом преобразовании сырья в сторону разрушения на микроуровне. В расчетах диаметр выходного сечения сопла d принимаем равным 0,03 и 0,05 м, время воздействия t принимаем 2 и 4 с. При содержании твердого 0,1 и воды 0,9 частей расчетная равновесная плотность гидросмеси ρ составит величину 1076,3 кг/м³. Коэффициент полезного действия установки η принимаем равным 0,5. Площадь поверхности турбулизации S_m при радиусе, равном 0,1 м, составит 0,0314 м². Диапазон изменения расхода гидросмеси Q принимаем равным от 0,02 до 0,1 м³/мин или от 0,00033 до 0,00167 м³/с.

Для определения массовой гидродинамической мощности потока W по формуле

$$W = P \cdot S_m \quad (1)$$

определяем давление струи P на плоскую поверхность рассекателя 3 (см. рис. 1) с учетом плотности ρ , объемного расхода гидросмеси Q и скорости потока V , выходящего из сопла при заданных параметрах по формуле

$$P = \rho \cdot Q \cdot V. \quad (2)$$

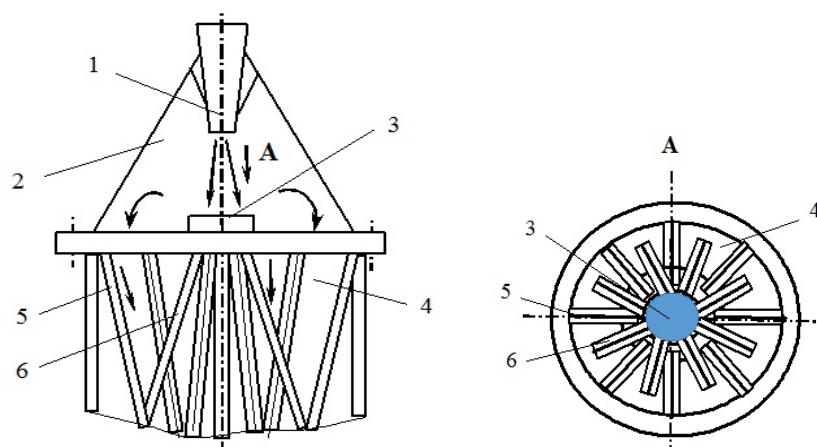


Рис. 1. Схема инициирования гидродинамических возмущений на первой ступени генератора: 1 – сопло; 2 – диффузор; 3 – плоская поверхность рассекателя; 4 – конфузор с рассекателями в виде балок-уголков; 5 – удлиненные балки-уголки; 6 – короткие балки-уголки

Fig. 1. Diagram of initiation of hydrodynamic disturbances at the first stage of the generator: 1 is a nozzle; 2 is a diffuser; 3 is a flat surface of the divider; 4 is a convergent tube with angle beam-shaped dividers; 5 are long angle beams; 6 are short angle beams

На рис. 2 представлена зависимость массовой гидродинамической мощности системы W от расхода гидросмеси Q , полученная с учетом теоретической формулы (1).

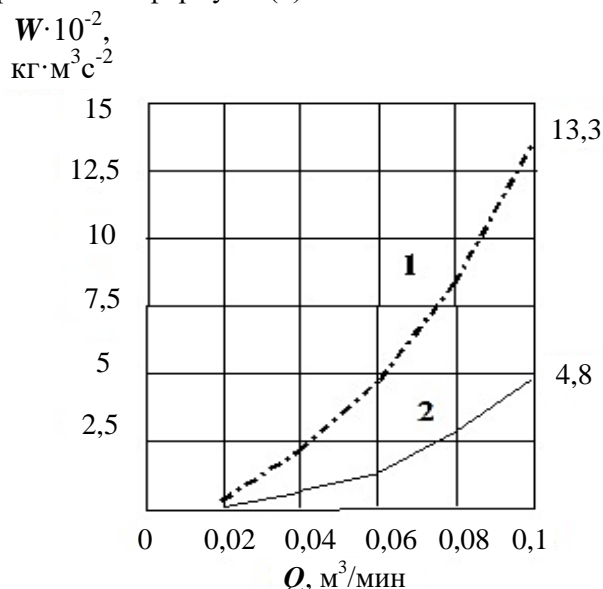


Рис. 2. Зависимость изменения массовой гидродинамической мощности системы от расхода гидросмеси при времени 2 с и диаметрах выходного сечения сопла, равных 0,03 м (1) и 0,05 м (2)

Fig. 2. Dependence between changes in mass hydrodynamic power of the system and the flow rate of slurries at a period of 2 s and nozzle exit section diameters of 0,03 m (1) and 0,05 m (2)

Расчет изменения термодинамического потенциала E системы осуществляем по формуле

$$dE = W \cdot n \cdot dt. \quad (3)$$

На рис. 3 представлена зависимость изменения термодинамического потенциала E поверхностей минеральных частиц гидросмеси от расхода гидросмеси Q , полученная с учетом теоретической формулы (3).

В результате расчетов установлено, что определяющую роль в процессе микродезинтеграции минеральных частиц на первой ступени турбулизации играет изменение массовой гидродинамической мощности системы, зависящей от плотности ρ , объемного расхода гидросмеси Q и скорости потока V гидросмеси, выходящего из сопла при заданных параметрах, а также изменение термодинамического потенциала системы, зависящего от изменения массовой гидродинамической мощности системы, коэффициента полезного действия установки и времени воздействия.

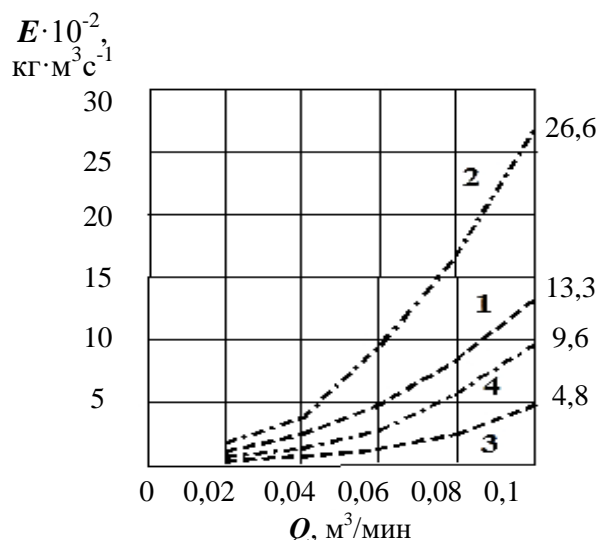


Рис. 3. Зависимость изменения термодинамического потенциала поверхностей минеральных частиц от расхода гидросмеси: 1 – при диаметре выходного сечения сопла $d = 0,03$ м и времени 2 с; 2 – при $d = 0,03$ м и времени 4 с; 3 – при $d = 0,05$ м и времени 2 с; 4 – при $d = 0,05$ м и времени 4 с

Fig. 3. Dependence between changes in thermodynamic potential of the surfaces of mineral particles and the flow rate of slurries: 1 is when nozzle exit section diameter $d = 0,03$ m and time is 2 s; 2 is at $d = 0,03$ m and 4 s; 3 is at $d = 0,05$ m and 2 s; 4 is at $d = 0,05$ m and 4 s

При увеличении расхода и скорости потока в 5 раз давление, массовая гидродинамическая мощность и термодинамический потенциал системы увеличиваются в среднем в 25,6-25,7 раза. При уменьшении выходного диаметра сопла, согласно расчетным данным, массовая гидродинамическая мощность и термодинамический потенциал системы увеличивается в среднем в 2,8 раза (см. рис. 2). Расход гидросмеси и диаметр сопла влияют на скоростной режим струи, который, в свою очередь, активизирует давление на плоскую поверхность рассекателя, формируя массовую гидродинамическую мощность, оказывающую влияние на изменение термодинамического потенциала системы минеральных частиц.

Предлагаемая конструкция установки

Гидродинамический генератор выполнен с профилированными сужающимися и расширяющимися каналами, образующими корпус генератора, а также с последовательно установленными стационарными кавитационными элементами в виде балок-уголков [23]. Профилированные сужающиеся и расширяющиеся каналы корпуса генератора выполнены составными для

удобства технологической сборки и разборки (рис. 4). Дезинтеграция полиминеральной составляющей гидросмеси до микроуровня обеспечивается посредством преобразования кинетической энергии потока жидкости в энергию акустических колебаний и усиливается путем формирования полей в зоне кавитации в нижней части конфузора. На выходе из верхнего диффузора создают турбулентность, переходящую в разреженность посредством жестко вплотную закрепленных вдоль стенки конфузора по всей высоте удлинненных балок-уголков.

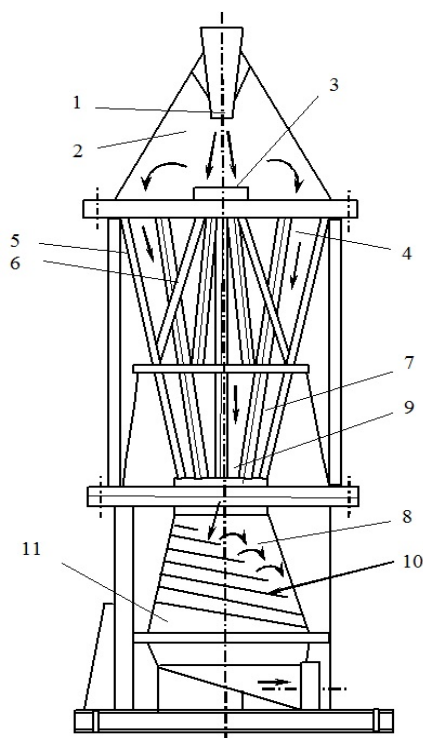


Рис. 4. Гидродинамический генератор: 1 – сопло; 2 – верхний диффузор; 3 – плоская поверхность рассекаателя; 4 – конфузор; 5 – удлинненные балки-уголки; 6 – короткие балки-уголки; 7 – сужающийся канал; 8 – расширяющийся канал; 9 – нижняя часть конфузора; 10 – ребра; 11 – нижний диффузор

Fig. 4. Hydrodynamic generator: 1 is a nozzle; 2 is a top diffuser; 3 is a flat surface of the divider; 4 is a convergent tube; 5 are long angle beams; 6 are short angle beams; 7 is a tapering channel; 8 is an expanding channel; 9 is a bottom part of the convergent tube; 10 are ribs; 11 is a bottom diffuser

Интенсификация процесса усиливается посредством коротких балок-уголков, установленных в сегментах между удлинненными балками-уголками с противоположным наклоном по вертикали по отношению к ним. Кромки прямого

угла коротких балок-уголков повернуты навстречу потоку для усиливающего эффекта. Последующий турбулентный режим осуществляется с помощью ребер, установленных с наклоном в нижней части корпуса – нижнем диффузоре гидродинамического генератора (см. рис. 4). С учетом влияния массовой гидродинамической мощности и формируемого термодинамического потенциала системы минеральная составляющая гидросмеси претерпевает изменения в сторону активного разрушения структурных и физико-механических связей. В зависимости от типа структурных связей изменяются морфометрические и энергетические параметры системы. Данный эффект преобразования может использоваться в обогащительных процессах, активизируя физико-химическое влияние реагентов и обеспечивая снижение их расхода.

Заключение

Аналитическим путем определены основные факторы, влияющие на кинетику и способствующие интенсификации процесса деструкции минеральной составляющей гидросмеси при подаче потока через сопло в установках, моделирующих гидродинамические эффекты на первой ступени генерации с учетом объемного расхода. Осуществлен анализ изменения массовой гидродинамической мощности и термодинамического потенциала системы в процессе деструкции твердой составляющей гидросмеси. Прогнозируемые процессы в установке без дополнительных энергетических затрат позволяют обеспечить получение необходимых значений объемной плотности гидродинамических возмущений для обеспечения градиента давления с превышением предела прочности микрочастиц высокоглинистых золотоносных песков россыпей.

Развитие численных методов исследования и проектирования гравитационных установок позволит адаптировать их к использованию на объектах добычи полезных ископаемых, обеспечит сокращение потерь тонких частиц ценных компонентов, снизит потребление энергоресурсов и повысит экологическую безопасность. Применение данного эффекта преобразования непосредственно в обогащительных процессах с использованием реагентов будет способствовать активизации физико-химического влияния реагентов, обеспечивая снижение их расхода. Исследования в данном направлении требуют своего дальнейшего развития.

Список источников

1. Мамаев Ю.А., Хрунина Н.П. Перспективы освоения глинистых россыпей Приамурья // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. № S5. С. 47-57.
2. Семенов А.Н., Серый Р.С. Исследование процессов дезинтеграции труднопромывистых песков россыпных месторождений золота // Известия вузов. Горный журнал. 2019. № 8. С. 88-96. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-8-88-96.
3. Мирзеханов Г.С., Литвинцев В.С. Состояние и проблемы освоения техногенных россыпных месторождений благородных металлов в Дальневосточном регионе // Горный журнал. 2018. №10. С. 25-30.
4. Шкаруба Н.А., Кисляков В.Е., Борисов Ф.И. Особенности обоснования параметров моделирования размыва горных пород напорной струей гидромонитора // Вестник Забайкальского государственного университета. 2019. Т. 25, № 4. С. 32-38.
5. Мирзеханов Г.С., Литвинцев В.С., Алексеев В.С. Перспективы масштабного освоения техногенных россыпных месторождений благородных металлов // Маркшейдерия и недропользование. 2019. № 6. С. 22-30.
6. Пат. РФ № 2187373 РФ. Многоуровневая установка для извлечения ценных минералов / Н.П. Хрунина, Ю.А. Мамаев, О.В. Стратечук, Т.О. Хрунин; заявитель и патентообладатель ИГД ДВО РАН. Оpubл. 20.08.2002. Бюл. № 23.
7. Хрунина Н.П., Чебан А.Ю. Оценка влияния водонасыщения на дезинтеграцию высокоглинистых песков при разработке россыпей благородных металлов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. № 4 (52). С. 50-55.
8. Мамаев Ю.А., Хрунина Н.П. Определение оптимальных начальных параметров звукового воздействия на пульпу в зумповом накопителе при открытой разработке высокоглинистых россыпей // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. № 7. С. 187-191.
9. Пат. 2209974 РФ. Геотехнологический комплекс с многоступенчатой дезинтеграцией / Н.П. Хрунина, Ю.А. Мамаев; заявитель и патентообладатель ИГД ДВО РАН. Оpubл. 10.08.2003. Бюл. № 22.
10. Пат. 2200629 РФ. Грохот-дезинтегратор с интенсификацией кавитации комбинированным воздействием ультразвука / Н.П. Хрунина; заявитель и патентообладатель ИГД ДВО РАН. Оpubл. 20.03.2003. Бюл. № 8.
11. Пат. на полезную модель 115690 РФ. Многоступенчатое гидроударно-кавитационное устройство / А.Н. Анушенков, И.В. Мещеряков. Оpubл. 10.05.2012. Бюл. № 13.
12. Пат. 2476261 РФ. Способ возбуждения акустических колебаний в текучей среде и устройство (варианты) для его осуществления / В.П. Терехин, Д.М. Пастухов, М.Е. Пастухов. Оpubл. 27.02.2013. Бюл. № 6.
13. Математическое моделирование кавитационных процессов при кондиционировании промышленных сточных вод / Дубровская О.Г., Кулагина В.А., Сапожникова Е.С., Фэнг-Чэнь Лив, Цянь Лив, Чжи-Ин Чжэн // Журнал СФУ. Техника и технологии. 2015. № 8. С. 369-376.
14. Замотин П.А., Лобанов В.Г. Интенсификация процесса измельчения золотосодержащей руды с использованием поверхностно-активных веществ и дополнительной обработкой ультразвуком // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №3. С. 25-32. DOI: 10.18503/1995-2732-2018-16-3-25-32.
15. Кудимов Ю.Н., Казуб В.Т., Голов Е.В. Электро-разрядные процессы в жидкости и кинетика экстрагирования биологически активных компонентов. Ч. 1. Ударные волны и кавитация // Вестник ТГТУ. 2002. Т. 8. № 2. С. 254-264. ISSN 0136-5835.
16. Аникин В.С., Аникин В.В. Моделирование гидродинамических вихревых потоков с ультразвуковыми кавитационными процессами // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2008. № 24. С. 61-66.
17. Atici U., Comakli R. Evaluation of the physico-mechanical properties of plutonic rocks based on texture coefficient by // The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2019. Vol. 119. Pp. 63-69.
18. Choi J., Cui M., Lee Y., Ma J., Kim J., Son Y., et al. Hybrid reactor based on hydrodynamic cavitation, ozonation and oxidation of persulfate for the decomposition of oxalic acid in the processes of extraction of rare earth elements // Ultrasound. Sonochem. 2019. 52, 326-335. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2018.12.004.
19. Gagol M., Przyjazny A., Boczkaj G. Wastewater treatment by means of advanced oxidation processes based on cavitation – a review // Chem. Eng. J. 2018. Vol. 338, 599-627. DOI: 10.1016/j.cej.2018.01.049
20. Gagol M.R., Soltani D.C., Przyjazny A., Boczkaj G. Effective degradation of sulfide ions and organic sulfides in cavitation-based advanced oxidation processes (AOPs) // Ultrason. Sonochem. 2019. 58:104610. DOI: 10.1016/j.ultsonch. 2019.05.027.
21. Kim H., Koo B., Sun X., Yong Yoon J. Investigation of the process of sludge disintegration using a hydrodynamic cavitation reactor of rotary-stator type // Sep. Purif. Technol. 2020. 240:116636. DOI: 10.1016/j.seppur.2020.116636.
22. Маркон А., Мелкот С.Н., Йода М. Влияние масштабирования размера сопла при кавитационном струйном упрочнении воды // J. Manuf. Процесс. 2018. № 31. С. 372-381.
23. Пат. 2714417 РФ. Способ активации микродезинтеграции высокоглинистой полиминеральной составляющей гидросмеси / Н.П. Хрунина; заявитель и патентообладатель ИГД ДВО РАН. Оpubл. 14.02.2020. Бюл. № 5.

References

1. Mamaev Yu.A., Khrunina N.P. Prospects for the development of clay placers of the Amur region. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Information and Analytical Bulletin], 2009, no. S5, pp. 47-57. (In Russ.)
2. Semenov A.N., Sery R.S. Study on disintegration processes of hard-to-wash sands of placer gold deposits. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal* [News of Higher Institutions. Mining Journal], 2019, no. 8, pp. 88-96. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-8-88-96. (In Russ.)
3. Mirzekhanov G.S., Litvintsev V.S. The state and problems of development of technology-related placer deposits of noble metals in the Far Eastern region. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal], 2018, no. 10, pp. 25-30. (In Russ.)
4. Shkaruba N.A., Kislyakov V.E., Borisov F.I. Features of providing rationale for parameters of modeling the erosion of rocks by a pressure jet of a hydraulic monitor. *Vestnik Zabaikalskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Transbaikalian State University], 2019, vol. 25, no. 4, pp. 32-38. (In Russ.)
5. Mirzekhanov G.S., Litvintsev V.S., Alekseev V.S. Prospects for large-scale development of technology-related placer deposits of noble metals. *Marksheideriya i nedropolzovanie* [Surveying and Subsoil Use], 2019, no. 6, pp. 22-30. (In Russ.)
6. Khrunina N.P., Mamaev Yu.A., Stratechuk O.V., Khrunin T.O. *Mnogourovnevaya ustanovka dlya izvlecheniya tsennykh mineralov* [A multi-level unit for the extraction of valuable minerals]. Patent RU, no. 2187373, 2002.
7. Khrunina N.P., Cheban A.Yu. Assessment of the influence of water saturation on the disintegration of high-clay sands in the development of placers of noble metals. *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2015, no. 4 (52), pp. 50-55. (In Russ.)
8. Mamaev Yu.A., Khrunina N.P. Determination of optimal initial parameters of sound effect on the pulp in a sump in the open development of high-clay placers. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Information and Analytical Bulletin], 2009, no. 7, pp. 187-191. (In Russ.)
9. Khrunina N.P., Mamaev Yu.A. *Geotekhnologicheskiy kompleks s mnogostupenchatoy dezintegratsiei* [Geotechnological complex with multi-stage disintegration]. Patent RU, no. 2209974, 2003.
10. Khrunina N.P. *Grokhot-dezintegrator s intensifikatsiei kavitatsii kombinirovannym vozdeystviem ultrazvuka* [A sizing disintegrator with intensification of cavitation by combined exposure to ultrasound]. Patent RU, no. 2200629, 2003.
11. Anushenkov A.N., Meshcheryakov I.V. *Mnogostupenchatoe gidroudarno-kavitatsionnoe ustroystvo* [A multistage water hammer-cavitation device]. Utility model patent RU, no. 115690, 2012.
12. Terekhin V.P., Pastukhov D.M., Pastukhov M.E. *Sposob vozbuzhdeniya akusticheskikh kolebaniy v tekuchei srede i ustroystvo (varianty) dlya ego osushchestvleniya* [Method of excitation of acoustic vibrations in fluid and device(s) for its implementation]. Patent RU, no. 2476261, 2013. (In Russ.)
13. Dubrovskaya O.G., Kulagin V.A., Sapozhnikova E.S., Feng-Chen Li, Qian Li, Zhi-Ying Zheng. Mathematical modeling of cavitation processes in conditioning industrial wastewater. *Zhurnal SFU. Tekhnika i tekhnologii* [Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies], 2015, no. 8, pp. 369-376. (In Russ.)
14. Zamotin P.A., Lobanov V.G. Intensification of the process of grinding gold-containing ore using surfactants and additional sonication. *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2018, vol. 16, no. 3, pp. 25-32. DOI: 10.18503/1995-2732-2018-16-3-25-32
15. Kudimov Yu.N., Kazub V.T., Golov E.V. Electric discharge processes in liquid and kinetics of extraction of biologically active components. Part 1. Shock waves and cavitation. *Vestnik TGTU* [Bulletin of Tambov State Technical University], 2002, vol. 8, no. 2, pp. 254-264. ISSN 0136-5835. (In Russ.)
16. Anikin V.S., Anikin V.V. Modeling of hydrodynamic vortex flows with ultrasonic cavitation processes. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radio-tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Ryazan State Radio Engineering University], 2008, no. 24, pp. 61-66. (In Russ.)
17. Atici U., Comakli R. Evaluation of the physico-mechanical properties of plutonic rocks based on texture coefficient. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 119, 63-69 (2019).
18. Choi J., Cui M., Lee Y., Ma J., Kim J., Son Y. et al. Hybrid reactor based on hydrodynamic cavitation, ozonation and oxidation of persulfate for the decomposition of oxalic acid in the processes of extraction of rare earth elements. *Ultrasonics Sonochemistry*, 52, 326-335 (2019). DOI: 10.1016/j.ultsonch.2018.12.004.
19. Gagol M., Przyjazny A., Boczkaj G. Wastewater treatment by means of advanced oxidation processes based on cavitation – a review. *Chem. Eng. J.* 338, 599-627 (2018). DOI: 10.1016/j.cej.2018.01.049
20. Gagol M.R., Soltani D.C., Przyjazny A., Boczkaj G. Effective degradation of sulfide ions and organic sulfides in cavitation-based advanced oxidation processes (AOPs). *Ultrasonics Sonochemistry*, 58, 104610 (2019). DOI: 10.1016/j.ultsonch.2019.05.027.
21. Kim H., Koo B., Sun X., Yong Yoon J. Investigation of the process of sludge disintegration using a hydrodynamic cavitation reactor of rotary-stator type. *Sep. Purif. Technol.* 240, 116636 (2020). DOI: 10.1016/j.seppur.2020.116636.

22. Marcon A., Melkote S.N., Yoda M. Effect of nozzle size scaling in co-flow water cavitation jet peening. J. Manuf. Process, 2018, no. 31, pp. 372-381.
23. Khrunina N.P. *Sposob aktivatsii mikrodezintegratsii vysokoglinistoy polimineralnoy sostavlyayushchey gidrosmesi* [Method of activation of microdisintegration of a high-clay polymineral component of slurry]. Patent RU, no. 2714417. 2020.

Поступила 12.05.2022; принята к публикации 01.09.2022; опубликована 26.09.2022
Submitted 12/05/2022; revised 01/09/2022; published 26/09/2022

Хрунина Наталья Петровна – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник,
Хабаровский Федеральный исследовательский центр, Институт горного дела ДВО РАН, Хабаровск, Россия.
E-mail: npetx@mail.ru. ORCID 0000-0001-8117-0922

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

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 622.271
DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-3-35-44



СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ РАЗРАБОТКИ СЛОЖНОСТРУКТУРНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМБИНИРОВАННОЙ ВЫЕМКИ РУД

Чебан А.Ю., Секисов А.Г.

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

Аннотация. **Актуальность и цель исследования.** Месторождения руд благородных и цветных металлов преимущественно имеют сложную структуру с высокой изменчивостью содержаний полезных компонентов в массиве, в связи с чем их разработка с применением взрывного рыхления приводит к существенному перемешиванию сортов и разубоживанию руд, что в дальнейшем ведет к увеличению затрат на обогащение и снижению сквозного извлечения полезных компонентов. Известные комбинированные схемы разработки, предполагающие механическую выемку особо богатых руд путем выбуривания, не обеспечивают выявления точных контуров зон богатых и особо богатых руд, а также не позволяют производить опережающую выемку всего объема особо ценного сырья из массива. **Цель работы.** Совершенствование технологии комбинированной разработки сложноструктурных рудных месторождений путем уточнения контуров зон богатых и особо богатых руд, подбора комплекта оборудования для обеспечения их качественной селективной выемки, а также обоснование эффективности дезинтеграции относительно прочных руд растворами поверхностно-активных веществ. **Результаты.** Проведенные экспериментальные исследования по разупрочнению образцов скальных пород средней трудности разрушения раствором поверхностно-активных веществ показали существенное снижение их прочности на одноосное сжатие и растяжение. В статье предлагается усовершенствованная технология разработки, заключающаяся в формировании сети взрывных скважин, одновременно являющихся прободоотборными выработками на первой стадии сопровождающей разведки. При выявлении зон с высоким содержанием полезного компонента осуществляется вторая стадия сопровождающей разведки с локальным сгущением сети скважин меньшего диаметра и поинтервальным опробованием, на основании данных которой производится оконтуривание включений богатых и особо богатых руд в плане и по вертикали. Полученная сгущенная сеть скважин в дальнейшем используется для пропитки массива раствором поверхностно-активных веществ. Опережающее рыхление и выемка локальных участков особо богатых руд осуществляется гидравлическим экскаватором, оснащенным сменным оборудованием в виде гидравлического молота и гидравлического грейфера. Оставшаяся часть массива рыхлится взрывом, после чего производится извлечение рудной массы карьерным экскаватором. **Выводы.** Предлагаемая технология позволяет уточнить контуры богатых и особо богатых руд в массиве. Применение гидравлического молота позволяет производить отбойку особо богатых руд по границам выявленного контура с минимизацией перемешивания сортов, что увеличит извлечение полезных компонентов при последующей переработке ценного минерального сырья.

Ключевые слова: особо богатые руды, поверхностно-активные вещества, разупрочнение, опережающая механическая выемка, экскаватор, гидравлический молот, производительность

© Чебан А.Ю., Секисов А.Г., 2022

Для цитирования

Чебан А.Ю., Секисов А.Г. Совершенствование технологии разработки сложноструктурных месторождений с применением комбинированной выемки руд // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №3. С. 35-44. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-3-35-44>



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

IMPROVEMENT IN THE TECHNOLOGY FOR THE DEVELOPMENT OF COMPLEX DEPOSITS APPLYING COMBINED ORE EXTRACTION

Cheban A.Yu., Sekisov A.G.

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

Abstract. Relevance and objective of the study. Precious and non-ferrous metal ore deposits mainly have a complex structure with a high variability in the content of useful components in the massif; therefore, their development using the blasting loosening leads to a significant regrading and dilution of ores, subsequently leading to an increase in the cost of enrichment and a decrease in the throughout extraction of useful components. The well-known combined development schemes, which involve the mechanical extraction of especially rich ores by drilling, do not provide for the identification of the exact contours of zones of rich and especially rich ores, and also do not allow for the advance extraction of the entire volume of especially valuable raw materials from the massif. **Objective.** Improving the technology of combined development of complex structure ore deposits by clarifying the contours of zones of rich and especially rich ores, selecting a set of equipment to ensure their high-quality selective extraction, as well as substantiating efficiency of disintegration of relatively strong ores with solutions of surfactants. **Results.** The conducted experimental studies on the softening of medium-hard rock samples with a solution of surfactants showed a significant decrease in their strength in uniaxial compression and tension. The paper proposes an improved development technology, which consists in the formation of a network of blast holes, which are at the same time sample workings at the first stage of an accompanying exploration. When zones with a high content of a useful component are identified, the second stage of the accompanying exploration is carried out, including a local thickening of the network of the holes of a smaller diameter and interval sampling, leading to outlining rich and especially rich ores laterally and vertically. Then the resulting dense network of the holes is used to impregnate the massif with a solution of surfactants. Advanced loosening and excavation of local areas of especially rich ores is carried out by a hydraulic excavator equipped with interchangeable equipment, such as a hydraulic hammer and a hydraulic grab. The rest of the massif is loosened by blasting, and then the ore mass is extracted with an open-pit excavator. **Conclusions.** The proposed technology is used to specify the contours of rich and especially rich ores in the massif. Hydraulic hammers are used to break especially rich ores along the boundaries of the identified contour with a minimal regrading, increasing the extraction of useful components during the subsequent processing of valuable mineral raw materials

Keywords: especially rich ores, surfactants, softening, advanced mechanical mining, excavator, hydraulic hammer, productivity

For citation

Cheban A.Yu., Sekisov A.G. Improvement in the Technology for the Development of Complex Deposits Applying Combined Ore Extraction. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 3, pp. 35-44. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-3-35-44>

Введение

Месторождения руд благородных и цветных металлов преимущественно имеют сложную структуру с высокой изменчивостью содержаний полезных компонентов в массиве [1, 2]. Разработка сложноструктурных месторождений без обеспечения необходимого уровня селекции при выемке руд различных сортов приводит к существенному перемешиванию сортов и разубоживанию, что в дальнейшем ведет к увеличению затрат на обогащение и снижению сквозного извлечения полезных компонентов [3-5]. В настоящее время одним из основных направлений повышения эффективности горного производства является комплексное освоение недр с приме-

нием малоотходных, энергоэффективных и ресурсосберегающих технологий [6, 7]. При этом разработка сложноструктурных массивов должна вестись с выделением выемочных блоков, пригодных к отработке по современным дифференцированным эксплуатационным кондициям, на основе совершенствования систем эксплуатационного опробования, управления запасами и качеством минерального сырья, технологиями его селективной выемки, а также глубокой переработки [1, 8]. Для месторождений штокеркового типа характерны длиннопериодные колебания содержания основного полезного компонента в добываемой руде, что необходимо учитывать при обосновании оптимального варианта режима горных работ [8, 9].

Изменение содержания полезного компонента в руде влияет на эффективность процесса обогащения флотационным методом. С повышением содержания увеличивается извлечение металлов в концентрат, однако после достижения оптимальных параметров процесса обогащения дальнейшее повышение содержания не дает существенного эффекта, в то же время снижение содержания ниже оптимального значения ведет к относительно резкому падению извлечения. Так, при переработке комплексных руд Кальмакырского месторождения рост содержания меди в рудной массе с 2,5 до 3% приводит к увеличению извлечения с 83 до 85%, а снижение содержания с 2,5 до 2,0% ведет к уменьшению извлечения меди в концентрат с 83 до 79,5% [9]. При переработке медно-никелевых руд Талнахского месторождения рост содержания никеля в рудной массе с 2 до 3% приводит к увеличению извлечения с 72 до 76%, а снижение содержания с 2 до 1% ведет к уменьшению извлечения никеля в концентрат с 72 до 56% [10]. Таким образом, прирост извлечения в первом случае не компенсирует потери в последующем. Следовательно, может быть целесообразным использование части руд с относительно высоким содержанием полезного компонента для подшихтовки руд, имеющих содержание полезного компонента ниже оптимального значения с целью увеличения суммарного выхода металла по всем сортам руд.

Существенное влияние на полноту извлечения металлов при переработке руд оказывает изменчивость содержания металла в руде. Так, при переработке руд Кальмакырского месторождения с содержанием металла в руде 2% при увеличении среднеквадратичного отклонения содержания с 0,1 до 0,2% извлечение меди в концентрат снижалось на 2,1% [9]. При уменьшении изменчивости содержания никеля с 0,1 до 0,01% в рудной массе рудника «Заполярный» извлечение никеля в концентрат возрастало с 65 до 78% [11]. Очевидно, что наибольшая изменчивость содержания будет появляться при перемешивании богатых и особо богатых руд с рядовыми, что приведет к нестабильному качеству потока руды и снижению общего извлечения металла. Особо большая изменчивость содержания характерна для золоторудных месторождений. Так, согласно данным работы [12], на участке одного из золоторудных месторождений особо богатые и богатые руды со средним содержанием металла 50,83 и 26,05 г/т, при объеме в блоке 1,54 и 6,75% содержат 17,51 и 30,76% металла соответственно, при этом среднее со-

держание металла в рядовой и бедной руде составляет 4,47 и 1,22 г/т соответственно. Таким образом, селективная выемка различных сортов руд должна обеспечивать уменьшение изменчивости содержания металла в рудной массе как в случае ее последующего усреднения, так и при переработке разных сортов руд по отдельным технологиям.

Обеспечить повышение качества селекции при разработке месторождений позволяют безвзрывные технологии с применением механических средств выемки. В настоящее время развитие горного оборудования позволяет вести эффективную массовую выемку все более прочных горных пород без их предварительного взрывного рыхления [13, 14]. Так, карьерные комбайны, рыхлительные агрегаты, одноковшовые экскаваторы со специальным рабочим оборудованием в виде гидромолотов, гидрорипперов, скальных ковшей и др. позволяют вести разработку плотных, полускальных и легко разрабатываемых скальных горных пород с прочностью на одноосное сжатие до 600-1000 кг/см² [15, 16]. При работе с более прочными породами эффективность механической выемки существенно снижается, в результате чего предпочтительнее становятся технологические схемы с применением взрывного рыхления массива.

Для снижения негативного воздействия взрыва при разработке сложноструктурных месторождений ценного минерального сырья предлагаются комбинированные технологические схемы с применением локальной механической выемки особо богатых руд и взрывного рыхления остального массива [5, 17]. В работе [17] предлагается при выявлении в ходе сопровождающей разведки зон особо богатых руд производить их выбуривание с применением бурового агрегата, при этом для повышения производительности возможна заливка в скважины раствора поверхностно-активных веществ (ПАВ) с целью разупрочнения зоны особо богатых руд. Зоны богатых руд обустраиваются шпурами или скважинами малого диаметра по сгущенной сети для получения мелкокусковой рудной массы, а оставшаяся часть выемочного блока, сложенная рядовыми и бедными рудами, а также пустыми породами подготавливается к взрывному рыхлению с использованием взрывных скважин и их сетки с обычными параметрами. Добытая селективно особо богатая руда может быть направлена на автоклавное выщелачивание, которое обеспечит наиболее высокие показатели извлечения металла. Технология, представленная в

работе [17], имеет ряд недостатков. Во-первых, оконтуривание зон богатых и особо богатых руд ведется с учетом данных сопровождающей разведки по обычной сети взрывных скважин, отстоящих друг от друга на расстоянии 4-5 м, с усреднением содержания полезного компонента по всей высоте выемочного блока, в связи с относительно небольшими размерами данных зон построенные и фактические контуры как в плане, так и по глубине могут значительно различаться. Во-вторых, в процессе механической выемки буровым агрегатом расширение скважины производится с получением выработки круглой формы, которая может несоответствовать реальным контурам зоны особо богатых руд, что не позволит селективно извлечь весь объем особо богатой руды. В-третьих, заливка раствора ПАВ во взрывные скважины, расположенные на значительном расстоянии друг от друга, не обеспечивает достаточно равномерного и интенсивного разупрочнения массива, кроме того, в научной литературе практически отсутствуют данные по результатам разупрочнения растворами ПАВ относительно прочных руд, в связи с чем трудно оценить возможность их эффективного механического извлечения.

Целью данного исследования является совершенствование технологии комбинированной разработки сложноструктурных рудных месторождений путем уточнения контуров зон богатых и особо богатых руд, подбора комплекта оборудования для обеспечения их качественной селективной выемки, а также обоснования эффективности дезинтеграции относительно прочных руд растворами ПАВ.

Разупрочнение горных пород

Способ разупрочнения горных пород с применением растворов ПАВ заключается в предварительной обработке (пропитке) массива через формируемые выработки (скважины, шпуры, щели). Молекулы ПАВ адсорбируются на поверхности разрушаемой породы, понижая поверхностную энергию и оказывая влияние на ее механические характеристики. Известны исследования по применению растворов ПАВ для разупрочнения различных горных пород преимущественно полускальных и легко разрабатываемых скальных, таких как кимберлиты, конгломераты, песчаники, аргиллиты, известняки и др. [14, 18]. Так, на Талдинском угольном месторождении при пропитке массива раствором ПАВ через сеть скважин $1,3 \times 1,3$ м в течение двух суток прочность на сжатие снизилась у аргиллитов и алевролитов с 90 до

70 МПа, а у мелкозернистых песчаников – с 93 до 60 МПа [14]. Разупрочненные вскрышные породы предлагалось разрабатывать с помощью карьерных комбайнов типа КСМ. Исследования по разупрочнению кимберлитов растворами ПАВ показали снижение прочности на сжатие примерно на 50%, что позволяет существенно повысить эффективность их механической разработки горными комбайнами или гидравлическими экскаваторами [18]. Недостатком предлагаемых технологий является необходимость бурения специальной сгущенной сети скважин для пропитки массива раствором ПАВ. Анализ научно-технической литературы показал, что в настоящее время предварительному разупрочнению с применением растворов ПАВ подвергаются преимущественно легко разрабатываемые скальные породы с прочностью на одноосное сжатие 500-1000 кг/см² для повышения производительности последующей массовой механической выемки. Металлорудные месторождения преимущественно сложены скальными породами средней трудности разрушения (кварциты, порфириды, березиты и др.) и трудноразрушаемыми скальными породами (андезитовые порфириды, роговики, скарны окремненные и др.). Поэтому их массовое механическое рыхление при нынешнем развитии технических средств даже после предварительного разупрочнения невозможно с требуемой производительностью и экономически нецелесообразно в сравнении с взрывным рыхлением. Однако локальная механическая глубокоселективная выемка особо богатых руд в связи с высокой ценностью минерального сырья может быть приемлема, несмотря на относительно невысокую производительность.

Для обоснования возможности реализации безвзрывной технологии разработки скальных пород средней трудности разрушения были проведены экспериментальные исследования по разупрочнению золотосодержащих руд одного из месторождений Забайкальского края с определением прочности образцов на одноосное сжатие и растяжение. Цилиндрические образцы выпиливались из геологоразведочных кернов диаметром 63 мм. С целью получения надежных значений для каждой из горных пород делались выборки по 16-20 образцов, половина из которых оставлялась в естественном состоянии, а другая половина пропитывалась раствором ПАВ в течение двух суток. Предел прочности пород на одноосное сжатие определялся в соответствии с ГОСТ 21153.2-84, а на одноосное растяжение – в соответствии с ГОСТ 21153.3-85. Эксперимен-

тальные исследования проводились с применением оборудования Центра коллективного пользования по исследованию минерального сырья Института горного дела ДВО РАН. Для определения прочности пород при одноосном сжатии использовалась испытательная машина Topi-РАСТ II (Германия), между стальными плитами которой устанавливались цилиндрические образцы, нагружаемые с равномерной скоростью 3 МПа/с. Испытание на одноосное растяжение проводилось на установке TopiNORM (Германия) с размещением образцов между сферическими инденторами и последующим равномерным нагружением, равным 1 кН/с. Обработка результатов испытаний выборки образцов включала в себя вычисление среднего арифметического значения предела прочности, среднего квадратического отклонения и коэффициента вариации. Результаты экспериментальных исследований по определению прочности горных пород представлены в **таблице**.

Обработка образцов руд раствором ПАВ привела к существенному снижению их прочностных характеристик. Так, прочность на одноосное сжатие кварц-гидрослюдистых метасоматитов, березитов, хлоритов снизилась на 42,3, 32,4 и 21,2% соответственно. А прочность на одноосное растяжение кварц-гидрослюдистых метасоматитов, березитов, хлоритов снизилась на 40,8, 32,7 и 26,4% соответственно. Наименьшее изменение прочностных свойств было выявлено у роговиков с уменьшением прочности на одноосное сжатие на 12,9% и на одноосное растяжение – на 2,2%.

В настоящее время гидравлические молоты используются в различных отраслях производства, в том числе при ведении горных работ для рыхления массивов и дробления негабаритов. Учитывая необходимость разрушения относительно больших объемов пород, в горном производстве применяются тяжелые гидравлические молоты, устанавливаемые на экскаваторы с вме-

стимостью ковша от 1,5 м³ и более. Так, тяжелый гидравлический молот НР 5000 фирмы INDECO (Италия) имеет энергию удара 5000 Дж, массу – 3150 кг, длину – 2,93 м, диаметр рабочего инструмента – 0,16 м и может устанавливаться на экскаваторы массой более 27 т [19]. Производительность гидравлических молотов зависит от прочности горных пород, а также от вида выполняемых работ. Наибольшую производительность экскаватор с гидравлическим молотом развивает при дроблении негабарита (вторичное дробление), а наименьшую – при проходке траншей (**рис. 1**).

Так, производительность гидравлического молота НР 5000 при рыхлении массива (первичное дробление), сложенного горными породами с прочностью на сжатие 1000 кг/см², составляет примерно 260 м³ за восьмичасовую смену, а при отрывке траншеи – около 110 м³/см. При снижении прочности разрабатываемого массива производительность гидравлического молота существенно возрастает. Если с учетом данных экспериментальных исследований прочность березитов на одноосное сжатие при обработке их раствором ПАВ снизится с 1380 кг/см² в естественном состоянии до 932 кг/см², то производительность экскаватора с гидравлическим молотом НР 5000 при проходке траншеи увеличится с 55 до 120 м³/см, то есть в 2,18 раза. При снижении прочности хлоритов с 1013 до 798 кг/см² производительность данного оборудования ориентировочно увеличится со 103 до 160 м³/см, то есть в 1,55 раза. При снижении прочности кварц-гидрослюдистых метасоматитов с 1101 до 635 кг/см² можно ожидать роста производительности с 82 до 235 м³/см, то есть в 2,87 раза. Укрупненные технико-экономические расчеты показывают, что обеспечение такого существенного роста производительности экскаватора с гидравлическим молотом позволит вести экономически эффективную механическую выемку особо богатых и богатых руд.

Таблица. Экспериментальные данные по определению прочности горных пород, кг/см²
Table. Experimental data to determine the strength of rocks, kg/cm²

Горная порода	Прочность при одноосном сжатии		Прочность при одноосном растяжении	
	в естественном состоянии	после обработки раствором ПАВ	в естественном состоянии	после обработки раствором ПАВ
Роговики	1844	1605	56,1	54,9
Березиты	1380	932	51,3	37,6
Хлориты	1013	798	57,4	38,7
Кварц-гидрослюдистые метасоматиты	1101	635	62,4	36,9

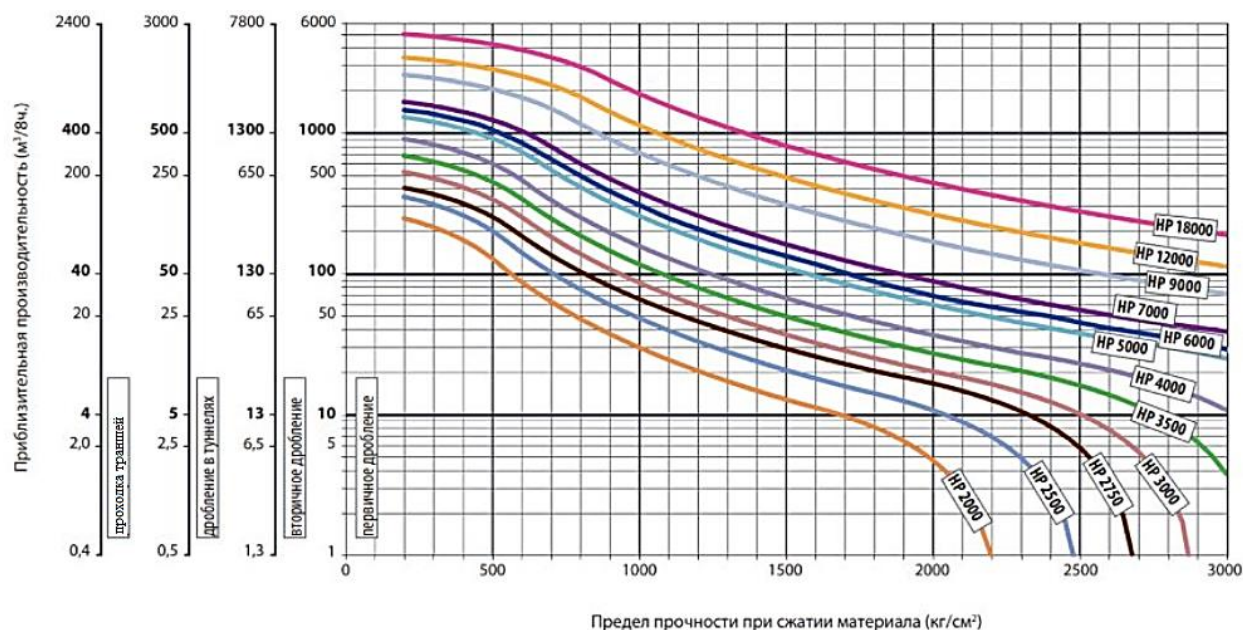


Рис. 1. Графики зависимости производительности гидравлических молотов фирмы INDECO от прочности материала на сжатие для различных видов работ [19]

Fig. 1. Graphs of the performance of INDECO hydraulic hammers against compressive strength of the material for various types of work [19]

С учетом высокой прочности роговиков и незначительного снижения их прочности при обработке раствором ПАВ можно ожидать роста производительности с 28 до 38 м³/см, в связи с чем экономически целесообразным будет ведение механической выемки только особо богатых руд.

Результаты исследования

Институтом горного дела ДВО РАН предлагается усовершенствованная технология разработки сложноструктурных месторождений с применением комбинированной выемки, обеспечивающая повышение точности оконтуривания и увеличение полноты извлечения особо богатых руд. Буровой установкой 1 (рис. 2) ведется формирование сети взрывных скважин 2 с одновременной сопровождающей разведкой, в результате которой выявляются зоны особо богатых, богатых, рядовых, бедных и особо бедных руд, а также пустых пород.

При выявлении зон с высоким содержанием полезного компонента осуществляется вторая стадия сопровождающей разведки со сгущением сети скважин 3 меньшего диаметра с поинтервальным опробованием бурового материала. На основании данных второй стадии сопровождающей разведки производится оконтуривание включений богатых и особо богатых руд в плане и по вертикали. Полученная сгущенная сеть скважин 3 в дальнейшем используется для про-

питки массива раствором ПАВ, подаваемым из автоцистерны 4. Таким образом, пробуренные скважины 3 малого диаметра имеют двойное назначение. Опережающее рыхление и выемку локальных участков особо богатых руд предлагается осуществлять гидравлическим экскаватором 5, оснащенным сменным оборудованием в виде гидравлического молота 6 и гидравлического грейфера 7. Применение гидравлического молота 6 позволит вести разработку массива в соответствии с фактическими контурами зон особо богатых руд, что уменьшит перемешивание сортов и в последующем снизит изменчивость содержания полезного компонента в рудной массе. После разрыхления слоя руды гидравлический молот 6 посредством специального быстросъемного адаптера заменяется на гидравлический грейфер 7, которым осуществляется черпание рудной массы из полученной выработки 8. Использование гидравлического грейфера 7 обеспечит возможность извлечения разрыхленной рудной массы в стесненных условиях при выемке зон особо богатых руд небольшого объема. В случае обеспечения приемлемых технико-экономических показателей работы гидравлического молота 6 возможно его применение для выемки богатых руд, также предварительно разупрочненных с применением раствора ПАВ. В случае если использование гидравлического молота 6 на выемке богатых руд экономически неэффективно,

осуществляется дифференцированная взрывная подготовка массива. В зоне богатых руд заряды ВВ размещаются в сгущенной сети скважин 3, в результате чего при взрыве получается более равномерная проработка руды с обеспечением меньшего размера кусков рудной массы, при этом ранее полученная выработка 8 используется в качестве компенсационной полости. Для оставшейся части массива используются взрывные скважины 2 и их сеть с обычными параметрами. Руды и породы взорванного массива селективно извлекаются карьерным гидравлическим экскаватором 9 с погрузкой в автосамосвалы.

Особо богатые руды могут быть переработаны с использованием дорогостоящих способов, например с применением автоклавного выщелачивания, что позволит получить наиболее высокие показатели извлечения металла [20]. Отходы обогащения особо богатых руд имеют достаточно высокое содержание полезного компонента для

обеспечения их рентабельной вторичной переработки. Богатые руды могут перерабатываться отдельно либо подшихтовываться к рядовой руде для обеспечения оптимального содержания полезного компонента в рудной массе, поступающей на обогатительную фабрику. Бедные руды направляются на кучное выщелачивание. В случае если для некондиционных (особо бедных) руд после взрывания характерно образование рудной мелочи с повышенным содержанием полезного компонента, то возможно выделять такую обогащенную рудную мелочь из рудной массы и направлять ее на кучное выщелачивание. Отделение обогащенной рудной мелочи, в частности, может осуществляться карьерным экскаватором 9 с просеивающим ковшем непосредственно во время ведения выемочно-погрузочного процесса с направлением рудной мелочи посредством системы пневмотранспортирования в бункер 10 специального транспортного средства [21].

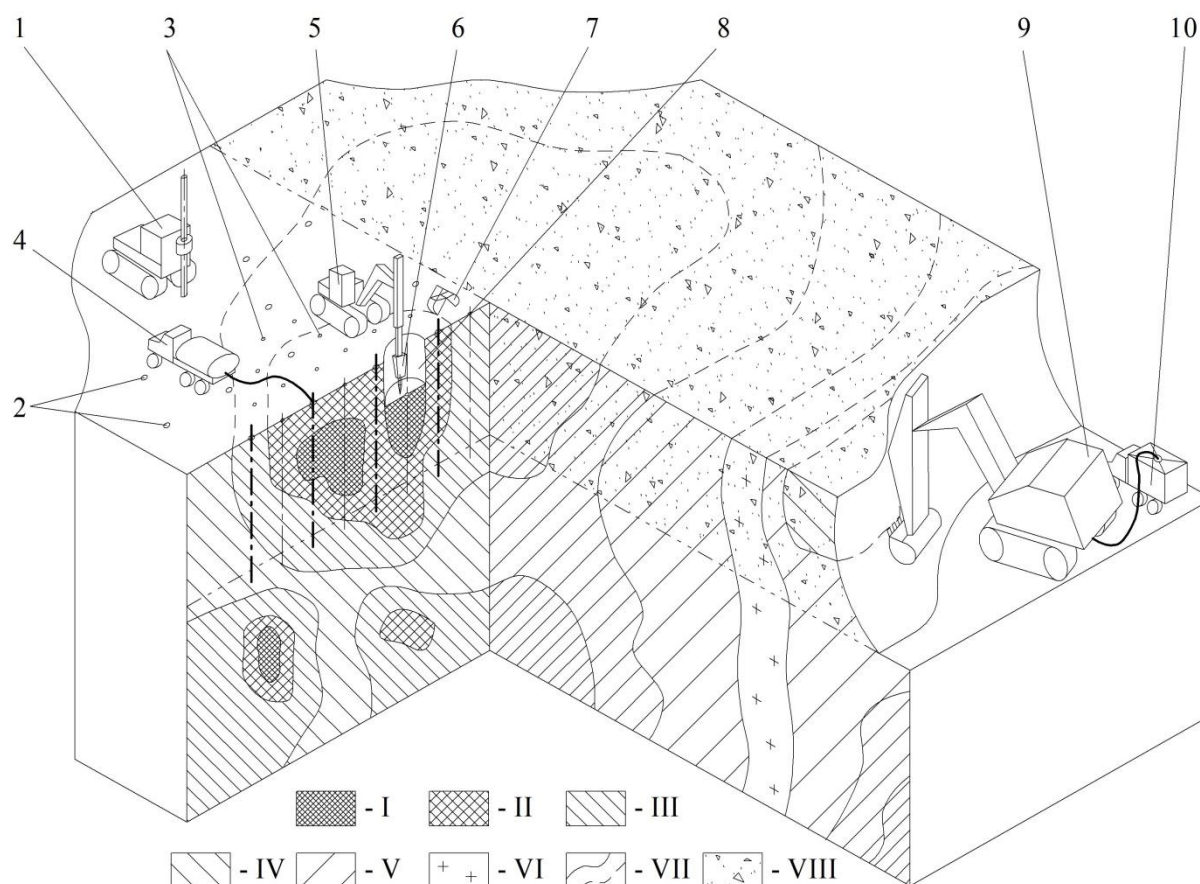


Рис. 2. Схема комбинированной отработки сложноструктурного рудного тела штокверкового типа: I – особо богатая руда; II – богатая руда; III – рядовая руда; IV – бедная руда; V – особо бедная руда; VI – пустые породы; VII – контуры сортов руд; VIII – взорванные руда и порода

Fig. 2. Chart of combined mining of a stockwork type complex ore body: I is especially rich ore; II is rich ore; III is run-of-mine ore; IV is poor ore; V is especially poor ore; VI is waste rocks; VII is contours of ore grades; VIII is exploded ore and rock

Выводы

Экспериментальные исследования по пропитке образцов скальных пород средней трудности разрушения раствором ПАВ показали снижение их прочности на одноосное сжатие на 21-42% и на одноосное растяжение на 26-41%, при этом наибольший эффект достигнут при разупрочнении кварц-гидрослюдистых метасоматитов. Существенное снижение прочностных характеристик руд за счет пропитки раствором ПАВ позволяет перевести их в класс легкоразрушаемых скальных пород. После предварительного разупрочнения данных горных пород возможно ожидать повышения производительности экскаватора, оснащенного гидравлическим молотом, в 1,55-2,87 раза, что позволит вести экономически эффективную механическую выемку не только особо богатых руд, но также и богатых руд. Экспериментальные исследования по разупрочнению раствором ПАВ роговиков, относящихся к трудноразрушаемым скальным породам, не дали существенных положительных результатов, в связи с чем для данных пород можно рекомендовать лишь локальную механическую выемку зон особо богатых руд после их предварительного разупрочнения. Предлагаемая усовершенствованная технология разработки сложноструктурных месторождений позволяет уточнять контуры особо богатых и богатых руд посредством сгущения сети скважин малого диаметра при выявлении зон с высоким содержанием полезного компонента, в дальнейшем данные скважины используются для разупрочнения горного массива путем заполнения их раствором ПАВ. Гидравлический молот обеспечивает отбойку особо богатых руд по границам выявленного контура с минимизацией перемешивания сортов, что увеличит извлечение полезных компонентов при последующей переработке ценного минерального сырья, а использование гидравлического грейфера позволяет вести выемку разрыхленной рудной массы в стесненных условиях.

Список источников

1. Батугин С.А., Черный Е.Д. Теоретические основы опробования и оценки запасов месторождений. Новосибирск: Наука. Сиб. предприятие РАН, 1998. 344 с.
2. Espinoza R.D., Rojo J. Towards sustainable mining (Part I): Valuing investment opportunities in the mining sector // *Resources Policy*. 2017. Vol. 52. P. 7-18.
3. Adams M.D. Gold Ore Processing: Project Development and Operations. Amsterdam: Elsevier, 2016. 980 p.
4. Jarvie-Eggart M.E. Responsible Mining: Case Studies in Managing Social & Environmental Risks in the Developed World. Colorado: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2015, 804 p.
5. Sekisov G.V., Cheban A.Y. Low-waste mining technology for structurally complex deposits with mixed-type process flows of ore extraction and processing // *Journal of Mining Science*. 2021. Vol. 57. No. 6. P. 978-985.
6. Trubetskoy K.N., Galchenko Y.P., Shuklin A.S. Experimental research of physical processes in selective extraction of ores and rocks in flat lode mining // *Journal of Mining Science*. 2018. Vol. 54. No 2. P. 248-253.
7. Чебан А.Ю. Совершенствование геотехнологии выемки тонких рудных тел с применением стрелового комбайна // *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2020. №1. С. 340-348.
8. Menabde M., Froyland G., Stone P., Yeates, G. Mining schedule optimization for conditionally simulated orebodies // *Orebody Modeling and Strategic Mine Planning, Spectrum Series*. 2007. P. 91-100.
9. Юматов Б.П., Секисов Г.В., Буянов М.И. Нормирование и планирование полноты и качества выемки руды на карьерах. М.: Недра, 1987. 183 с.
10. Кожиев Х.Х. Укрупненный расчет эффективности управления качеством руды // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2006. №8. С. 29-30.
11. Ломоносов Г.Г., Туртыгина Н.А. Влияние класса крупности медно-никелевого рудного сырья и его изменчивости на показатели обогащения // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2015. №3. С. 104-107.
12. Бабич И.Н. Новые возможности оценки контрастности руд в недрах // *Рациональное освоение недр*. 2020. №6. С. 38-46.
13. Ocak I., Seker S.E., Rostami J. Performance prediction of impact hammer using ensemble machine learning techniques // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2018. Vol. 80. P. 269-276.
14. Перспективы расширения сферы применения безвзрывных технологий в открытой угольной добыче / Ю.И. Анистратов, Р.М. Штейнцга, Г.Я. Воронков, А.Г. Кузнецов, П.Р. Хаспеков // *Горная промышленность*. 1998. №2. С. 14-19.
15. Чебан А.Ю. Способ подготовки прочных горных пород к выемке при ведении строительных и добычных работ // *Механизация строительства*. 2017. №9. С. 20-23.
16. Mohd Im. Variation of production with time, cutting tool and fuel consumption of surface miner 2200 SM 3.8 // *International Journal of Technical Research and Applications*. 2016. No 1. P. 224-226.
17. Чебан А.Ю., Секисов Г.В. Обоснование использования комбинированной подготовки к селективной выемке руд сложноструктурных месторождений // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2020. Т.18. №3. С. 4-12.
18. Шоболова Л.П., Коворова В.В. О создании комбинированной технологии разработки кимберлитов с применением жидких и газообразных ПАВ // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2000. №1. С. 178-179.

19. INDECO. Производительность гидромолота (20.06.2022). Режим доступа: <https://indecorus.ru/podderzhka/kak-opredelit-proizvoditelnost-gidromolota-m3-v-chas/>
 20. Sekisov A., Rasskazova A. Assessment of the possibility of hydrometallurgical processing of low-grade ores in the oxidation zone of the Malmyzh Cu-Au porphyry deposit // Minerals. 2021. T.11. №1. С. 1-11.
 21. Чеван А.Ю., Секисов А.Г. Карьерный экскаватор с рабочим оборудованием для отделения обогащенной рудной мелочи // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т.18. №1. С. 16-22.
- ### References
1. Batugin S.A., Cherny E.D. *Teoreticheskie osnovy oprobovaniya i otsenki zapasov mestorozhdenii* [Theoretical bases of testing and evaluating reserves of deposits]. Novosibirsk: Science. Siberian Enterprise, the Russian Academy of Sciences, 1998, 344 p. (In Russ.)
 2. Espinoza R.D., Rojo J. Towards sustainable mining (Part I): Valuing investment opportunities in the mining sector. Resources Policy, 52, 7-18 (2017).
 3. Adams M.D. Gold ore processing: Project development and operations. Amsterdam: Elsevier, 2016, 980 p.
 4. Jarvie-Eggart M.E. Responsible mining: Case studies in managing social & environmental risks in the developed world. Colorado: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2015, 804 p.
 5. Sekisov G.V., Cheban A.Y. Low-waste mining technology for structurally complex deposits with mixed-type process flows of ore extraction and processing. Journal of Mining Science, 57, 6, 978-985 (2021).
 6. Trubetskoy K.N., Galchenko Y.P., Shuklin A.S. Experimental research of physical processes in selective extraction of ores and rocks in flat lode mining. Journal of Mining Science, 54, 2, 248-253 (2018).
 7. Cheban A.Yu. Improving geotechnology of extraction of narrow ore bodies, using a roadheader. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Nauki o Zemle* [Izvestiya of Tula State University. Earth Science Series], 2020, no. 1, pp. 340-348. (In Russ.)
 8. Menabde M., Froyland G., Stone P., Yeates G. Mining schedule optimization for conditionally simulated orebodies. Orebody Modeling and Strategic Mine Planning, Spectrum Series, 91-100 (2007).
 9. Yumatov B.P., Sekisov G.V., Buyanov M.I. *Normirovanie i planirovanie polnoty i kachestva vyemki rudy na karerakh* [Rationing and planning of the completeness and quality of ore extraction in quarries]. Moscow: Nedra, 1987, 183 p. (In Russ.)
 10. Kozhiev Kh.Kh. Consolidated calculation of the efficiency of ore quality management. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Information and Analytical Bulletin], 2006, no. 8, pp. 29-30. (In Russ.)
 11. Lomonosov G.G., Turtygina N.A. Influence of a coarse-grained copper-nickel ore raw materials class and its changeability upon the beneficiation indicators. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Information and Analytical Bulletin], 2015, no. 3, pp. 104-107. (In Russ.)
 12. Babich I.N. New opportunities for evaluating ore contrasts in the interior part of the Earth. *Ratsionalnoe osvoenie neдр* [Mineral Mining & Conservation], 2020, no. 6, pp. 38-46. (In Russ.)
 13. Ocak I., Seker S.E., Rostami J. Performance prediction of impact hammer using ensemble machine learning techniques. Tunnelling and Underground Space Technology, 80, 269-276 (2018).
 14. Anistratov Yu.I., Steintsag R.M., Voronkov G.Ya., Kuznetsov A.G., Khaspekov P.R. Prospects for expanding the scope of application of blastless technologies in open-pit coal mining. *Gornaya promyshlennost* [Mining Industry], 1998, no. 2, pp. 14-19. (In Russ.)
 15. Cheban A.Yu. The way of preparation of strong rocks to the excavation during construction and mining operations. *Mekhanizatsiya stroitelstva* [Construction Mechanization], 2017, no. 9, pp. 20-23. (In Russ.)
 16. Mohd Im. Variation of production with time, cutting tool and fuel consumption of surface miner 2200 SM 3.8. International Journal of Technical Research and Applications, 1, 224-226 (2016).
 17. Cheban A.Yu., Sekisov G.V. Rationale for the use of a combined preparation for selective extraction of ores from complex structure deposits. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2020, vol. 18, no. 3, pp. 4-12. (In Russ.)
 18. Shobolova L.P., Kovorova V.V. On the creation of a combined technology for the development of kimberlites using liquid and gaseous surfactants. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Information and Analytical Bulletin], 2000, no. 1, pp. 178-179. (In Russ.)
 19. INDECO. Hydraulic hammer performance. Available at: <https://indecorus.ru/podderzhka/kak-opredelit-proizvoditelnost-gidromolota-m3-v-chas/> (Accessed on June 20, 2022)
 20. Sekisov A., Rasskazova A. Assessment of the possibility of hydrometallurgical processing of low-grade ores in the oxidation zone of the Malmyzh Cu-Au porphyry deposit. Minerals, 11, 1, 1-11 (2021).
 21. Cheban A.Yu., Sekisov A.G. Mining excavator with the capability to separate concentrated ore fines. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2020, vol. 18, no. 1, pp. 16-22. (In Russ.)

Поступила 01.07.2022; принята к публикации 01.09.2022; опубликована 26.09.2022

Submitted 01/07/2022; revised 01/09/2022; published 26/09/2022

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

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

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

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

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

УДК 622.281.742

DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-3-45-53



ОЦЕНКА РИСКОВ КРЕПЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ВЫРАБОТОК ФРИКЦИОННОЙ АНКЕРНОЙ КРЕПЬЮ

Зубков А.А.¹, Калмыков В.Н.², Кульсаитов Р.В.², Кутлубаев И.М.², Неугомонов С.С.¹,
Туркин И.С.¹

¹ ООО «УралЭнергоРесурс», Магнитогорск, Россия

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

Аннотация. Актуальность работы. Современной тенденцией крепления горных выработок является использование анкеров с фрикционным способом закрепления. Для недропользователей России это относительно новая технология, успешно развиваемая с 2008 года ООО «УралЭнергоРесурс». Возрастающее число производителей такого типа анкеров определило необходимость отразить риски, сопряженные с их конструктивными особенностями. На основе анализа факторов, воздействующих на детали анкера, определены требования к основным характеристикам. **Постановка задачи.** На этапе выбора марки стали для стержня анкера основными параметрами являются предел текучести σ_T и коэффициент относительного удлинения δ . Требование к параметру δ непосредственно следуют из особенности его закрепления. Наиболее предпочтительны значения, обеспечивающие приближение предела текучести σ_T к временному сопротивлению σ_B . Исходя из экономической целесообразности, значение коэффициента относительного удлинения материала стержня должно быть менее 25%. **Новизна.** Нагрузки с закрепляемой поверхности выработки воспринимаются стержнем анкера через упор, выполняемый на его концевой части. В настоящее время упором служит кольцо, привариваемое к стержню анкера. При этом в зоне сварного шва прочностные характеристики стержня резко снижаются вследствие структурных изменений металла. Качественное повышение нагрузочной способности упора достигается за счет формирования его непосредственно из материала стержня. **Результат.** Использование нового способа формирования упора обеспечивает увеличение нагрузочной способности до значений, сопоставимых с нагрузочной способностью стержня анкера. Для обеспечения сохранения несущей способности в течение длительного периода в условиях постоянного воздействия агрессивной шахтной среды следует использовать полимерные защитные покрытия. **Практическая значимость.** Выполнение совокупности решений – критерий выбора марки стали для стержня, формирование упора из материала стержня, нанесение защитных полимерных покрытий – обеспечивают снижение риска потери функциональных свойств анкерной крепи с фрикционным способом закрепления.

Ключевые слова: анкерная крепь, стержень анкера, упор, коррозионная стойкость, профиль стержня

© Зубков А.А., Калмыков В.Н., Кульсаитов Р.В., Кутлубаев И.М., Неугомонов С.С., Туркин И.С., 2022

Для цитирования

Оценка рисков крепления поверхностей выработок фрикционной анкерной крепью / Зубков А.А., Калмыков В.Н., Кульсаитов Р.В., Кутлубаев И.М., Неугомонов С.С., Туркин И.С. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №3. С. 45-53. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-3-45-53>



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

RISK ASSESSMENT OF SUPPORTING SURFACES OF WORKINGS WITH FRICTION ROOF BOLTING

Zubkov A.A.¹, Kalmykov V.N.², Kulsaitov R.V.², Kutlubaev I.M.², Neugomonov S.S.¹, Turkin I.S.¹

¹ UralEnergResurs LLC, Magnitogorsk, Russia

² Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Relevance. The modern trend for supporting mine workings is the use of anchors with a frictional method of fastening. As for operators of subsurface resources in Russia, this is a relatively new technology that has been successfully developed since 2008 by UralEnergResurs LLC. An increasing number of manufacturers of such type of anchors have determined the need for describing the risks associated with their design features. Having analyzed the factors influencing the anchor parts, the authors determined requirements for main characteristics. **Problem Statement.** At the stage of choosing the steel grade for bolt shafts, the main parameters are yield strength σ_T and coefficient of relative elongation δ . The requirement for parameter δ follows directly from a special feature of its installation. The most preferable values provide the approximation of yield strength σ_T to ultimate tensile strength σ_B . Based on economic feasibility, the value of the coefficient of relative elongation of the shaft material should be less than 25%. **Originality.** Loads from the reinforced surface of the working are perceived by the bolt shaft through the fixed stop on its end part. Currently, the stop is a ring welded to the bolt shaft. At the same time, strength characteristics of the shaft sharply decrease in the weld zone due to structural changes in steel. A qualitative increase in the load capacity of the stop is achieved by forming it directly from the material of the shaft. **Result.** The use of a new method of forming the stop provides an increase in the load capacity to values comparable to the load capacity of the bolt shaft. To maintain the bearing capacity for a long period in constant exposure to aggressive mine environment, polymer protective coatings should be used. **Practical Relevance.** A set of implemented solutions, such as meeting the criterion for choosing a steel grade for the shaft, shaping a stop from the material of the shaft, and applying polymer protective coatings, reduces the risk of losing functional properties of the friction roof bolting.

Keywords: roof bolting, bolt shaft, stop, corrosion resistance, shaft profile

For citation

Zubkov A.A., Kalmykov V.N., Kulsaitov R.V., Kutlubaev I.M., Neugomonov S.S., Turkin I.S. Risk Assessment of Supporting Surfaces of Workings with Friction Roof Bolting. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 3, pp. 45-53. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-3-45-53>

Введение

Обеспечение устойчивости пород в горной выработке определяется горно-геологическими условиями и видом принятой крепи [1, 2]. Надежность системы «горный массив – крепь» зависит от конструктивных особенностей и параметров крепи, определяющих её несущую способность.

На практике для крепления поверхности выработок используется комбинированный способ на основе анкеров, подхватов (затяжек) и набрызгбетона. При этом эксплуатационные свойства крепи зависят в первую очередь от технических характеристик анкера.

Основные конструктивные особенности и требования к анкерным крепям установлены в ГОСТ 31559 – 2012. В 2016 году специалистами ООО «УралЭнергоРесурс» были разработаны «Изменения № 1», определившие требования к анкерам с фрикционным закреплением. С этого

момента анкеры данного типа получили официальный статус на территории РФ. В частности, были регламентированы численные требования к его несущей способности – не менее 50 кН.

Следует отметить, что в настоящее время ряд недропользователей в паспортах крепления закладывают большие значения – до 100 кН [3]. Для обеспечения требуемого значения следует определить и задавать параметры, характеризующие составляющие детали анкера. Их соблюдение на стадии изготовления позволит снизить риски аварийного выхода всей крепи при её эксплуатации.

Принцип работы анкера с фрикционным закреплением заключается в создании на поверхности контакта его цилиндрической поверхности и стенки шпура распределенного давления. В анкерах типа Split Set такое давление обеспечивается за счет упругой деформации трубчатого цилиндрического стержня с продольным пазом по всей длине и внешним диаметром, превыша-

ющим диаметр шпура. Непосредственное взаимодействие с закрепляемой поверхностью осуществляется через опорную плиту, положение которой на стержне анкера фиксируется через упор, выполненный на его концевой части [4].

Риски, возникающие на этапе заявления характеристик фрикционного анкера. Выбор механических характеристик стержня анкера

Надежное функционирование анкерной крепи с фрикционным способом закрепления определяется соответствием нагрузочных характеристик каждого из его элементов заданной несущей способности и их сохранением в течение всего гарантийного срока.

Параметрами, определяющими эксплуатационные возможности анкерной крепи с фрикционным закреплением, являются толщина стенки, антикоррозионная защита, нагрузочная способность упора для опорной плиты.

Толщина стенки определяется исходя из прочностных характеристик металла стержня анкера и заданной несущей способности. При ее

выборе следует выполнять оценку одновременно по показателям временного сопротивления σ_B и пределу текучести σ_T . При этом параметр σ_T является преобладающим. Его значения могут быть низкими даже при высоких значениях σ_B , что характерно при высокой величине относительного удлинения. Развитие пластической деформации ведет к снижению нормального давления на стенки шпура и далее силы трения на поверхности контакта, что определяет снижение несущей способности крепи.

Снижение рисков, обусловленных выбором материала для изготовления стержня анкера, достигается использованием марок, обладающих пониженным коэффициентом относительного удлинения. При этом значения σ_T приближаются к параметру σ_B . Этим объясняется назначение фирмой Kinross Gold Corporation технических характеристик материалов, используемых для крепления горных выработок на территории РФ (табл. 1, 2).

Таблица 1. Технические характеристики фрикционных анкерных болтов диаметром 39 и 46 мм (DSI, 2008)
Table 1. Specifications for 39 and 46 mm friction rock bolts (DSI, 2008)

Технические характеристики	Диаметр болтов		
	33 мм	39 мм	46 мм
Типовой предел сопротивления разрыву, кН (метрических тонн)	107 (10,9)	110 (11,2)	178 (18,14)
Минимальный предел сопротивления разрыву, кН (метрических тонн)	71 (7,24)	89 (9,07)	133 (13,61)
Рекомендуемое исходное тяговое усилие, кН (метрических тонн)	От 27 до 53 (от 2,72 до 5,44)	44,2 (4,5)	От 53 до 89 (от 5,44 до 9,07)
Предельная осевая деформация	Типовая 16%		

Таблица 2. Технические характеристики фрикционных анкерных болтов диаметром 47 мм (Fero Strata, 2012)
Table 2. Specifications for 47 mm friction rock bolts (Fero Strata, 2012)

Технические характеристики	Минимальные	Типовые
Предел текучести, МПа	350	450
Усилие текучести, метрических тонн	12,3	15,98
Предельная прочность на разрыв, МПа	460	520
Предельное усилие растяжения, метрических тонн	16,1	18,2
Относительное удлинение при разрыве образца 80 мм, %	20	—

Тенденция к уменьшению толщины стенки стержня определяет необходимость использования сталей с более высоким пределом текучести. При толщине стенки стержня 2,3-2,5 мм предпочтительно использовать стали с σ_T более 400 МПа. Последующее снижение толщины стенки, используемое некоторыми производителями, должно сопровождаться пропорциональным увеличением предела текучести. В противном случае риски разрыва стержня возрастают.

Решения при выборе конструктивных элементов анкера

Несущая способность фрикционного анкера определяется нагрузочной способностью самого слабого его элемента – упора для опорной плиты. В конструкциях с приварным кольцом, за счет совершенствования режимов сварки, обеспечена нагрузочная способность до 92-98 кН. Специальный комбинированный вариант выполнения упора, часть которого формируется при установке из материала анкера, обеспечивает повышение нагрузочной способности до 120-125 кН [5, 6]. Вместе с тем эти значения меньше допускаемых нагрузок на стержень анкера (табл. 3). Дальнейшее повышение нагрузочной способности упора и снижение рисков потери целостности анкера обеспечивается за счет перехода к варианту со штампованным упором из материала стержня (рис. 1) [7].

Таблица 3. Нагрузочная способность штампованного варианта опорного узла на стержне диаметром 48 мм и толщиной стенки 3 мм

Table 3. Load capacity of the stamped option of the support unit on a shaft with a diameter of 48 mm and a wall thickness of 3 mm

Опорный узел	Номер образца	Максимальная нагрузка	
		Н	т
Штампованный	1	125813,0	12,8
	2	130566,0	13,3
	3	127163,0	13,0
	4	128419,0	13,1
	5	131597,0	13,4
	6	131991,0	13,5
	7	137850,0	14,1
	8	123319,0	12,6
	9	137719,0	14,1



Рис. 1. Образцы штампованных вариантов упора до испытаний

Fig. 1. Samples of stamped options of the stop before testing

Исследования нагрузочной способности упора были выполнены на оборудовании в лаборатории механических испытаний ФГБОУ «МГТУ им. Г.И. Носова» на комплексе AG-IS/1/IC/EZ Graph. Результаты испытаний представлены в табл. 3.

Полученные значения превышают аналогичные значения для варианта с приварным кольцом на 28-35% и на 10-13% – со специальным вариантом. Соответственно, снижаются и риски разрушения упора. В дополнение следует отметить, что в отличие от вариантов с приварным упором происходит не разрыв металла по месту сварки, а его деформация. При этом величина смещения опорного узла при этом составляет 8-10 мм [8].

Выбор технологических решений, обеспечивающих коррозионную защиту анкера

Обязательным условием длительного и безопасного использования анкерной крепи фрикционного типа в соответствии с ГОСТ 31559-2012 является наличие на её поверхности надежной антикоррозионной защиты. Требования к типу и технологии нанесения защитных покрытий определяются условиями эксплуатации крепей и нормируются СП 28.13330.2017, ГОСТ 15150-69, 9.104-79, 9.410-88, 9.401-91, 9.402-2004, 9.602-2016.

Особенность конструкции анкера фрикционного типа определяет преимущественное развитие коррозии по внутренней поверхности стержня. Ее интенсивность зависит от качества нанесения защитного покрытия и его сохранности после установки анкера в шпур. Риски, обусловленные коррозией, следует оценивать по показателям толщины и сплошности покрытия в исходном состоянии, с сохранением их после установки. Первый показатель определяется технологией и материалом наносимого покрытия. В настоящее время достаточно широко используется технология электростатического напыления. В связи с этим были выполнены исследования зависимости толщины и сплошности покрытия для возможных вариантов выполнения стержня анкера.

Покрyтия наносились на стержни с С- и W-профилем поперечного сечения стержня. С-профиль был взят из серийно выпускаемой партии ООО «УралЭнергоРесурс».

На поверхности стержней анкера, предварительно обезжиренных и очищенных от пыли и ржавчины, наносили покрытие методом электростатического напыления ручными установками GEMA (Швейцария). Установка позволяет получать покрытие толщиной 80-300 мкм.

На стержень самозакрепляющегося анкера

(СЗА) с С-образным профилем и пазом шириной 21-23 мм обеспечивалось нанесение равномерно-эпоксиполиэфирного покрытия по всей внутренней и внешней поверхности толщиной от 33 до 120 мкм (рис. 2, табл. 4).

Для испытания возможности нанесения покрытия на W-профиль были специально изготовлены образцы в соответствии с параметрами, отраженными в публикации производителя (рис. 3) [9]. В стержне с W-профилем ширина паза составляла 5 мм (рис. 4). Результаты испытаний представлены в табл. 5.



Рис. 2. Фрагмент стержня анкера с С-профилем: а – до нанесения покрытия; б – после нанесения; в – положение точек замера толщины покрытия

Fig. 2. Fragment of the C-shaped bolt shaft: а is before coating; б is after coating; в is coating thickness measurement points

Таблица 4. Результаты нанесения эпоксиполиэфирного покрытия на С-образный профиль

Table 4. Results of applying an epoxy-polyester coating on the C-shaped profile

Диаметр анкера и толщина стенки	Вид покрытия	Толщина покрытия в зонах, мкм					
		Внешнее			Внутреннее		
		А	Б	В	А	Б	В
СЗА $d = 48$ мм, $s = 3$ мм	Эпоксиполиэфирное	115	120	119	33	102	44



Рис. 3. Образцы анкера с W-формой поперечного сечения

Fig. 3. Samples of rock bolts with the W-shaped cross-section



Рис. 4. Фрагмент стержня анкера с W-профилем: а – до нанесения покрытия; б – после нанесения; в – положение точек замера толщины

Fig 4. Fragment of the W-shaped bolt shaft: a is before coating; б is after coating; в is coating thickness measurement points

Таблица 5. Результаты нанесения эпокси-полиэфирного покрытия на W-образный профиль

Table 5. Results of applying an epoxy-polyester coating on the W-shaped profile

Диаметр анкера и толщина стенки	Вид покрытия	Толщина покрытия в зонах, мкм					
		Внешнее			Внутреннее		
		А	Б	В	А	Б	В
СЗА $d = 48$ мм, $s = 3$ мм	Эпокси-полиэфирное	83	199	85	4	12	3

Наименьшая толщина покрытия в 3 мкм была зарегистрирована на внутренней поверхности в зонах А и В (рис. 4, в).

Полученный результат объясняется двумя факторами:

- форма профиля создает «теневые» зоны (зоны А и В);
- проявление «эффекта клетки Фарадея».

Нанесение сплошного покрытия на стержни анкера независимо от формы поперечного сечения возможно при использовании более современных технологий, основанных на использовании полимерных покрытий.

В горных выработках основным видом являются электрохимическое и биологическое коррозионное воздействие грунтов в условиях длительного контакта с минерализованными водами различной кислотности. В этих условиях эффективным способом защиты является нанесение толстослойного (более 0,3 мм) покрытия из полимерного материала. Такое покрытие обладает комплексом защитных свойств: химически стойким, гидроизолирующим, электроизоляционным, эластичным в сравнении с лакокрасочным покрытием.

Для защиты поверхностей анкерных крепей полимерные покрытия до недавнего времени не

применялись из-за отсутствия российских производителей полиолефиновых композиций с высокой адгезией к стали. В настоящее время ряд предприятий освоил производство специальных адгезивных добавок – компатибилизаторов («совместителей»). Это позволило реализовать технологию нанесения полиэтилена высокой плотности с хорошей адгезией к стали (более 150 Н/см). Специальная композиция, адаптированная к маркам стали стержня, разработана в ООО «УралЭнергоРесурс».

При проведении исследований механических свойств композиции определялась прочность при растяжении, относительное удлинение при разрыве, стойкость к коррозии в водных средах с повышенной кислотностью ($pH = 1$), щелочностью ($pH = 13$) и суммарным содержанием хлоридов и сульфатов 100 г/л. После выдержки в указанных растворах в течение 7 дней образцы стержней исследовали на прочность и удлинение при разрыве. Полученные результаты представлены в табл. 6.

Нанесение покрытий на стержни выполнялось на специальной технологической линии, запущенной в 2019 году. Реализованная в ней технология обеспечивает получение равномерных полимерных покрытий толщиной 400-500 мкм

(рис. 5, табл. 7), в том числе и на стержнях со штампованным упором (рис. 6).

Для оценки воздействия атмосферы на покрытие были выполнены испытания стержней анкеров. Партия из десяти анкеров была помещена на годичное хранение на «открытом воздухе» с амплитудой температур от -30 до $+25^{\circ}\text{C}$. При внешнем осмотре поверхности проявления коррозии не зафиксировано. При этом сохранились и адгезионные свойства в пределах $138-144$ Н/см. Это позволяет говорить об обеспечении сохранности внутренней поверхности стержня анкера, подверженной наибольшему воздействию шахтной атмосферы.

Сохранность покрытия на внешней поверхности выполнялась только по косвенным показателям на закрепленных участках, где имело место частичное обнажение стержня.

Таблица 6. Прочностные свойства полиэтиленовой композиции

Table 6. Strength properties of the polyethylene composition

Показатель	Условия и результат испытаний			
	До обработки	pH = 1	pH = 13	Раствор солей
Прочность при растяжении, МПа	13,2	12,8	13,0	13,0
Относительное удлинение при разрыве, %	540	532	537	538

а



б

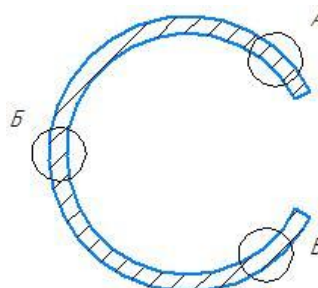


Рис. 5. Фрагмент стержня анкера с С-профилем: а – после нанесения покрытия; б – положение точек замера толщины покрытия

Fig. 5. Fragment of the C-shaped bolt shaft: а is after coating; б is coating thickness measurement points

Таблица 7. Результаты нанесения полимерного покрытия на С-образный профиль

Table 7. Results of applying a polymer coating on the C-shaped profile

Диаметр анкера и толщина стенки	Вид покрытия	Толщина покрытия в точках, мкм					
		Внешнее			Внутреннее		
		А	Б	В	А	Б	В
СЗА $d = 48$ мм, $s = 3$ мм	Полимер низкого давления	470	500	550	500	528	520
СЗА $d = 46$ мм, $s = 2,5$ мм	Полимер низкого давления	500	510	520	500	530	505



Рис. 6. Образцы стержней анкера с покрытием из полимера низкого давления

Fig. 6. Samples of rock bolts coated with low pressure polymer

Заключение

По результатам работы были сформулированы следующие выводы:

1. Снижение рисков выхода из строя анкеров с фрикционным закреплением достигается за счет выбора материала стержня с более высоким пределом текучести и относительным удлинением менее 25%.

2. Основным фактором, обеспечивающим несущую способность фрикционного анкера, является нагрузочная способность упора, выполняемого на стержне и взаимодействующего с опорной плитой. Наиболее предпочтительно упор выполнять штамповкой из материала стержня.

3. Для защиты поверхности деталей анкера от коррозии следует формировать полимерное покрытие толщиной от 300 до 500 мкм.

Список источников

1. Еременко В.А., Разумов Е.А., Заятдинов Д.Ф. Современные технологии анкерного крепления // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2012. № 12. С. 38-45.
2. Лушников В.Н. и др. Крепление горных выработок в условиях деформируемых и удароопасных массивов горных пород // Горный журнал. 2014. № 4. С. 37-44.
3. Совершенствование конструкции и технологии установки крепей с фрикционным закреплением / А.А. Зубков, А.В. Зубков, И.М. Кутлубаев, В.В. Латкин // Горный журнал. 2016. № 5. С. 48-52.
4. Зубков А.А. и др. Обоснование характеристик анкерных крепей фрикционного типа // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2019. № 10. С. 35-43.
5. Пат. 95029 РФ. Анкерная крепь / А.А. Зубков, А.Е. Зубков; заявл. 25.06.2009; опубл. 10.06.2010. Бюл. № 16.
6. Зубков А.А. и др. Оценка влияния конструктивных параметров фрикционного анкера на его несущую способность // Комбинированная геотехнология: переход к новому технологическому укладу: матер. X Междунар. науч.-практ. конф. / под ред. В.Н. Калмыкова, М.В. Рыльниковой. Магнитогорск, 2019. С. 99.

7. Пат. 201514 РФ. Фрикционный анкер / А.А. Зубков, И.М. Кутлубаев; заявл. 21.07.2020; опубл. 18.12.2020. Бюл. № 35.
8. Совершенствование конструкции и технологии установки крепей с фрикционным закреплением / А.А. Зубков, П.В. Волков, И.М. Кутлубаев, С.С. Неугомонов // Горный журнал. 2022. № 1. С. 92-96.
9. ООО «ОКС-ТРЕЙД»: Фрикционный анкер нового поколения // Горная промышленность. № 6. 2017. С. 54.

References

1. Eremenko V.A., Razumov E.A., Zayatdinov D.F. Modern bolting technologies. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Information and Analytical Bulletin], 2012, no. 12, pp. 38-45. (In Russ.)
2. Lushnikov V.N. et al. Supporting of mine workings in conditions of deformable and bump hazardous rock massifs. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal], 2014, no. 4, pp. 37-44. (In Russ.)
3. Zubkov A.A., Zubkov A.V., Kutlubaev I.M., Latkin V.V. Improving the design and technology of installation of friction bolts. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal], 2016, no. 5, pp. 48-52. (In Russ.)
4. Zubkov A.A. et al. Providing a rationale for specifications of friction bolts. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tehnicheskiy zhurnal)* [Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)], 2019, no. 10, pp. 35-43. (In Russ.)
5. Zubkov A.A., Zubkov A.E. *Ankernaya krep* [Rock bolt]. Patent RU, no. 95029, 2009.
6. Zubkov A.A. et al. Assessing the influence of the design parameters of a friction bolt on its bearing capacity. *Kombinirovannaya geotekhnologiya: perekhod k novomu tekhnologicheskomu ukladu* [Combined Geotechnology: Transition to a New Technological Paradigm. Proceedings of the conference]. Magnitogorsk, 2019, p. 99. (In Russ.)
7. Zubkov A.A., Kutlubaev I.M. *Friktsionnyi anker* [Friction bolt]. Patent RU, no. 201514, 2020.
8. Zubkov A.A., Volkov P.V., Kutlubaev I.M., Neugomonov S.S. Improving the design and technology of installing friction bolts. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal], 2022, no. 1, pp. 92-96. (In Russ.)
9. LLC OKS-TRADE: A friction bolt of a new generation. *Gornaya promyshlennost* [Mining Industry], 2017, no. 6, p. 54. (In Russ.)

Поступила 08.06.2022; принята к публикации 10.07.2022; опубликована 26.09.2022
Submitted 08/06/2022; revised 10/07/2022; published 26/09/2022

Зубков Антон Анатольевич – кандидат технических наук, генеральный директор, ООО «УралЭнергоРесурс», Магнитогорск, Россия.

Калмыков Вячеслав Николаевич – доктор технических наук, профессор, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.

Кульсаитов Равиль Вадимович – кандидат технических наук, доцент, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.

Кутлубаев Ильдар Мухаметович – доктор технических наук, профессор,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: ptmr74@mail.ru

Неугомонов Сергей Сергеевич – кандидат технических наук, технический директор,
ООО «УралЭнергоРесурс», Магнитогорск, Россия.

Туркин Иван Сергеевич – кандидат технических наук, заместитель генерального директора
по перспективному развитию, ООО «УралЭнергоРесурс», Магнитогорск, Россия.

Anton A. Zubkov – PhD (Eng.), General Director,
UralEnergoResurs LLC, Magnitogorsk, Russia.

Vyacheslav N. Kalmykov – DrSc (Eng.), Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Ravil V. Kulsaitov – PhD (Eng.), Associate Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Ildar M. Kutlubaev – DrSc (Eng.), Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: ptmr74@mail.ru

Sergey S. Neugomonov – PhD (Eng.), Technical Director,
UralEnergoResurs LLC, Magnitogorsk, Russia.

Ivan S. Turkin – PhD (Eng.), Deputy General Director for Long-Term Development,
UralEnergoResurs LLC, Magnitogorsk, Russia.

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

УДК 622.232.8

DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-3-54-63



МЕТОДОЛОГИЯ ОБОСНОВАНИЯ ГОРНОТРАНСПОРТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ РУДНЫХ КАРЬЕРОВ

Кузнецов Д.В., Косолапов А.И.

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Анализ открытых горных работ в современных условиях показывает непрерывное совершенствование карьерного оборудования. При этом технологические особенности разработки месторождений почти не ограничивают его мощность и энерговооруженность. Вместе с тем такое развитие связано с усложнением условий разработки, ростом глубины карьеров, сокращением площади рабочего пространства, перемещением вектора производства в районы с неблагоприятными климатическими факторами. С учетом этого определение оптимальной модели оборудования достаточно затруднено. **Используемые методы.** Применены аналитический обзор, численные расчеты, сопоставительная оценка. **Новизна.** Представлены результаты исследований по обоснованию подхода и критериев для выбора структуры технологического комплекса карьерного оборудования, включающего буровой станок, гидравлический или электрический экскаватор по типу «механическая лопата», автосамосвалы и прочее вспомогательное оборудование. **Результат.** Установлено, что основой для выбора оптимальных условий их эксплуатации является оценка динамики производительности экскаваторов и автосамосвалов в зависимости от периода года и срока эксплуатации, прочностных характеристик пород, типоразмеров, количества ковшей, загружаемых экскаватором в автосамосвал, расстояния перевозок, организационных простоев во времени цикла работы с учетом влияния климата. Показаны экономические критерии для выбора оптимального сочетания экскаватора и автосамосвала в комплексе. Доказано, что удельные накопленные затраты на приобретение и эксплуатацию оборудования комплекса за срок эксплуатации экскаватора экономически характеризуют обстоятельства перехода денежных средств в состояние горной массы, экскавируемой из массива и перемещаемой на определенное расстояние. **Практическая значимость.** На примере некоторых моделей гидравлических и электрических экскаваторов, имеющих различный нормативный период эксплуатации и технические характеристики, выполнена сравнительная оценка в сопоставимых условиях. При этом определены оптимальные условия их эксплуатации в сочетании с автосамосвалами.

Ключевые слова: комплексы горнотранспортного оборудования, электрический экскаватор по типу «механическая лопата», гидравлический экскаватор, автосамосвал, срок службы карьерной техники, карьер, добыча руды

© Кузнецов Д.В., Косолапов А.И., 2022

Для цитирования

Кузнецов Д.В., Косолапов А.И. Методология обоснования горнотранспортного оборудования для рудных карьеров // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №3. С. 54-63. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-3-54-63>



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

METHODOLOGY FOR JUSTIFYING THE SELECTION OF MINING AND CONVEYOR EQUIPMENT FOR ORE QUARRIES

Kuznetsov D.V., Kosolapov A.I.

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The analysis of open-cast mining in modern conditions shows continuous improvement of quarry equipment. Thus, technological features of development of deposits impose almost no limitations on its capacity and power-weight ratio. At the same time, such development is connected with more complicated conditions of mining, deeper quarries, less area of working space, and moving of mining to areas with unfavorable climatic factors. In view of this, it is quite difficult to determine an optimal model of equipment. **Methods Applied.** An analytical review, numerical calculations, comparative evaluation. **Originality.** The paper presents the research results providing a rationale for the approach and criteria for choosing a structure of the pit equipment technological complex, including a drilling rig, a hydraulic or electric excavator, a power shovel, dump trucks, and other auxiliary equipment. **Result.** It is stated that the basis of choosing optimal conditions of equipment operation is the assessment of production performance of excavators and dump trucks depending on the period of the year and a period of operation, rock strength characteristics, types and sizes, number of buckets loaded by excavators into dump trucks, transportation distance, administrative downtime during the operation cycle, taking into account climatic effect. The paper contains the economic criteria for choosing an optimal combination of an excavator and a dump truck. It is proved that specific accumulated costs of purchasing and operating the complex equipment during the life time of the excavator economically characterize the circumstances of transition of monetary funds into the rock mass, which is excavated from the massif and transported at a certain distance. **Practical Relevance.** Some models of hydraulic and electric excavators, having various specified operation periods and technical characteristics, are used as an example for a comparative evaluation in comparable conditions with determined optimal conditions of their operation combined with dump trucks.

Keywords: mining and conveyor equipment complexes, electric excavator (power shovel), hydraulic excavator, dump truck, mining equipment life span, open pit, ore mining

For citation

Kuznetsov D.V., Kosolapov A.I. Methodology for Justifying the Selection of Mining and Conveyor Equipment for Ore Quarries. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Novosibirsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 3, pp. 54-63. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-3-54-63>

Введение

В современной практике открытой разработки рудных месторождений Севера карьерами основными выемочно-погрузочными машинами являются экскаваторы. Они системно образуют целые комплексы оборудования, в которых выступают ведущим звеном. Причем при сочетании как минимум со вторым звеном – транспортным или автосамосвалами [1, 2].

При этом модели сопряженных машин в комплексе можно различить по значению каких-либо параметров, например, по вместимости ковша экскаватора или грузоподъемности автосамосвалов.

Поэтому известно, что когда стоит задача о выборе оптимального варианта экскаватора для рудного карьера как наилучшего среди допустимых, в первую очередь она предполагает обоснование его определенного типоразмера во взаимосвязи с типоразмером колесного автосамо-

свала. Причем на современном этапе развития горного дела с учетом возможного применения гидравлических экскаваторов, обладающих возможностью оснащения рабочего оборудования типа «прямая лопата» и «обратная лопата» [3].

К основным горнотехническим и технологическим достоинствам гидравлических экскаваторов в сопоставимых условиях можно отнести: продолжительность рабочего цикла, возможность эксплуатации на рабочих площадках меньших размеров, лучшую адаптацию к свойствам и характеристикам экскавируемого горного массива, наполняемость ковша при черпании, условия для селективной выемки полезного ископаемого, более безопасные условия для экскавации твердых включений и негабаритных кусков в забое, возможность эффективного применения на вспомогательных работах в карьере и др.

Однако известно, что с учетом траектории движения ковша высота уступа, экскавируемого гидравлическим экскаватором, примерно на 70%

меньше, чем паспортная высота черпания. В условиях рудных карьеров Севера гидравлические экскаваторы имеют срок службы в 1,5-2 раза меньше, а эксплуатационные расходы почти в 2 раза выше, чем у электрических, что, главным образом, связано со стоимостью дизельного топлива [1].

Поэтому каждый выбор оптимального варианта экскаватора требует учета множества факторов применительно к условиям месторождений с обоснованием критериев оценки [4-6].

В настоящей статье, исходя из ранее выполненной классификации условий открытой разработки рудных месторождений [7, 8], авторами обобщены результаты подобных исследований. Предложен подход и критерии для выбора оптимального варианта структуры комплекса оборудования, включающего экскаватор, автосамосвалы, буровые станки и прочее вспомогательное оборудование.

Все численные расчеты справедливы для многообразия экскаваторов и автосамосвалов, представленных на рынке России для условий разработки рудных карьеров с суровым климатом при возможном колебании температуры воздуха, осадков и прочих неблагоприятных природных факторах [1, 9].

Комплексы карьерного оборудования

С учетом отмеченного рассмотрим общеизвестные определения комплекса карьерного оборудования, экскаваторно-автомобильного комплекса и горнотранспортного комплекса.

Комплекс карьерного оборудования – цепь взаимосвязанных машин и механизмов, обеспечивающих надежную и эффективную разработку и перемещение пород [10, 11].

Экскаваторно-автомобильный комплекс – совокупность машин, состоящая из погрузочного и транспортного средств (экскаваторов и автосамосвалов), связанных технологически и организационно между собой единым грузопотоком [12].

Горнотранспортный комплекс – комплекс горных и транспортных машин, обеспечивающих максимальную производительность основной (головной) машины (добычной или вскрышной) и осуществляющих производственный процесс, в котором выполняются все операции – от выемки (экскавации) до погрузки или отвалообразования [13].

С учетом этого основной машиной такого комплекса является экскаватор.

С позиций системного анализа его эксплуа-

тация зависит от характеристик экскавируемой и в дальнейшем транспортируемой горной массы, состояния забоя с его параметрами, высотных отметок, протяженности и состояния автодорог, влияния климата и прочих факторов.

Причем, объединяя работу экскаваторов и автосамосвалов, на карьере формируют технологические грузопотоки, которые могут быть вскрышные и добычные. Технологические потоки делят карьер на участки, где независимо работают горнотранспортные и экскаваторно-автомобильные комплексы.

Каждый грузопоток имеет свое направление и мощность, а его функционирование можно оценить формируемыми затратами на экскавацию и транспортирование горной массы [11].

Скорость подвигания забоев экскаватора

Характерными показателями для выбора экскаваторов в технологических грузопотоках являются их производительность и скорость подвигания забоев.

При соответствующей ширине заходки и суточной производительности экскаваторов скорость подвигания торцовых забоев V , м/сут, предложено определять по формуле

$$V = Q_{\text{э.сут}} / A / h, \quad (1)$$

где $Q_{\text{э.сут}}$ – суточная производительность экскаваторных комплексов оборудования, м³/сут; A – ширина заходки, м; h – высота уступа, м.

Время разработки блока панели t , сут, составляет

$$t = \frac{l}{V}, \quad (2)$$

где l – длина блока панели, м.

Так, по результатам численных исследований [8] установлено, что скорость подвигания забоев электрических и гидравлических экскаваторов мехлопат, рассчитанная по формуле (1), изменяется в широких пределах.

Для гидравлических экскаваторов при высоте уступа 5 м и вместимости ковша 5-10 м³ она в среднем составляет 18,0-43,3 м/сут, при высоте уступа 10 м и вместимости ковша 10-25 м³ около 16,4-52,3 м/сут, при высоте уступа 15 м и вместимости ковша 25-50 м³ около 19,8-47,5 м/сут. Скорость подвигания забоев электрических экскаваторов при высоте уступа 10 м и вместимости

ковша 5-12 м³ в среднем равна 9,2-28 м/сут, при высоте уступа 15 м и вместимости ковша 25-50 м равна 27,7-47,5 м/сут.

Отсюда можно заключить, что для конкретных параметров карьера и оборудования можно определить параметры экскаваторных забоев и с учетом производительности экскаваторов по технологическим грузопотокам рассчитать скорость их подвигания, обеспечивающую наибольшую эффективность разработки месторождения.

Производительность экскаватора

Вместе с тем в дополнение были выполнены исследования по оценке влияния основных факторов на динамику средней производительности экскаваторов.

При этом для определения среднесуточного значения эксплуатационной производительности экскаватора $Q_{э, \text{сут}}$, м³/сут, предложили использовать формулу

$$Q_{э, \text{сут}} = 3600 \cdot E \cdot T \cdot n / t_{ц} \cdot K_n / K_p \cdot K_{и.э}, \quad (3)$$

где E – вместимость ковша, м³; T – продолжительность смены, ч; n – количество рабочих смен в сутки, смен; $t_{ц}$ – паспортная продолжительность цикла экскавации, с; K_n – коэффициент наполнения ковша, д.ед; K_p – коэффициент разрыхления горных пород в ковше, д.ед; $K_{и.э}$ – коэффициент использования экскаватора во времени на чистой работе.

В свою очередь, продолжительность цикла экскавации $t_{ц.э}$, с, необходимо определять с учетом последовательных операций – от наполнения ковша в забое до его разгрузки в автосамосвал:

$$t_{ц.э} = t_{ч} + t_{п} + t_{р} + t_{в}, \quad (4)$$

где $t_{ч}$ – время черпания, с; $t_{п}$ – время поворота к месту разгрузки, с; $t_{р}$ – время разгрузки ковша, с; $t_{в}$ – время возвращения ковша в забой, с.

Коэффициенты наполнения ковша и разрыхления пород в ковше предопределены характеристиками пород и для крепких пород качеством их подготовки к выемке взрыванием. В соответствии с нормативными данными [1, 11] для экскаваторов типа «механическая лопата» коэффициент наполнения ковша варьирует от 0,75 до 1,5, а коэффициент разрыхления пород в ковше – от 1,08 до 1,5.

Коэффициент $K_{и.э}$ учитывает использование экскаватора в течение суток на чистой работе. По рекомендациям [1, 11] при использовании автомобильного транспорта его значение следует принимать в интервале 0,75-0,85.

Для определения среднегодовой и среднемесячной эксплуатационной производительности экскаватора полученное по формуле (3) значение следует увеличивать на количество рабочих дней соответственно в году и месяце.

С учетом этого для любого оцениваемого периода времени эксплуатационную производительность экскаватора $Q_э$, м³, авторами предложено определять по формуле

$$Q_э = Q_{э, \text{max}} \cdot \left(\frac{1 - Y_{э1}}{100} \right) \cdot \left(\frac{1 - Y_{э2}}{100} \right) \times \\ \times \left(\frac{1 - Y_{э3}}{100} \right) \cdot \left(\frac{1 - Y_{э4}}{100} \right) \cdot \left(\frac{1 - Y_{э5}}{100} \right) \times \\ \times \left(\frac{1 - Y_{э6}}{100} \right) \cdot \left(\frac{1 - Y_{э7}}{100} \right), \quad (5)$$

где $Q_{э, \text{max}}$ – максимальная теоретическая производительность экскаватора, м³; $Y_{э1}$ – уровень снижения производительности экскаватора в зависимости от технической надежности в течение срока эксплуатации, %; $Y_{э2}$ – уровень снижения производительности экскаватора в зависимости от вместимости ковша и количества экскаваторных циклов (ковшей загружаемых в автосамосвал), %; $Y_{э3}$ – уровень снижения производительности экскаватора в зависимости от прочностных характеристик пород, %; $Y_{э4}$ – уровень снижения производительности экскаватора в зависимости от времени экскаваторного цикла, %; $Y_{э5}$ – уровень снижения производительности экскаватора в зависимости от времени обмена автосамосвалов в забое, %; $Y_{э6}$ – уровень снижения производительности экскаватора в зависимости от длины экскаваторного блока панели, %; $Y_{э7}$ – уровень снижения производительности экскаватора в зависимости от влияния сурового северного климата, %.

Полученные результаты исследований (табл. 1, 2) обобщены с учетом классификации месторождений [7, 8].

При этом максимальная теоретическая производительность экскаватора соответствует следующим условиям выемки и погрузки: первому году эксплуатации ($T_э = 1$ год); наименее прочным породам (с объемным весом $\gamma \leq 1,8$ т/м³); минимальному количеству ковшей, загружаемых в кузов автосамосвала ($k = 3$ ковша); наименьшему времени экскаваторного цикла ($t_{ц.э} = 20$ с); минимальной продолжительности обмена автосамосвалов в забое в схемах с двухсторонней погрузкой ($t_0 = 0$ мин); максимальной заданной длине экскаваторного блока панели ($L_э = 700$ м); наиболее благоприятному климатическому периоду (месяцу $M_э$).

Таблица 1. Динамика уровня снижения производительности гидравлического экскаватора мехлопаты в зависимости от различных показателей условий разработки, %

Table 1. Trend in the reduction in productivity of the hydraulic excavator (power shovel) depending on various indicators of mining conditions, %

Показатели	Значения					
T_3 , лет	1-3	3-5	5-8	8-10	–	–
Y_{31} , %	0-10	10-15	15-31	31-40	–	–
k , ковшей	3-4	4-5	5-6	6-7	–	–
Y_{32} , %	0-12	12-22	22-32	32-39	–	–
γ , т/м ³	1,8-2,4	2,4-2,9	2,9-3,3	3,3-3,5	–	–
Y_{33} , %	0-7	7-11	11-14	14-15	–	–
t , с	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50
Y_{34} , %	0-10	10-19	19-26	26-32	32-37	37-41
t_0 , мин	0-0,5	0,5-1	1-1,5	1,5-2	2-2,5	2,5-3
Y_{35} , %	0-18	18-30	30-39	39-46	46-51	51-55
L , м	700-600	600-500	500-400	400-300	–	–
Y_{36} , %	0-7	7-15	15-27	27-45	–	–
M_3	апрель-октябрь	март, ноябрь	декабрь-февраль	–	–	–
Y_{37} , %	0-20	20-30	30-40	–	–	–

Таблица 2. Динамика уровня снижения производительности электрического экскаватора мехлопаты в зависимости от различных показателей условий разработки, %

Table 2. Trend in the reduction in productivity of the electric excavator (power shovel) depending on various indicators of mining conditions, %

Показатели	Значения						
T_3 , лет	1-3	3-5	5-8	8-10	10-16	16-20	20-24
Y_{31} , %	0-5	5-7	7-17	17-21	21-38	38-50	50-58
k , ковшей	3-4	4-5	5-6	6-7	–	–	–
Y_{32} , %	0-16	16-26	26-34	34-43	–	–	–
γ , т/м ³	1,8-2,4	2,4-2,9	2,9-3,3	3,3-3,5	–	–	–
Y_{33} , %	0-7	7-11	11-14	14-15	–	–	–
t , с	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50	–
Y_{34} , %	0-10	10-19	19-26	26-32	32-37	37-41	–
t_0 , мин	0-0,5	0,5-1	1-1,5	1,5-2	2-2,5	2,5-3	–
Y_{35} , %	0-18	18-30	30-39	39-46	46-51	51-55	–
L_3 , м	700-600	600-500	500-400	400-300	–	–	–
Y_{36} , %	0-7	7-15	15-27	27-45	–	–	–
M_3	апрель-октябрь	март, ноябрь	декабрь-февраль	–	–	–	–
Y_{37} , %	0-10	10-15	15-20	–	–	–	–

Уровень снижения эксплуатационной производительности экскаватора представляет отношение его фактической производительности в оцениваемых условиях к максимальной теоретической.

Таким образом, основными факторами, определяющими динамику эксплуатационной произ-

водительности экскаваторов, являются срок эксплуатации и техническая надежность, прочностные характеристики пород, сочетание с автосамосвалами, организация работ, учитывающая время экскаваторного цикла и обмена автосамосвалов в забое, длина экскаваторных блоков панелей, характеристики климата.

Производительность автосамосвала

С целью оперативного прогнозирования производительности горно-транспортного и экскаваторно-автомобильного комплекса, включающего один гидравлический или электрический экскаватор и несколько автосамосвалов одной модели, приведенный подход по определению производительности экскаваторов был распространен и на автосамосвалы.

При этом системный учет факторов, определяющих производительность каждого автосамосвала в динамике развития открытых горных работ [14, 15], с учетом постоянного роста их глубины и усложнения транспортных схем карьеров [16], изменения при эксплуатации машин топлива или энергии [17-19], технической надежности и временного влияния сурового климата по различным периодам года [20, 21], перспективного применения роботизированных машин различных трансмиссий [22] потребовал установления дополнительных зависимостей.

Так, для системного учета факторов, определяющих годовую производительность автосамосвала $Q_{a, \text{год}}$, т/год, предложено использовать формулу

$$Q_{a, \text{год}} = \frac{q \cdot K_{\text{и.а}} \cdot T \cdot n \cdot N_{\text{а.дн}}}{0,5 \cdot (L_{\text{тр}} + L_{\text{п}}) / V_{\text{ср}} + t_0}, \quad (6)$$

где q – грузоподъемность автосамосвала, т; $K_{\text{и.а}}$ – коэффициент использования автосамосвала во времени на чистой работе; T – продолжительность смены, ч; n – число рабочих смен в сутки; $N_{\text{а.дн}}$ – число рабочих дней автосамосвала в году; $L_{\text{тр}}$ – среднегодовое расстояние транспортирования в грузовом направлении, км; $L_{\text{п}}$ – среднегодовое расстояние транспортирования в порожнем направлении, км; $V_{\text{ср}}$ – средняя техническая скорость движения автосамосвала, км/ч; t_0 – суммарная продолжительность простоев в течение транспортного цикла автосамосвала (загрузка, разгрузка, маневры), ч.

Соответственно, среднемесячная эксплуатационная производительность автосамосвала $Q_{a, \text{мес}}$, т/мес., составит

$$Q_{a, \text{мес}} = \frac{Q_{a, \text{год}}}{12}. \quad (7)$$

С учетом этого для любого оцениваемого периода времени эксплуатационную производи-

тельность автосамосвала Q_a , т, предложено определять по формуле

$$Q_a = Q_{a, \text{max}} \cdot \left(\frac{1 - Y_{a1}}{100} \right) \cdot \left(\frac{1 - Y_{a2}}{100} \right) \times \left(\frac{1 - Y_{a3}}{100} \right) \cdot \left(\frac{1 - Y_{a4}}{100} \right) \cdot \left(\frac{1 - Y_{a5}}{100} \right), \quad (8)$$

где $Q_{a, \text{max}}$ – максимальная теоретическая производительность автосамосвала, т; Y_{a1} – уровень снижения производительности автосамосвала в зависимости от технической надежности в течение срока эксплуатации, %; Y_{a2} – уровень снижения производительности автосамосвала в зависимости от расстояния транспортирования, %; Y_{a3} – уровень снижения производительности автосамосвала в зависимости от сопротивления движению, %; Y_{a4} – уровень снижения производительности автосамосвала в зависимости от простоев по организационным причинам, %; Y_{a5} – уровень снижения производительности автосамосвала в зависимости от влияния сурового северного климата, %.

Полученные результаты обобщены в численном виде (табл. 3).

Уровень снижения производительности автосамосвала представляет отношения его фактической производительности в оцениваемых условиях к максимальной теоретической.

В связи с этим транспортную работу автосамосвала для любого оцениваемого периода в технологическом грузопотоке A , т·км, можно рассчитать по выражению

$$A = Q_a \cdot L, \quad (9)$$

где L – расстояние транспортирования горной массы (руды и вскрыши) в периоде.

Таким образом, основными факторами, ограничивающими эксплуатационную производительность автосамосвалов при сочетании с экскаватором, являются срок эксплуатации и техническая надежность, схема организации погрузочно-разгрузочных работ, расстояние транспортирования, уклон и состояние автодорог, характеристики сурового северного климата.

Полученные результаты исследований показывают влияние этих факторов для возможных условий открытой разработки рудных месторождений.

Таблица 3. Динамика уровня снижения производительности автосамосвала в зависимости от различных показателей условий разработки, %

Table 3. Trend in the reduction in productivity of a dump truck depending on various indicators of mining conditions, %

Показатели	Значения					
T_a , лет	1-3	3-5	5-8	8-10	–	–
Y_{a1} , %	0-15	15-29	29-57	57-75	–	–
L , км	0,5-1	1-2	2-3	3-5	5-7	7-10
Y_{a2} , %	0-31	31-57	57-69	69-80	80-85	85-90
ω , %	2-4	4-6	6-8	8-12	12-16	16-20
Y_{a3} , %	0-9	9-14	14-17	17-21	21-23	23-25
t_o , мин	3-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30
Y_{a4} , %	0-28	28-61	61-70	70-77	77-81	81-84
M_a	май-октябрь	апрель, ноябрь	декабрь-март	–	–	–
Y_{a5} , %	0-10	10-15	15-20	–	–	–

Выбор модели экскаватора и автосамосвала

Для выбора оптимального варианта структуры технологического комплекса карьерного обораудования, включающего экскаватор, автосамосвалы, буровое, бульдозерное оборудование и оборудование механизации вспомогательных процессов предложено использовать удельные накопленные затраты за срок эксплуатации экскаватора P , руб./м³,

$$P = \frac{\sum_{t=1}^{T_3} (K_t + C_t - A_t - D_t) \cdot 1 / (1 + E)^t}{\sum_{t=1}^{T_3} Q_{\text{эт}}} \Rightarrow \min, \quad (10)$$

где T_3 – срок эксплуатации экскаватора, лет; t – расчетный год; K_t – инвестиции, руб./год; C_t – эксплуатационные затраты, руб./год; A_t – амортизационные отчисления оборудования, руб./год; D_t – остаточная стоимость оборудования, руб./год; E – норма дисконта, %; $Q_{\text{эт}}$ – производительность комплекса, базовой машиной у которого является экскаватор, м³/год.

Входящие в состав формулы (10) затраты и отчисления включают годовые значения по оцениваемому экскаватору, автосамосвалам, буровому и прочему вспомогательному оборудованию.

Следует отметить, что приведенный критерий не учитывает уровень формируемых доходов по годам эксплуатации машин. Однако вполне отражает условия их эксплуатации и

возможности работы в определенных породах, экономически характеризуя обстоятельства перехода денежных средств в состояние горной массы, экскавируемой из массива и перемещаемой на необходимое расстояние, дополнительно позволяет принимать решения при планировании горных работ [22, 23].

В качестве примера использования предлагаемой методики выполнена оценка вариантов горнотранспортных комплексов, включающих автосамосвалы Komatsu 830E и экскаваторы Komatsu 2800 XPC, PC 5500 D. По данным производителя нормативный срок эксплуатации экскаватора Komatsu 2800 XPC (тросовый) составляет 20 лет, а Komatsu PC 5500 D (дизель-гидравлический) – 10 лет. В течение этого периода уровень эксплуатационных затрат на ремонт и техническое обслуживание (как отношение к стоимости приобретения в первом году) изменяется скачкообразно (рис. 1, а-в). Это связано с периодичностью и затратами на проведение ремонтов и обслуживания.

При этом увеличение расстояния приводит к закупке дополнительных автосамосвалов. В варианте с гидравлическим экскаватором необходимо его повторное приобретение после десяти лет эксплуатации в связи с износом. Очевидно, что зависимость значений, вычисляемых по формуле (10) от времени работы экскаватора имеет гиперболический вид (рис. 1, г), и в условиях одного карьера во многом определена расстоянием перевозок.

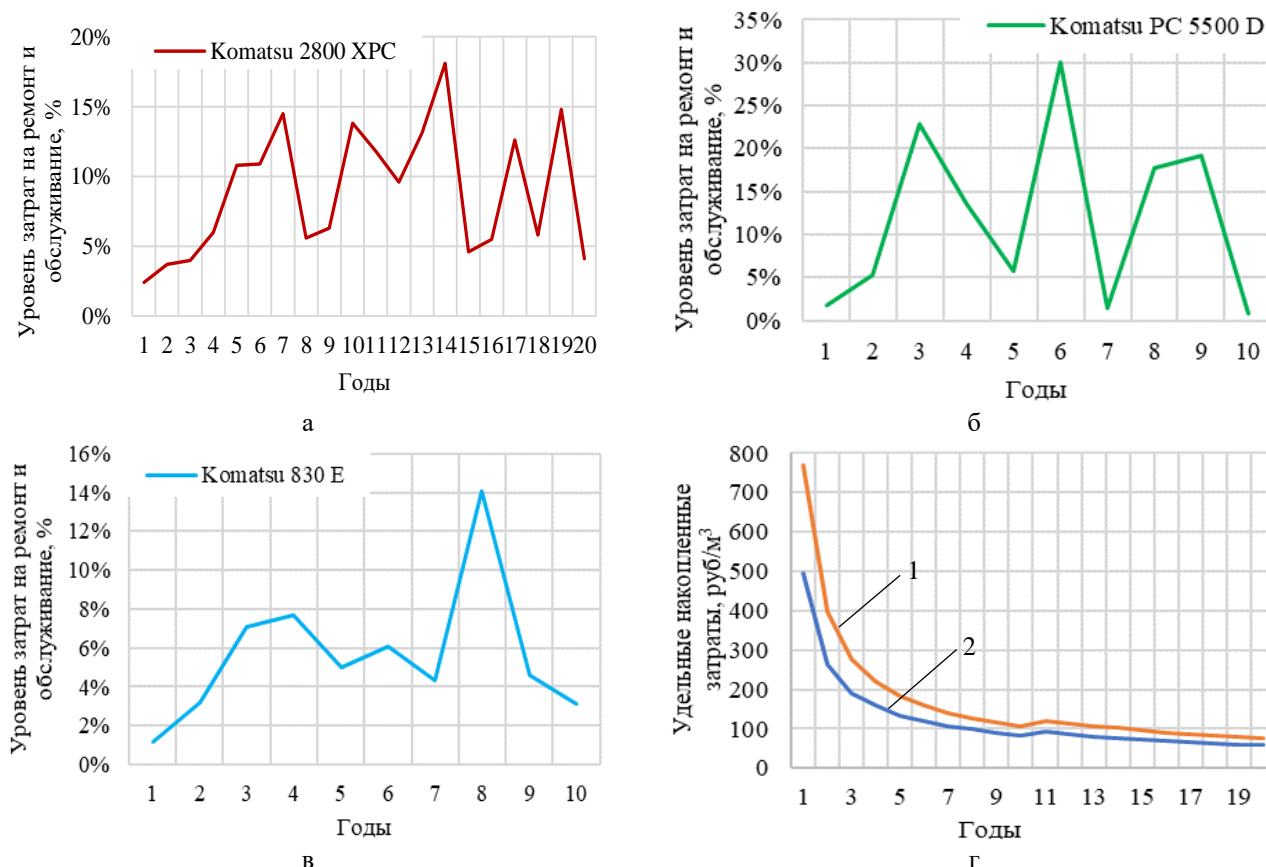


Рис. 1. Временная динамика: а, б, в – уровни эксплуатационных затрат на ремонт и техническое обслуживание экскаваторов Komatsu 2800 XPC, Komatsu PC 5500 D, автосамосвала Komatsu 830 E, отнесенная к его первоначальной стоимости; г – удельные накопленные затраты на приобретение и эксплуатацию экскаваторов Komatsu 2800XPC (кривая 1) и Komatsu PC 5500D (кривая 2) в комплексе с автосамосвалами Komatsu 830E при расстоянии транспортирования 9 км (кривая 1) и 5 км (кривая 2)

Fig. 1. Time trend: а, б, в are operating costs of repair and maintenance of Komatsu 2800 XPC, Komatsu PC 5500 D excavators, Komatsu 830 E dump truck, taken relative to the initial cost; г is accumulated costs per unit for purchasing and operating excavators (1 is Komatsu 2800XPC; 2 is Komatsu PC 5500D) combined with Komatsu 830E dump trucks at the transportation distance (1 is 9 km, 2 is 5 km)

Закключение

Таким образом, выбор экскаватора с канатным и гидравлическим перемещением ковша для сопоставительных условий карьеров Севера необходимо осуществлять в сочетании с автосамосвалами с учетом формируемых затрат, взаимосвязанных характеристик машин, параметров месторождений и климата. Приведенные критерии взаимосвязаны и дополняют друг друга. При этом направлены на оценку технического совершенства машин и расширение границ разработки месторождений.

Список источников

- Кузнецов Д.В., Косолапов А.И. Оптимизация параметров технологических комплексов рудных карьеров: монография. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2020. 188 с.
- Burt C.N., Caccetta L. Equipment Selection for Mining: With Case Studies. Cham: Springer International Publishing, 2018. 155 p.
- Сытенков В.Н. Сопоставительный выбор экскаваторов типа «механическая лопата» с канатным и гидравлическим перемещением рабочего органа // Горное дело. 2014. № 1. С. 14-22.
- Комленович Д. Многокритериальный подход к выбору горного оборудования // Горное дело. 2017. № 2. С. 10-19.
- Kumykov T.M., Kumykov V.K. Method of Shaping Loading-and-Transportation System in Deep Open Pit Complex Ore Mines. // J. Vin. Sci. 2018. No. 53. Pp. 708-717. DOI: 10.1134/S1062739117042702.
- Kolesnikov V., Katsubin A., Martyanov V., Dopr A. Features of the Excavation and Loading Equipment of Various Types in the Development of Inclined and Steep Beds. E3S Web of Conferences, 2019, no. 105, pp. 1-5. DOI: 10.1051/e3sconf/201910501023.

7. Kuznetsov D.V., Kosolapov A.I. Economic and technological aspects of interrelation between open pit depth and mining transport parameters. *Izvestia vysshikh uchebnykh zavadenii. Gornyi zhurnal*. 2020, no. 3, pp. 87-95. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-3-87-95.
8. Kuznetsov D.V., Kosolapov A.I. Research of the influence of the excavating and automotive equipment complexes parameters on the speed of faces advance // *Earth and Environmental Science*. 2021. No. 626. Pp. 1-6. DOI: 10.1088/1755-1315/626/1/012020.
9. Подэрни Р.Ю. Мировой рынок поставок современного выемочно-погрузочного оборудования для открытых горных работ // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2015. № 2. С. 148-167.
10. Ржевский В.В. Открытые горные работы. Производственные процессы. М.: Либроком, 2010. 512 с.
11. Ржевский В.В. Открытые горные работы. Технология и комплексная механизация. М.: Либроком, 2010. 551 с.
12. Кулешов А.А. Мощные экскаваторно-автомобильные комплексы. М.: Недра, 1980. 317 с.
13. Горное дело: Терминологический словарь / К.Н. Трубецкой, Д.Р. Каплунов и др. М.: ИПКОН РАН, 2016. 635 с.
14. Журавлев А.Г. Вопросы оптимизации параметров транспортных систем карьеров // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020. № 3-1. С. 583-601. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-583-601.
15. Koptev V.Yu. Justification of choosing an effective model of a dump truck // *Modern Engineering and Technology*. 2014. No. 5. Pp. 23-25.
16. Parhizkar A. Location theory applied to optimize the position of road exit(s) in open pit mining (case study). // *Arabian Journal of Geosciences*. 2018. Vol. 11. Pp. 796-797. DOI: 10.1007/s12517-018-4165-3
17. Jin C., Yi T., Shen Y., Khajepour A., Meng Q. Comparative study on the economy of hybrid mining trucks for open-pit mining // *IET Intelligent Transport Systems*. 2019. No. 13 (1). Pp. 201-208. DOI: 10.1049/iet-its.2018.5085.
18. Liu G., Chai S. Optimizing open-pit truck route based on minimization of time-varying transport energy consumption // *Mathematical Problems in Engineering*. 2019. No. 1. Pp. 1-12. DOI: 10.1155/2019/6987108.
19. Baiany D.M., Zhang L., Xia X. An Optimization Approach for Shovel Allocation to Minimize Fuel Consumption in Open-pit Mines: Case of Heterogeneous Fleet of Shovels // *IFAC Papers On Line*. 2019. No. 52 (14). Pp. 207-212. DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.09.196.
20. Kuznetsov D.V., Kosolapov A.I. Justification criteria for open pit mine depth and mining/haulage machinery parameters // *Earth and Environmental Science*. 2019. No. 626. Pp. 1-4. DOI: 10.1088/1755-1315/626/1/012038.
21. Smirnov K.A. Simulation of rectilinear motion of a four-wheel car-like robot with an electromechanical drivetrain // *Mechanisms and Machine Science*. 2019, no. 73, pp. 2671-2679. DOI: 10.1007/978-3-030-20131-9_264.
22. Upadhyay S.P., Tabesh M., Moradi Afrapoli A., Askari-Nasab H. A Simulation-based algorithm for solving surface mines, equipment selection and sizing problem under uncertainty // *CIM Journal*. 2021. Vol. 12. Pp. 36-46. DOI: 10.1080/19236026.2021.1872995.
23. Joshi D., Paithankar A., Chatterjee S., Equeenuddin Sk. Integrated Parametric Graph Closure and Branch-and-Cut Algorithm for Open Pit Mine Scheduling under Uncertainty // *Mining*. 2022. No. 2. Pp. 32-51. DOI: 10.3390/mining2010003.

References

1. Kuznetsov D.V., Kosolapov A.I. *Optimizatsiya parametrov tekhnologicheskikh kompleksov rudnykh karerov: monografiya* [Optimization of parameters of ore open-cast mine technological complexes: monograph]. Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2020. 188 p. (In Russ.)
2. Burt C.N., Caccetta L. Equipment selection for mining: with case studies. Cham: Springer International Publishing, 2018. 155 p.
3. Sytenkov V.N. Comparative selection of mechanical shovel excavators with rope and hydraulic movement of the operating element. *Gornoe delo* [Mining Engineering], 2014, no. 1, pp. 14-22. (In Russ.)
4. Komlenovich D. A multi-criteria approach to choosing mining equipment. *Gornoe delo* [Mining Engineering], 2017, no. 2, pp. 10-19. (In Russ.)
5. Kumykova T.M., Kumykov V.K. Method of shaping loading-and-transportation system in deep open pit complex ore mines. *J. Vin. Sci.*, 53, 708-717 (2018). DOI: 10.1134/S1062739117042702
6. Kolesnikov V., Katsubin A., Martyanov V., Dopra A. Features of the excavation and loading equipment of various types in the development of inclined and steep beds. *E3S Web of Conferences*, 105, 1-5 (2019). DOI: 10.1051/e3sconf/201910501023
7. Kuznetsov D.V., Kosolapov A.I. Economic and technological aspects of interrelation between open pit depth and mining transport parameters. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavadenii. Gornyi zhurnal* [News of Higher Institutions. Mining Journal], 2020, no. 3, pp. 87-95. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-3-87-95
8. Kuznetsov D.V., Kosolapov A.I. Research of the influence of the excavating and automotive equipment complexes parameters on the speed of faces advance. *Earth and Environmental Science*, 626, 1-6 (2021). DOI:10.1088/1755-1315/626/1/012020
9. Poderni R.Yu. World market of advanced extraction-and-loading machines for open pit mining. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Information and Analytical Bulletin], 2015, no. 2, pp. 148-167. (In Russ.)
10. Rzhnevsky V.V. *Otkrytye gornye raboty. Proizvodstvennye protsessy* [Open-pit mining. Production processes]. Moscow: Librokom, 2010, 512 p. (In Russ.)
11. Rzhnevsky V.V. *Otkrytye gornye raboty. Tekhnologiya i kompleksnaya mekhanizatsiya* [Open-pit mining.

- Technology and integrated mechanization]. Moscow: Librokom, 2010, 551 p. (In Russ.)
12. Kuleshov A.A. *Moshchnye ekskavatoro-avtomobilnye komplekсы* [Powerful excavator-vehicle complexes]. Moscow: Nedra, 1980, 317 p. (In Russ.)
 13. Trubetskoy K.N., Kaplunov D.R. et al. *Gornoe delo: Terminologicheskii slovar* [Mining: Dictionary of technical terms]. Moscow: Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, 2016, 635 p. (In Russ.)
 14. Zhuravlev A.G. The issues of optimizing parameters of quarry transport systems. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin], 2020, no. 3-1, pp. 583-601. (In Russ.) DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-583-601
 15. Koptev V.Yu. Justification of choosing an effective model of a dump truck. *Modern Engineering and Technology*, 5, 23-25 (2014).
 16. Parhizkar A. Location theory applied to optimize the position of road exit(s) in open pit mining (case study). *Arabian Journal of Geosciences*, 11, 796-797 (2018). DOI:10.1007/s12517-018-4165-3
 17. Jin C., Yi T., Shen Y., Khajepour A., Meng Q. Comparative study on the economy of hybrid mining trucks for open-pit mining. *IET Intelligent Transport Systems*, 13 (1), 201-208 (2019). DOI: 10.1049/iet-its.2018.5085
 18. Liu G., Chai S. Optimizing open-pit truck route based on minimization of time-varying transport energy consumption. *Mathematical Problems in Engineering*, 1, 1 – 12 (2019). DOI: 10.1155/2019/6987108
 19. Baiany D.M., Zhang L., Xia X. An optimization approach for shovel allocation to minimize fuel consumption in open-pit mines: Case of heterogeneous fleet of shovels. *IFAC Papers OnLine*, 52 (14), 207-212 (2019). DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.09.196
 20. Kuznetsov D.V., Kosolapov A.I. Justification criteria for open pit mine depth and mining/haulage machinery parameters. *Earth and Environmental Science*, 262, 1-4 (2019). DOI: 10.1088/1755-1315/262/1/012038
 21. Smirnov K.A. Simulation of rectilinear motion of a four-wheel car-like robot with an electromechanical drivetrain. *Mechanisms and Machine Science*, 73, 2671-2679 (2019). DOI: 10.1007/978-3-030-20131-9_264
 22. Upadhyay S.P., Tabesh M., Moradi Afrapoli A., Askari-Nasab H. A simulation-based algorithm for solving surface mines, equipment selection and sizing problem under uncertainty. *CIM Journal*, 12, 36-46 (2021). DOI: 10.1080/19236026.2021.1872995
 23. Joshi D., Paithankar A., Chatterjee S., Equeenuddin Sk. Integrated parametric graph closure and branch-and-cut algorithm for open pit mine scheduling under uncertainty. *Mining*, 2, 32-51 (2022). DOI: 10.3390/mining2010003

Поступила 29.06.2022; принята к публикации 04.07.2022; опубликована 26.09.2022
Submitted 29/06/2022; revised 04/07/2022; published 26/09/2022

Кузнецов Дмитрий Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Открытые горные работы», Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.
Email: KuznetsovDV@mail.ru.

Косолапов Александр Иннокентьевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Открытые горные работы», Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.
Email: Kosolapov1953@mail.ru.

Dmitriy V. Kuznetsov – PhD (Eng.), Associate Professor of the Opencast Mining Department, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.
Email: KuznetsovDV@mail.ru.

Alexander I. Kosolapov – DrSc (Eng.), Professor, Head of the Opencast Mining Department, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.
Email: Kosolapov1953@mail.ru.

ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ И УТИЛИЗАЦИИ ТЕХНОГЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ И ОТХОДОВ

RECYCLING OF MAN-MADE MINERAL FORMATIONS AND WASTE

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

УДК 622.271.1

DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-3-64-76



ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ СПОСОБОВ ВОВЛЕЧЕНИЯ В РАЗРАБОТКУ ОТВАЛОВ РОССЫПНОЙ ЗОЛОТОДОБЫЧИ

Дорош Е.А.¹, Тальгамер Б.Л.²

¹ ООО «СибЗолото», Иркутск, Российская Федерация

² Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Российская Федерация

Аннотация. Актуальность. В настоящее время одним из важнейших направлений в горнодобывающей промышленности страны является добыча золота, значительная часть которого добывается из россыпных месторождений (26-31%) [1]. Структура и качество запасов россыпного золота ухудшаются, растёт роль техногенных образований. За долгие годы эксплуатации россыпных месторождений накопилось большое количество отвалов, полученных в результате промывки песков, часть из которых может быть рентабельно отработана [2-8]. Следует отметить, что в литературе проблеме рентабельного освоения низкопродуктивных россыпей уделяется крайне мало внимания и существуют мнения, что подобные россыпи уже на современном этапе не могут рассматриваться как существенные источники золотодобычи [9]. **Цель работы.** В статье рассматривается задача вовлечения в эксплуатацию продуктивных отвалов, решение которой направлено в первую очередь на экономически эффективную разработку запасов данной группы. **Методы исследования.** Анализ и сравнение наиболее распространённых способов разработки россыпных месторождений и оценка их пригодности для вовлечения в эксплуатацию отвалов с учётом рационального недропользования, экономической эффективности и снижения негативного влияния на окружающую среду. **Результаты.** В работе выполнен анализ эффективности существующих способов разработки россыпных месторождений в контексте их пригодности для рентабельного освоения отвалов. Представлены решения, позволяющие рационально и рентабельно вовлекать в разработку данную группу запасов. Указаны рекомендации по усовершенствованию горного оборудования. **Выводы.** На современном этапе россыпной золотодобычи в России вовлечение в разработку месторождений с низким качеством запасов является реальной задачей, для решения которой изложен имеющийся опыт работ, представлены приемлемые технологические схемы с расчётом ориентировочного экономического эффекта.

Ключевые слова: россыпные месторождения, отвалы, открытый способ разработки, мобильные промывочные приборы

© Дорош Е.А., Тальгамер Б.Л., 2022

Для цитирования

Дорош Е.А., Тальгамер Б.Л. Обоснование рациональных способов вовлечения в разработку отвалов россыпной золотодобычи // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №3. С. 64-76. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-3-64-76>



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

RATIONALE FOR FEASIBLE WAYS OF INVOLVING DUMPS OF PLACER GOLD MINING IN THE DEVELOPMENT

Dorosh E.A.¹, Talgamer B.L.²

¹ LLC SibZoloto, Irkutsk, the Russian Federation

² Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, the Russian Federation

Abstract. Relevance. Currently, one of the most important areas in the Russian mining industry is gold mining, whose significant part is attributed to placer deposits (26-31%) [1]. The structure and quality of placer gold reserves are deteriorating, and the role of technology-related formations is growing. Over the long years of exploitation of placer deposits, a large number of dumps have been accumulated as a result of sand washing; some of them can be profitably processed [2-8]. It should be noted that literature gives extremely little focus on the problem of profitable development of low-productive placers, and there are opinions that such placers cannot be considered as significant sources of gold mining even at the present stage [9]. **Objectives.** The paper deals with the problem of bringing productive dumps into operation, and the solution is aimed primarily at the cost-effective development of the reserves of this group. **Research methods.** Analysis and comparison of the most common methods for the development of placer deposits and assessment of their suitability for the involvement in the operation of dumps, taking into account feasible subsoil use, economic efficiency and reducing the negative impact on the environment. **Results.** The paper analyzes efficiency of existing methods for the development of placer deposits in the context of their suitability for the cost-effective development of dumps. The authors presented solutions that contribute to reasonable and cost-effective involvement of this group of reserves in the development. The paper presents recommendations for the improvement of mining equipment. **Conclusions.** At the present stage of placer gold mining in Russia, deposits with low quality reserves can be involved in the development, factoring into the presented available work experience, and acceptable process flow charts with the calculation of the approximate economic effect.

Keywords: placer deposits, dumps, open pit mining, mobile washing facility

For citation

Dorosh E.A., Talgamer B.L. Rationale for Feasible Ways of Involving Dumps of Placer Gold Mining in the Development. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 3, pp. 64-76. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-3-64-76>

Введение

Разработка россыпных месторождений золота насчитывает не один десяток лет. За этот период были отработаны сотни месторождений различными способами (мускульным, гидравлическим, подземным, дражным, открытым раздельным). Результатами отработки предшественников помимо добытого золота оказалось возникновение многочисленных техногенных месторождений. Причиной возникновения этих месторождений послужили потери песков и золота, возникающие в процессе разработки запасов.

На сегодняшний день существует множество классификаций техногенных месторождений [10-13], при этом наиболее распространено расширенное толкование термина «техногенная россыпь», по которому к техногенным запасам относятся остаточно-целиковые и отвальные их разновидности. Наиболее ценными для освое-

ния являются остаточно-целиковые запасы, качество которых, как правило, не сильно уступает запасам, отработанным при первичной эксплуатации месторождения [14, 15]. В настоящее время разрабатывается значительное количество таких россыпей.

Качество техногенных образований, представленных хвостами обогащения и отвалами вскрыши, значительно хуже. Причина тому ограниченное количество технологических потерь, возникших при первичной разработке россыпи, а также низкое содержание ценных компонентов в торфах. К основным факторам, определяющим потери при промывке песков, большинство исследователей относят гранулометрию и морфологию металла, промывистость песков, применяемые при промывке технические средства [14, 15]. В отдельных случаях на технологические потери заметное влияние оказывает мерзлота. При больших технологических потерях техногенная рос-

сыпь представлена галечными и эфельными отвалами, оставшимися после промывки. Потери песков при вскрышных работах возникают при удалении торфов, лежащих на кровле пласта, а также на россыпях, в которых преобладают рассредоточенный и пропластовый типы распределения золота в вертикальном разрезе. В этих случаях техногенная россыпь представлена вскрышными отвалами. Качество продуктивных отложений отвального комплекса техногенной россыпи, как правило, хуже даже остаточно-целиковых запасов, оставленных после первичной разработки. Поэтому техногенные россыпи, представленные только отвальным комплексом, эксплуатируются гораздо реже.

Вместе с тем в условиях стремительного истощения сырьевой базы россыпного золота решение задач, направленных на эффективное вовлечение в разработку техногенных образований, является перспективным направлением.

Из анализа публикаций, связанных с разработкой техногенных запасов, представленных отвалами, следует, что большинство трудов посвящено вопросам обогащения, в основном связанным с извлечением мелкого и тонкого золота (далее – МиТЗ) [16-22]. Это действительно актуальная тема, решение которой поможет рентабельно разрабатывать объекты, на которых значительная часть запасов (не только техногенных) содержит МиТЗ. Фактически в отвалах находится не только МиТЗ [23, 24], и роль этой категории при освоении техногенных запасов преувеличена. На примере эксплуатации техногенных запасов месторождения верхнего течения реки Хомолхо (Бодайбинский р-н, Иркутская обл.) с помощью обогатительного отсадочного комплекса «Труд-12 М» количество мелкого золота фракции минус 0,5 мм (свободное + связанное) в общем балансе добытого не превышает 0,3% [25, 26].

В то же время публикаций, направленных на изыскание эффективных технологий ведения горных работ при разработке техногенных образований, практически не встречается. Однако, если сократить количество эксплуатационных затрат, часть объектов с определенным качеством сырья можно разрабатывать вполне рентабельно.

Горно-геологические и горнотехнические условия, влияющие на разработку отвалов

На разработку отвалов влияет достаточно много горно-геологических и горнотехнических условий, основные из которых приведены ниже:

1) Качество запасов. К качественным характеристикам, оказывающим ключевое влияние на разработку отвалов россыпной золотодобычи, относятся: среднее содержание металла, гранулометрические характеристики золота и песков, пробность ценного компонента. Среднее содержание и пробность определяют возможный экономический эффект от промышленного освоения запасов и напрямую влияют на обоснование технологии разработки. Гранулометрические характеристики песков и золота влияют на выбор технологии обогащения.

2) Гидрогеологические условия. Отвалы могут быть обводнены в различной степени либо полностью находится под водой. Всё это влияет на обоснование способов и технологии вовлечения их в разработку.

3) Мерзлотные условия. Возможно различное поражение отвалов мерзлотой: сезонная мерзлота, частичное поражение мерзлотой, полное промерзание отложений. Наличие мерзлоты зачастую является определяющим фактором при оценке пригодности отвалов к промышленному освоению, так как подготовка пород к выемке может значительно удорожить и усложнить процесс производства горных работ.

4) Структура и залегание запасов. Подавляющее большинство отвалов имеют сложную структуру и по сложности геологического строения относятся к 4-й группе [28]. Отвалы с содержанием ценного компонента, как правило, залегают на земной поверхности и часто перекрыты слоем пустых пород.

5) Первичный способ разработки россыпи. Немаловажное влияние оказывает и первичный способ разработки россыпи. Например, если россыпь изначально разрабатывалась дражным способом и отвалы расположены в выработанном пространстве, обводнены, примыкают к остаточно-целиковым запасам, то их экономически эффективнее будет разрабатывать дражным способом. Полученные в результате открытой и подземной разработки отвалы, находящиеся на земной поверхности либо перекрытые отложениями, рациональнее разрабатывать открытым способом.

Горные работы при освоении отвалов россыпной золотодобычи и проблематика их рентабельного освоения

В зависимости от горно-геологических и горнотехнических условий отвалы россыпной золотодобычи в настоящее время разрабатывают открытым и дражным способами.

Примеров повторной разработки россыпей драгами довольно много и опыт повторной эксплуатации отвалов в целом положительный [2]. При повторной дражной разработке отвалов двумя драгами в Забайкалье добывалось 34-60% золота от первоначально добытого [29]. Среднее извлеченное содержание золота при отработке дражных отвалов в Ленском золотоносном районе составило 45% [30]. При повторной дражной разработке алмазоносных россыпей в течение семи лет добывалось в среднем 40-50% от первоначально добытого количества полезных ископаемых [31]. Следует заметить, что не все результаты повторного драгирования были положительными. Например, была остановлена драга №115 при повторной разработке «Васильевского» дражного полигона (река Бодайбо) из-за низких содержаний золота [15].

Из опыта дражной эксплуатации техногенных россыпей следует, что себестоимость добычи металла при повторном драгировании значительно ниже по сравнению с освоением целиковых запасов. Последнее связано с резким сокращением объемов горноподготовительных и гидротехнических работ, а также увеличением промывистости полезного ископаемого [32].

Несмотря на свою эффективность, дражный способ разработки характеризуется высокими потерями полезного ископаемого и меньше всего отвечает критериям рационального недропользования. Областью применения дражного спосо-

ба при разработке техногенных образований являются в основном отработанные ранее дражные полигоны, на которых разрабатываются не только отвалы, но и межшаговые, бортовые и междоовые целики, а также оставленные приплотиковые отложения. Технология повторной разработки техногенных отвалов дражным способом достаточно апробирована, и специалистами представлено значительное количество эффективных технологических схем [33-36], поэтому в рамках данной работы дражный способ не рассматривается.

Примеров разработки отвалов россыпной золотодобычи открытым раздельным способом также много. Имеется положительный и отрицательный опыт вовлечения данной группы запасов в разработку.

Если с параметрами и технологией драгирования при повторной разработке полигонов ситуация относительно понятная, то с разработкой отвалов открытым способом всё не так однозначно. На основании имеющихся данных можно сделать вывод, что отвалы, как правило, разрабатываются так же, как и целиковые участки, – открытым способом по транспортной схеме. Связанно это с тем, что задействованное обогатительное оборудование, используемое на россыпях, недостаточно мобильное. Наиболее часто используемая технологическая схема при разработке отвалов и задействованное оборудование представлены на **рис. 1**.



Рис. 1. Технологическая схема разработки отвалов россыпной золотодобычи открытым способом
Fig. 1. A process flow chart for the open pit mining of dumps of placer gold mining

Из **рис. 1** видно, что при разработке отвалов по данной схеме будет задействовано следующее оборудование в количестве: 1-2 средних или тяжелых бульдозера, 2 экскаватора или погрузчика, 1 обогатительный комплекс, 2 автосамосвала или погрузчика. Количество техники достаточно большое, а значит, и эксплуатационные затраты тоже значительные.

При грамотном руководстве горными работами специалистами иногда удается упростить технологический цикл и сократить количество задействованной техники (а значит, и затраты). При определенном качестве сырья это даёт положительный эффект, и объекты разрабатываются рентабельно. Вместе с тем большинство отвалов имеет очень низкое качество запасов, бедные и убогие содержания ценного компонента [14, 15], поэтому технологии, применяемые при разработке целиковых россыпей, не позволяют так же рентабельно вовлекать отвалы в промышленное освоение.

Вовлечение отвалов в эксплуатацию осложняется спецификой разработки небольших и средних техногенных россыпей: ограниченное количество запасов, короткий срок эксплуатации, различное качество песков на одном и том же участке работ, сложные горно-геологические и горно-технические условия, сезонность работ, непростая логистика на удалённых участках. В этих условиях недропользователь начинает работы, как правило, уже имея комплект оборудования. Техника, как правило, не всегда подобрана рационально и имеет значительный износ [37]. Недропользователь не всегда располагает большим объемом свободных средств, позволяющим обновить или дополнить парк техники. В работе используют наиболее гибкие и проверенные опытом способы – бульдозерный и экскаваторно-автотранспортный [37]. Это дает возможность рентабельно (не всегда) разрабатывать целиковые россыпи, однако не позволяет вовлекать в разработку отвалы с низким качеством запасов.

Обоснование рациональных способов вовлечения в разработку техногенных отвалов

Из вышесказанного становится понятно, что для рентабельного освоения запасов, находящихся в отвалах, необходимо сократить затраты, модернизируя технологический процесс. Одним из вариантов решения данной задачи является исключение из основных технологических процессов достаточно затратную доставку песков на промывку, используя мобильные промывочные приборы. Использование мобильных промывоч-

ных приборов позволит сократить затраты на технологический процесс и разрабатывать отложения с более низким содержанием золота.

На **рис. 2** представлен пример технологической схемы разработки техногенного отвала с использованием мобильного промывочного прибора. По данной схеме работ возможно разрабатывать преимущественно талые необводнённые отвалы, со средним и крупным золотом. Экскаватор 2 осуществляет экскавацию и погрузку продуктивных отложений отвала 1 в приёмный бункер мобильного промприбора 4, на котором происходит процесс обогащения. На уборке эфелей 6 и разваловке гали 5 задействован бульдозер 8, который, помимо этого, являясь многофункциональной машиной, выполняет горно-подготовительные работы (ГПР), вспомогательные работы, строительство гидротехнических (ГТС) и инженерных сооружений (альтернативой бульдозеру для уборки хвостов промывки может послужить фронтальный погрузчик или экскаватор). Обеспечение электричеством промприбора и насоса 11 происходит от ДЭС 7 с использованием кабеля 10. Обеспечение промприбора водой осуществляется от насоса по гибкому водоводу 9, забор воды насосом происходит из илоотстойника 12, расположенного в выработанном пространстве.

Главным преимуществом и одновременно недостатком данной технологической схемы является отсутствие автотранспорта. Объем продуктивных отложений, разработанный с одной стоянки промприбора, будет зависеть от максимальных радиусов черпания и разгрузки экскаватора 3 (см. **рис. 2**). В связи с этим при работе по данной схеме предпочтительнее использовать модели экскаваторов с большими параметрами рабочего оборудования, что позволит экскаватору разрабатывать отвал с кровли и осуществлять нижнюю погрузку в бункер (что для обратной мехлопаты предпочтительнее). Промприбор в данной схеме стоит располагать так, чтобы сократить время поворота экскаватора при погрузке.

По представленной на **рис. 2** схеме возможно разрабатывать отвалы, породы которых поражены мерзлотой. В этом случае бульдозер 8 будет задействован на горно-подготовительных работах (рыхлении мерзлых отложений отвала и формирование бурта оттаявших пород для дальнейшей экскавации). Этот неблагоприятный фактор может значительно увеличить затраты на разработку, а при низком качестве запасов сделать её нерентабельной.

В **табл. 1** представлены результаты расчётов основных эксплуатационных затрат на добычные работы по описанной технологической схеме (см. **рис. 2**).

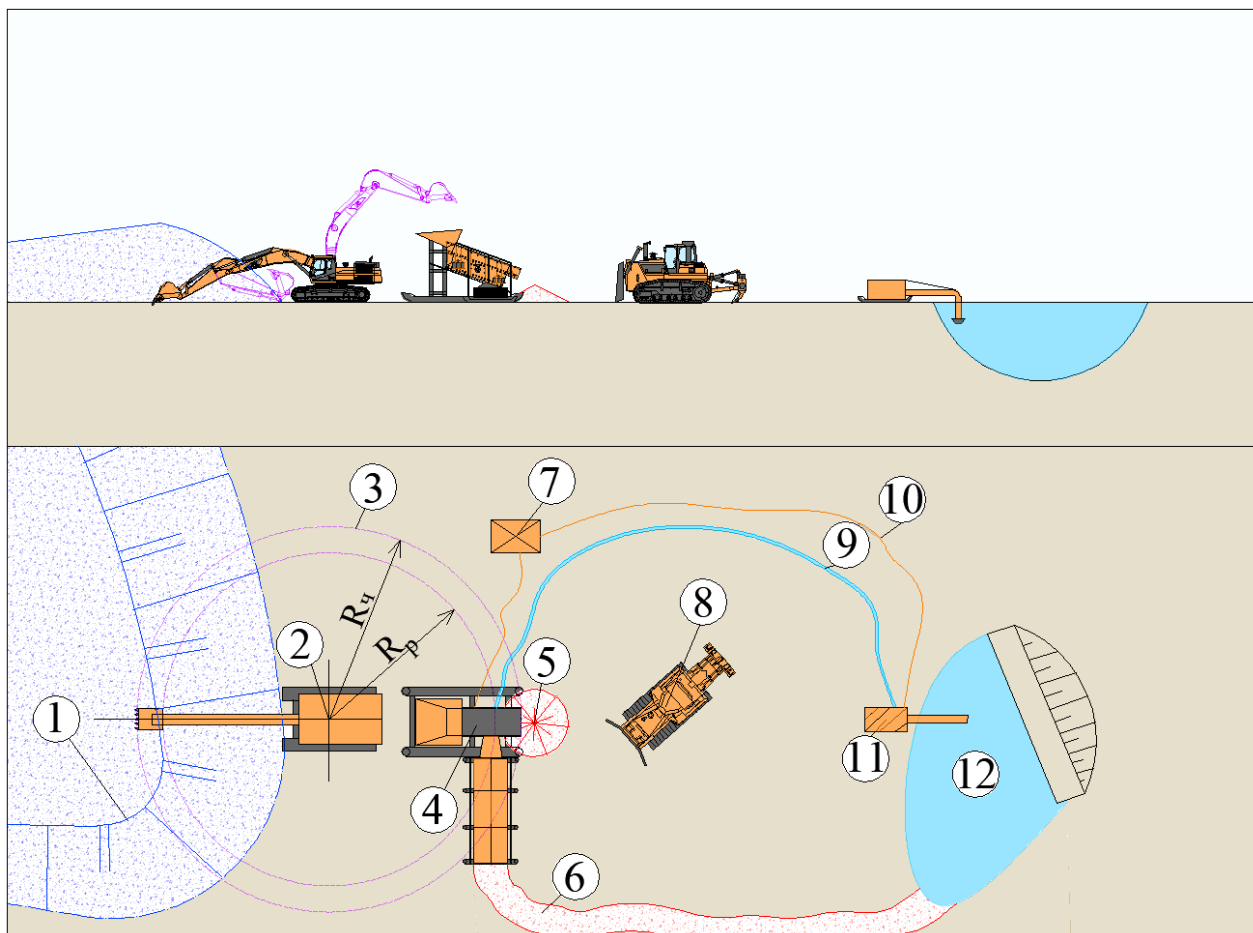


Рис. 2. Технологическая схема разработки отвала с использованием мобильного промывочного прибора:
1 – отвал; 2 – экскаватор; 3 – радиусы черпания и разгрузки экскаватора; 4 – мобильный промывочный прибор; 5 – галля; 6 – эфель; 7 – ДЭС; 8 – бульдозер; 9 – гибкий водовод; 10 – кабель; 11 – насос; 12 – илоотстойник

Fig. 2. A process flow chart for the development of the dump using the mobile washing facility: 1 is a dump; 2 is an excavator; 3 are digging and unloading radii of the excavator; 4 is mobile washing facility; 5 is pebbles; 6 are dredging tailings; 7 is a diesel power station; 8 is a bulldozer; 9 is a flexible conduit; 10 is a cable; 11 is a pump; 12 is a silt-settling tank

Таблица 1. Результаты расчётов основных эксплуатационных затрат на добычные работы с использованием мобильного промывочного прибора

Table 1. Results of calculations of main operating costs for mining operations using the mobile washing facility

Вид работ/ расходов	Оборудование	Модель оборудования	Производительность оборудования (суточная), м ³ /сут	Суточная себестоимость эксплуатации, руб./маш. сут	Себестоимость работ, руб./м ³
Экскавация, загрузка песков в промприбор	Экскаватор	CAT 336 BL	2000	45000	22,5
Промывка песков	Промывочный прибор	На базе грохота ГИТ 42	2000	40000	20,0
Электрообеспечение	ДЭС	АД-100	–	–	–
ГПР, ГТС, инженерные, вспомогательные	Бульдозер	Komatsu D-375	–	80000	–
Затраты на основные технологические процессы (добычные работы)				165000	82,5

Примечание. Производительность оборудования и суточная себестоимость эксплуатации экскаватора CAT 336 BL, промприбора на базе грохота ГИТ 42 представлены по фактическим данным работы ООО «СибЗолото». Данные по бульдозеру Komatsu D-375 взяты из статьи [38].

По схеме на **рис. 2** затраты на добычные работы составили 82,5 руб./м³. Если работать по наиболее распространённой схеме (см. **рис. 1**) с использованием стационарного промприбора и автотранспорта для перевозки продуктивных отложений отвала (+ 4 КамАЗа), затраты составят 148,5 руб./м³, что на 80% сделает разработку дороже. На основе представленных расчётов можно утверждать, что в зависимости от количества используемого оборудования, его модельного ряда, дальности транспортирования пород, горнотехнических условий транспортный способ разработки будет затратней в среднем на 40-120%. Минимальное промышленное содержание россыпного золота в отвале, рассчитанное по известным формулам [39], при работе по предложенной технологической схеме (см. **рис. 2**) будет зависеть от множества факторов и колебаться в пределах 0,080-0,250 г/м³.

На **рис. 3** представлен пример технологической схемы разработки отвала с использованием плавучего промывочного прибора. По данной технологической схеме возможно разрабатывать преимущественно обводнённые талые отвалы, содержащие среднее и крупное золото. Экскава-

тор 2 осуществляет выемку и погрузку продуктивных отложений отвала 1 в приёмный бункер плавучего промприбора 4, на котором происходит процесс обогащения.

Экономический эффект при работе по описанной технологической схеме на **рис. 3** с использованием плавучего промывочного прибора будет сопоставим с предыдущей схемой. Объем продуктивных отложений, разработанный с одной стоянки промприбора, будет зависеть от максимального радиуса черпания и разгрузки экскаватора. В таких условиях выгоднее использовать небольшие драглайны, такие как ЭШ-5/45. Недостатком данной схемы работ является процесс подводного черпания, при котором происходят значительные потери полезного ископаемого, что не отвечает требованиям рационального недропользования.

В данной технологической схеме вместо плавучего промприбора может быть использована модульная драга, которая легко демонтируется и переносится на новые обводнённые участки. Небольшая драга в модульном исполнении (вес менее 200 т) разработана АО «Иргиредмет» и успешно работает в Амурской области [40].

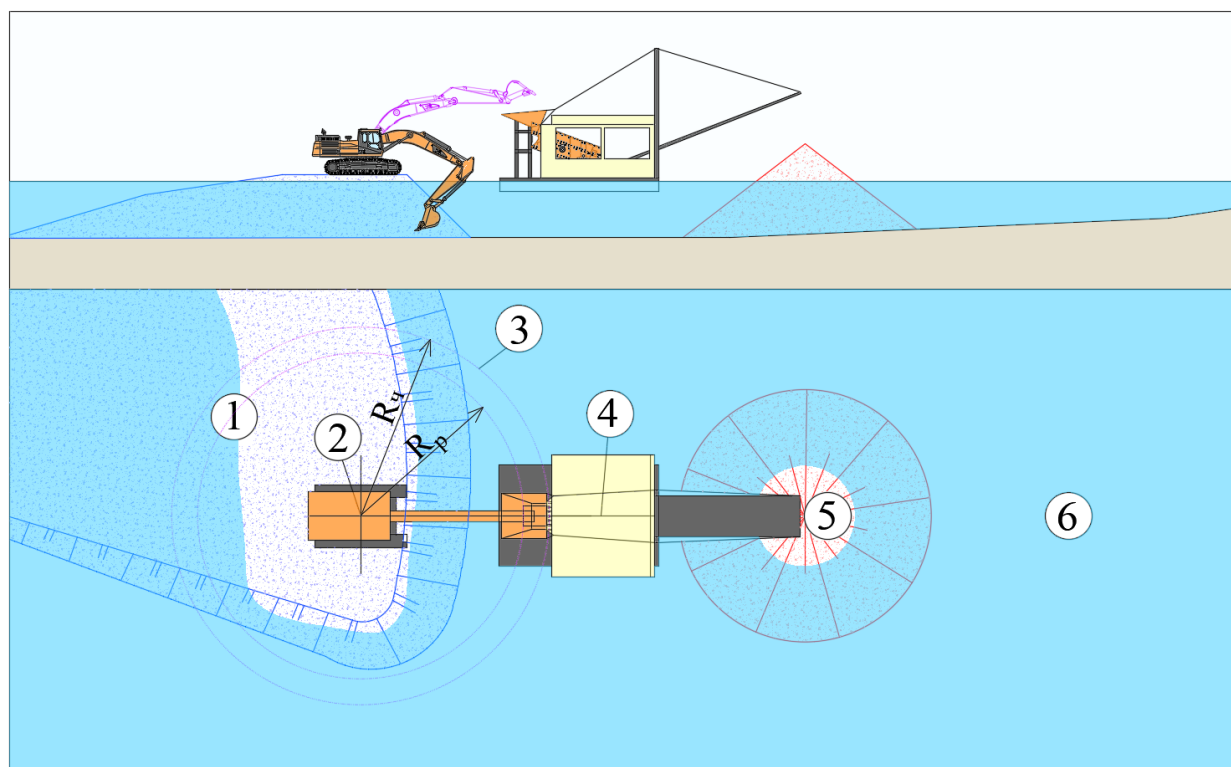


Рис. 3. Технологическая схема разработки отвала с использованием мобильного (плавучего) промывочного прибора: 1 – отвал; 2 – экскаватор; 3 – радиус черпания и разгрузки экскаватора; 4 – плавучий промывочный прибор; 5 – галя-эфельный отвал; 6 – технологический водоем

Fig. 3. A process flow chart for the development of a dump using the mobile (floating) washing facility: 1 is a dump; 2 is an excavator; 3 are digging and unloading radii of the excavator; 4 is mobile washing facility; 5 is a dump of pebbles and dredging tailings; 6 is a process water pool

Представленные технологические схемы (см. **рис. 2, 3**) были известны уже в начале прошлого века и применялись для разработки небольших россыпей с низким качеством сырья, однако широкого распространения в нашей стране не получили. В отечественной литературе имеются публикации, посвященные мобильным промывочным приборам [41-43]. В настоящее время интересен положительный опыт Российской компании АО «Прииск Соловьевский», использующий на своих участках несколько мобильных промывочных комплексов производительностью 150 м³/ч [44-46]. Так, передвижной промприбор «Шилка» в Забайкальском крае в 2016 г. за сезон промыл 350 тыс. м³, добыв при содержании золота в песках 0,220 г/м³ 78 кг золота в химической чистоте [45].

За границей (Канаде, США, Австралии, Новой Зеландии) достаточно часто использовали и используют подобные решения [47-51]. Положительный опыт использования подобных технологических схем представлен в отчетах о добыче россыпного золота с использованием экскаватора и мобильного (плавучего) промывочного прибора на Юконе (Канада) представителями Forty Mile Placers Inc [47, 48], а также Новозеландской промывочной установки [49].

По различным причинам представленные технологические решения не получили широкого распространения. В настоящее время в связи со значительным ухудшением качества и количества запасов россыпного золота, накоплением больших объемов техногенных образований данные решения позволят рентабельно вовлечь в разработку значительное количество небольших объектов.

Выводы

1. Техногенно-отвалный комплекс на россыпях отличается низким качеством запасов, сложным геологическим строением, непростыми горнотехническими и горно-геологическими условиями залегания, поэтому вовлечение его в разработку способами и технологиями, используемыми на целиковых отложениях, оказывается, как правило, нерентабельным.

2. На современном этапе россыпной золотодобычи в России при разработке месторождений с низким качеством запасов (в том числе техногенных) актуальна концепция мобильности, которая предусматривает переработку продуктивных отложений на месте их выемки. Отражение концепции должно проявляться в первую очередь в оборудовании, которое должно быть мобильным.

3. Представленные в статье технические решения (см. **рис. 2, 3**) позволят эффективно разрабатывать небольшие месторождения с низким содержанием золота (0,080-0,250 г/м³), что подтверждается практическим опытом.

Список источников

1. 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.
2. Чemezov В.В., Тальгамер Б.Л. Техногенные россыпи (образование, оценка, эксплуатация): монография. Иркутск: Издательство ИГТУ, 2013. 239 с.
3. Ковлеков И.И. Техногенное золото Якутии. М.: Изд-во Мос. гос. горного ун-та, 2002. 303 с.
4. Ван-Ван-Е А.П. Ресурсная база природно-техногенных золотороссыпных месторождений. М.: Горная книга: Изд-во Мос. гос. горного ун-та, 2010. 268 с.
5. Мирзеханов Г.С. Оценочные критерии ресурсного потенциала техногенных образований россыпных месторождений золота Дальнего Востока России // Вестник Камчатской региональной ассоциации «Учебно-научный центр». Серия: Науки о земле. 2014. № 1 (23). С. 139-150.
6. Литвиненко И.С., Голубенко И.С. Ресурсный потенциал золота в отвалном комплексе отработанных россыпных месторождений Магаданской области // Разведка и охрана недр. 2015. № 5. С. 17-24.
7. Мирзеханов Г.С., Мирзеханова З.Г. Ресурсный потенциал техногенных образований россыпных месторождений золота: монография. М.: Изд-во ООО «МАКС пресс», 2013. 288 с.
8. Мирзеханова З.Г., Мирзеханов Г.С. Отходы россыпной золотодобычи – источник восполнения минерально-сырьевой базы // Материалы IV Международной научной экологической конференции. Краснодар, 2015. С. 618-624.
9. Ван-Ван-Е А.П. Экономические аспекты инвентаризации месторождений полезных ископаемых в рыночных условиях // Ресурсовоспроизводящие, малоотходные и природоохранные технологии освоения недр: сб. тр. М.: Изд-во РУДН, 2002. С. 277-279.
10. Мамаев Ю.А., Литвинцев В.С. Классификация техногенных россыпных месторождений // Закономерности строения и эволюции геосфер: сб. ст. Хабаровск, 1996. С. 40-43.
11. Мурзин Н.В., Тальгамер Б.Л. К систематизации техногенных россыпей // Рациональное освоение недр. 2021. № 2. С. 18-23.
12. Совершенствование классификации техногенных минеральных образований / Прохоров Д.О., Кухарь В.Д., Сарычев В.И., Подколзин А.А. // Известия Тульского государственного университета. Серия: Науки о земле. 2021. № 4. С. 501-512.

13. Макаров В.А., Самородский П.Н. Актуальные вопросы оценки и освоения техногенных месторождений золота // Золото и технологии. 2018. № 4. С. 82-96.
14. Тищенко Е.И., Миледин И.В. Разработка программы переоценки техногенных отвалов золото-добычи в Ленском золотоносном районе // Фондовая литература ФГБУ «Росгеолфонд по Иркутской области и Усть-Ордынскому Бурятскому АО» – ФГУП «ВостСибНИИГГиМС», Иркутск, 2000. Инв. № 16467. 84 с.
15. Коткин В.В., Тищенко Е.И. Прогнозно-поисковые работы по оценке прогнозных ресурсов техногенных отвалов, россыпей с тонким и мелким золотом Ленского горнопромышленного района // Фондовая литература ФГБУ «Росгеолфонд по Иркутской области и Усть-Ордынскому Бурятскому АО» – ФГУНПП «Иркутскгеофизика», Иркутск, 2008. Инв. № 17315. 546 с.
16. Актуальные способы отработки техногенных россыпных месторождений золота с технологией извлечения мелкого золота / Прокопьев С.А., Прокопьев Е.С., Кадесников И.В., Черимичкина Н.А. // Науки о Земле и недропользование. 2020. № 4(43). С. 458-466.
17. Иванов П.О., Кадесников И.В. Извлечение мелкого и тонкого россыпного золота винтовыми сепараторами // Золотодобыча. 2021. № 276. С. 19-22.
18. Мовчан А.Ф., Болотин М.Л., Кадесников И.В. Опыт отработки техногенных (эфельных) отвалов россыпного месторождения Юрское, Республика Саха (Якутия) // Золото и технологии. 2020. № 4(500). С. 86-92.
19. Практические результаты внедрения обогатительного модуля с винтовой технологией обогащения на прииске «Нагорный» ООО «АНЖУ» [Электронный ресурс] / Заровняев А.Н., Иванов П.О., Болотин М.Л., Кадесников И.В. // Золотодобыча. 2019. №250. Режим доступа: <https://zolotodb.ru/article/12464>
20. Неронский Г.И., Бородавкин С.И. Способы отработки техногенных россыпей золота // Минералогия техногенеза. 2009. № 10. С. 76-87.
21. Неронский Г.И., Бородавкин С.И. Масштабы россыпей с мелким и тонким золотом и перспективы их освоения // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2010. № S4. С. 518-529.
22. Сурков А.В., Ахапкин А.А. Проблема извлечения мелкого и тонкого золота при освоении россыпей и техногенных отвалов // Цветные металлы. 2003. № 1. С. 13-16.
23. Кавчик Б.К. Оценка ресурсов и запасов золота в техногенных россыпях: отчет о НИР // Фондовая литература ФГБУ «Росгеолфонд по Иркутской области и Усть-Ордынскому Бурятскому АО» – ОАО «Иргиредмет», Иркутск, 2000. Инв. № 16643. 72 с.
24. Кавчик Б.К. Техногенные россыпи с крупным золотом [Электронный ресурс] // Золотодобыча. 2003. № 55. Режим доступа: <https://zolotodb.ru/article/326>
25. Лунышин П.Д. Проблемы отработки техногенных месторождений и неучтенных запасов [Электронный ресурс] // Золото и технологии. 2021. № 3. Режим доступа: <https://zolteh.ru/ekspluatatsiya-mestorozhdeniy/problemy-otrabotki-tekhnogennykh-mestorozhdeniy-i-neuchtyennykh-zapasov/>
26. Меледин И.В. Практические результаты по промывке техногенных отвалов прошлых лет в долине реки Хомолхо // Золотодобыча. 2010. № 137. С. 22-27.
27. Бенедюк П.Ф., Ерошенко С.И., Бенедюк Т.Ф. Ещё раз о мелком золоте техногенных россыпей на примере месторождения реки Хомолхо // Золотодобыча. 2020. № 255. С. 18-21.
28. Приказ Министерства природных ресурсов РФ от 11 декабря 2006 г. № 278 «Об утверждении Классификации запасов и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых» / Зарегистрировано в Минюсте РФ 25 декабря 2006 г., Рег. № 8667.
29. Овешников Ю.М., Большаков А.И. Некоторые результаты исследований по полноте отработки россыпных месторождений драгами // Разработка россыпных месторождений. М: Изд-во МГРИ, 1987. С. 67-71.
30. Жученко Е.Т., Тальгамер Б.Л., Жученко Е.Е. К вопросу о дражной разработке техногенных россыпей // Проблемы освоения минеральной базы Восточной Сибири: сб. науч. тр. Иркутск, 2007. С. 5-8.
31. Оценка потерь алмазов при дражной разработке россыпей / Тальгамер Б.Л., Чемезов В.В., Неретин А.В., Дементьев С.А. // Проблемы развития минеральной базы Восточной Сибири: сб. науч. тр. Иркутск, 2003. С. 44-48.
32. Проблемы рационального освоения золотороссыпных месторождений Дальнего Востока (геология, добыча, переработка): монография / Мамаев Ю.А., Ван-Ван-Е А.П., Сорокин А.П., Литвинцев В.С., Пуляевский А.М. Владивосток: Дальнаука, 2002. 200 с.
33. Пат. 2215875 РФ, МКИ E21C 41/30. Способы повторной дражной разработки техногенной россыпи / Жученко Е.Т., Тальгамер Б.Л., Лешков В.Г., Дубинин В.Ф.; заявитель и патентообладатель ИрГТУ; опубл. в Б.И. 2003. Бюл. № 31.
34. А.с. № 1097797 СССР, МКИ E21C 45/00. Способ разработки россыпи в условиях повторного драгирования / Чемезов В.В.; заявитель и патентообладатель АО «Иргиредмет»; опубл. в Б.И. 1984. Бюл. № 22.
35. А.с. № 1263849 СССР, МКИ E21C 45/00. Способ разработки россыпи в условиях повторного драгирования / Чемезов В.В.; заявитель и патентообладатель АО «Иргиредмет»; опубл. в Б.И. 1986. Бюл. № 38.
36. А.с. № 1694901 СССР, МКИ E21C 41/30. Способ дражной разработки россыпных месторождений / Махнев А.Н., Тальгамер Б.Л.; заявитель и патентообладатель ИрГТУ; опубл. в Б.И. 1991. Бюл. № 44.
37. Шемякин С.А., Мамаев Ю.А., Иванченко С.Н. Новые технологии открытой разработки место-

- рождений. Хабаровск: Приамурское географическое общество, 2003. 129 с.
38. Бабий Ю.А., Москалевич В.И., Пятаков В.Г. Технично-экономические показатели работы горно-транспортного оборудования, определённые на базе данных, полученных дистанционным способом [Электронный ресурс] // Золотодобыча. 2022. Режим доступа: <https://zolotodb.ru/article/12795>
 39. Методические рекомендации по технико-экономическому обоснованию кондиций для подсчета запасов месторождений твердых полезных ископаемых (кроме углей и горючих сланцев), утвержденными распоряжением МПР России от 05 июня 2007 г. № 37-р.
 40. Пятаков В.Г., Тальгамер Б.Л. Перспективы развития дражного способа разработки россыпных месторождений // Руда и Металлы. 2019. № 12. С. 35-38.
 41. Шорохов С.М. Первые советские передвижные золотомойки для экскаваторной разработки россыпей // Советская золотопромышленность. 1935. № 3-4. С. 27-29.
 42. Афанасьев П.Ю., Трубников Н.Б. Виток золотой спирали. Благовещенск, 2008. 383 с.
 43. Невский Б.В. Плавающая золотомойка в Миндано [Электронный ресурс] // Гипрозолото. Золотая промышленность. 1940. № 5-6. Режим доступа: <https://zolotodb.ru/article/10163>
 44. Кавчик Б.К. Новые технологии для россыпной золотодобычи [Электронный ресурс] // Золотодобыча. 2016. № 212. Режим доступа: <https://zolotodb.ru/article/11485>
 45. Череменов С.А. Опыт применения мобильных промысловых комплексов, разработанных специалистами АО «Прииск Соловьевский» [Электронный ресурс] // Золотодобыча. 2017. № 220. Режим доступа: <https://zolotodb.ru/article/11610?page=all>
 46. Череменов С.А. Прииск Соловьевский: 150 лет золотодобычи и реалии сегодняшнего дня [Электронный ресурс] // Золотодобыча. 2018. № 230. Режим доступа: <https://zolotodb.ru/article/11843>
 47. Authors: Forty Mile Placers Inc, Yukon. Placer Gold Dredging using an Excavator and a Floating Processing Plant // Placer Gold Mining Methods Report (Funded by the Canada/Yukon Economic Development Agreement (YEDA)). 1993. P. 53.
 48. Authors: Forty Mile Placers Inc, Yukon. Testing the Viability of Floater Dredging in Frozen Ground // Placer Gold Mining Methods Report (Funded by the Canada/Yukon Economic Development Agreement (YEDA)). 1995. P. 25.
 49. Fully detailed account of using a pontoon-based floating New Zealand wash-plant (trommel, hydraulic rifles and rear stacker conveyor), fed by a land-based hydraulic excavator // Placer Gold Mining Methods Report [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.geology.gov.yk.ca
 50. Danny Walker. Placer Gold Mining in Mongolia – the New Zealand Way // World Placer Journal. November 2001. Vol. 2. Pp. 26-29.
 51. Robin Grayson. BAT – Best Available Techniques for placer gold miners // The Gold Miner's Book. 2017. Pp. 17-28.

References

1. Overview of the gold mining industry in Russia at the end of 2020. 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.
2. Chemezov V.V., Talgamer B.L. *Tekhnogennye rossy-pi (obrazovanie, otsenka, ekspluatatsiya): monografiya* [Technology-related placers (formation, evaluation, exploitation): monograph]. Irkutsk: Publishing House of Irkutsk State Technical University, 2013, 239 p. (In Russ.)
3. Kovlekov I.I. *Tekhnogennoe zoloto Yakutii* [Technology-related gold of Yakutia]. Moscow: Publishing House of Moscow State Mining University, 2002, 303 p. (In Russ.)
4. Van-Van-E A.P. *Resursnaya baza prirodno-tekh-nogennykh zolotorossyynykh mestorozhdeniy* [Resource base of natural-technology-related gold placer deposits]. Moscow: Publishing House of Mining Book, Publishing House of Moscow State Mining University, 2010, 268 p. (In Russ.)
5. Mirzekhanov G.S. Evaluation criteria for the resource potential of technology-related formations of placer gold deposits in the Far East of Russia. *Vestnik Kamchatskoy regionalnoy assotsiatsii «Uchebno-nauchny tsentr». Seriya: Nauki o zemle* [Bulletin of Kamchatka Regional Association Educational and Scientific Center. Series: Earth Sciences], 2014, no. 1 (23), pp. 139-150. (In Russ.)
6. Litvinenko I.S., Golubenko I.S. Resource potential of gold in the dump complex of depleted placer deposits of the Magadan Region. *Razvedka i okhrana nedr* [Exploration and Protection of Mineral Resources], 2015, no. 5, pp. 17-24. (In Russ.)
7. Mirzekhanov G.S., Mirzekhanova Z.G. *Resursnyi potentsial tekhnogennykh obrazovaniy rossyynykh mestorozhdeniy zolota: monografiya* [Resource potential of technology-related formations of placer gold deposits: monograph]. Moscow: LLC MAKES, 2013, 288 p. (In Russ.)
8. Mirzekhanova Z.G., Mirzekhanov G.S. Wastes of placer gold mining – a source of replenishment of the mineral resource base. *Materialy IV Mezhdunarodnoy nauchnoy ekologicheskoy konferentsii* [Proceedings of the 4th International Scientific Ecological Conference]. Krasnodar, 2015, pp. 618-624. (In Russ.)
9. Van-Van-E A.P. Economic aspects of the inventory of mineral deposits in market conditions. *Resursovosproizvodyashchie, malootkhodnye i prirodookhrannye tekhnologii osvoeniya nedr: sb. tr.* [Resource-reproducing, low-waste and environmental protection technologies for the development of subsoil assets: Proceedings]. Moscow: Publishing House of Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 2002, pp. 277-279. (In Russ.)

10. Mamaev Yu.A., Litvintsev V.S. Classification of technology-related placer deposits. *Zakonomernosti stroeniya i evolyutsii geosfer: sb. st.* [Regularities of the structure and evolution of geosphere: Collection of papers]. Khabarovsk, 1996, pp. 40-43. (In Russ.)
11. Murzin N.V., Talgamer B.L. To the systematization of technology-related placers. *Ratsionalnoe osvoenie nedr* [Mineral Mining and Conservation], 2021, no. 2, pp. 18-23. (In Russ.)
12. Prokhorov D.O., Kukhar V.D., Sarychev V.I., Podkolzin A.A. Improving the classification of technology-related mineral formations. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Nauki o zemle* [News of Tula State University. Earth Sciences], 2021, no. 4, pp. 501-512. (In Russ.)
13. Makarov V.A., Samorodsky P.N. Currently relevant issues of evaluation and development of technology-related gold deposits. *Zoloto i tekhnologii* [Gold and Technologies], 2018, no. 4, pp. 82-96. (In Russ.)
14. Tishchenko E.I., Miledin I.V. Development of a program for the reassessment of technology-related dumps of gold mining in the Lensky gold-bearing region. *Fondovaya literatura FGBU «Rosgeolfond po Irkutskoy oblasti i Ust-Ordynskomu Buryatskomu AO»* [Fund literature of Federal State Budgetary Institution Rosgeolfond for the Irkutsk Region and the Ust-Orda Buryat Autonomous Region]. Irkutsk: East Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Raw Materials, 2000, inventory no. 16467, 84 p. (In Russ.)
15. Kotkin V.V., Tishchenko E.I. Predictive and prospecting work on the assessment of the predicted resources of technology-related dumps, placers with thin and fine gold in the Lena industrial and mining region. *Fondovaya literatura FGBU «Rosgeolfond po Irkutskoy oblasti i Ust-Ordynskomu Buryatskomu AO»* [Fund literature of Federal State Budgetary Institution Rosgeolfond for the Irkutsk Region and the Ust-Orda Buryat Autonomous Region]. Irkutsk: Irkutskgeofizika, 2008, inventory no. 17315, 546 p. (In Russ.)
16. Prokopiev S.A., Prokopiev E.S., Kadesnikov I.V., Cherimichkina N.A. Current methods of mining technology-related placer gold deposits with the technology of extracting fine gold. *Nauki o Zemle i nedropolzovanie* [Earth Sciences and Subsoil Use], 2020, no. 4(43), pp. 458-466. (In Russ.)
17. Ivanov P.O., Kadesnikov I.V. Extraction of fine and thin placer gold with screw separators. *Zolotodobycha* [Gold Mining], 2021, no. 276, pp. 19-22. (In Russ.)
18. Movchan A.F., Bolotin M.L., Kadesnikov I.V. Experience in mining technology-related (dredging tailings) dumps of the Yurskoye placer deposit, the Republic of Sakha (Yakutia). *Zoloto i tekhnologii* [Gold and Technologies], 2020, no. 4 (500), pp. 86-92. (In Russ.)
19. Zarovnyaev A.N., Ivanov P.O., Bolotin M.L., Kadesnikov I.V. Practical results of the implementation of the enrichment module with the screw enrichment technology at the Nagorny Placer Mine of LLC ANZHU. *Zolotodobycha* [Gold mining]. Available at: <https://zolotodb.ru/article/12464>.
20. Neronsky G.I., Borodavkin S.I. Methods for mining technology-related gold placers. *Mineralogiya tekhnogeneza* [Mineralogy of Technogenesis], 2009, no. 10, pp. 76-87. (In Russ.)
21. Neronsky G.I., Borodavkin S.I. The scale of placers with fine and thin gold and the prospects for their development. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)* [Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)], 2010, no. S4, pp. 518-529. (In Russ.)
22. Surkov A.V., Akhapkin A.A. The problem of extracting fine and thin gold during the development of placers and technology-related dumps. *Tsvetnye metally* [Non-Ferrous Metals], 2003, no. 1, pp. 13-16. (In Russ.)
23. Kavchik B.K. Evaluation of resources and reserves of gold in technology-related placers: the report on research. *Fondovaya literatura FGBU «Rosgeolfond po Irkutskoy oblasti i Ust-Ordynskomu Buryatskomu AO»* [Fund literature of Federal State Budgetary Institution Rosgeolfond for the Irkutsk Region and the Ust-Orda Buryat Autonomous Region]. Irkutsk: OJSC Irgiredmet, 2000, inventory no. 16643, 72 p. (In Russ.)
24. Kavchik B.K. Technology-related placers with coarse gold. *Zolotodobycha* [Gold Mining], 2003, no. 55. Available at: <https://zolotodb.ru/article/326>
25. Lunyashin P.D. Problems of development of technology-related deposits and unknown stock. *Zoloto i tekhnologii* [Gold and Technologies], 2021, no. 3. Available at: <https://zolteh.ru/ekspluatatsiya-mestorozhdeniy/problemy-otrabotki-tekhnogennykh-mestorozhdeniy-i-neuchtyennykh-zapasov/>
26. Meledin I.V. Practical results on washing of technology-related dumps of past years in the valley of the Khomolkho River. *Zolotodobycha* [Gold Mining], 2010, no. 137, pp. 22-27. (In Russ.)
27. Benedyuk P.F., Eroshenko S.I., Benedyuk T.F. Once again about the fine gold of technology-related placers using the deposit of the Khomolkho River as an example. *Zolotodobycha* [Gold Mining], 2020, no. 255, pp. 18-21. (In Russ.)
28. Order of the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation No. 278 dated December 11, 2006 "On Approval of the Classification of Reserves and Inferred Resources of Solid Minerals". Registered in the Ministry of Justice of the Russian Federation on December 25, 2006, registration No. 8667.
29. Oveshnikov Yu.M., Bolshakov A.I. Some results of research on completeness of mining of placer deposits by dredges. *Razrabotka rossypanykh mestorozhdeniy* [Development of placer deposits]. Moscow: Russian State University for Geological Prospecting (MRGRI), 1987, pp. 67-71. (In Russ.)

30. Zhuchenko E.T., Talgamer B.L., Zhuchenko E.E. On the issue of dredge development of technology-related placers. *Problemy osvoeniya mineralnoy bazy Vostochnoy Sibiri: sb. nauch. tr.* [Problems of development of the mineral base of Eastern Siberia: Collection of papers]. Irkutsk, 2007, pp. 5-8. (In Russ.)
31. Talgamer B.L., Chemezov V.V., Neretin A.V., Dementiev S.A. Evaluation of diamond losses during dredge mining of placers. *Problemy razvitiya mineralnoy bazy Vostochnoy Sibiri: sb. nauch. tr.* [Problems of development of the mineral base of Eastern Siberia: Collection of papers]. Irkutsk, 2003, pp. 44-48. (In Russ.)
32. Mamaev Yu.A., Van-Van-E A.P., Sorokin A.P., Litvintsev V.S., Pulyaevskii A.M. *Problemy ratsionalnogo osvoeniya zolotorossypanykh mestorozhdeniy Dalnego Vostoka (geologiya, dobycha, pererabotka): monografiya* [Problems of rational development of gold-placer deposits in the Far East (geology, mining, processing); monograph]. Vladivostok: Dalnauka, 2002, 200 p. (In Russ.)
33. Zhuchenko E.T., Talgamer B.L., Leshkov V.G., Dubinin V.F. *Sposoby povtornoy drazhnoy razrabotki tekhnogennoy rossypi* [Methods for repeated dredge development of technology-related placers]. Patent RU, no. 2215875, 2003.
34. Chemezov V.V. *Sposob razrabotki rossypi v usloviyakh povtornogo dragirovaniya* [A method for the development of placers by repeated dredging]. Author's Certificate USSR, no. 1097797, 1984.
35. Chemezov V.V. *Sposob razrabotki rossypi v usloviyakh povtornogo dragirovaniya* [A method for the development of placer under conditions of repeated dredging]. Author's Certificate USSR, no. 1263849, 1986.
36. Makhnev A.N., Talgamer B.L. *Sposob drazhnoy razrabotki rossypanykh mestorozhdeniy* [A dredging method for placer deposits]. Author's Certificate USSR, no. 1694901, 1991.
37. Shemyakin S.A., Mamaev Yu.A., Ivanchenko S.N. *Novye tekhnologii otkrytoy razrabotki mestorozhdeniy* [New technologies for open pit mining]. Khabarovsk: Amur Geographical Society, 2003, 129 p. (In Russ.)
38. Babi Yu.A., Moskalevich V.I., Pyatakov V.G. Technical and economic performance of mining and handling equipment determined on the basis of data received by a remote method. *Zolotodobycha* [Gold Mining]. Available at: <https://zolotodb.ru/article/12795>.
39. Instructional guidelines for the feasibility study of conditions for calculating the reserves of deposits of solid minerals (other than coals and oil shale) approved by Order of the Ministry of Natural Resources of Russia No. 37-r dated June 05, 2007.
40. Pyatakov V.G., Talgamer B.L. Prospects for the development of the dredging method for mining of placer deposits. *Ruda i metally* [Ore and Metals], 2019, no. 12, pp. 35-38. (In Russ.)
41. Shorokhov S.M. The first Soviet mobile gold washing machines for excavation of placers. *Sovetskaya zolotopromyshlennost* [Soviet Gold Industry], 1935, no. 3-4, pp. 27-29. (In Russ.)
42. Afanasiev P.Yu., Trubnikov N.B. *Vitok zolotoy spirali* [Turn of the golden spiral]. Blagoveshchensk, 2008, 383 p. (In Russ.)
43. Nevsky B.V. Floating gold washer in Mindanao. *Giprozoloto. Zolotaya promyshlennost* [State Institute for Designing Gold and Platinum Mining Plants. Gold Industry], 1940, no. 5-6. (In Russ.)
44. Kavchik B.K. New technologies for placer gold mining. *Zolotodobycha* [Gold Mining], 2016, no. 212. Available at: <https://zolotodb.ru/article/11485>.
45. Cheremenov S.A. Experience in the use of mobile washing complexes developed by the specialists of JSC Solovievsky Gold Mine. *Zolotodobycha* [Gold Mining], 2017, no. 220. Available at: <https://zolotodb.ru/article/11610/?page=all>.
46. Cheremenov S.A. The Solovievsky Gold Mine: 150 years of gold mining and today's realities. *Zolotodobycha* [Gold Mining], 2018, no. 230. Available at: <https://zolotodb.ru/article/11843>.
47. Forty Mile Placers Inc., Yukon. Placer gold dredging using an excavator and a floating processing plant. Placer Gold Mining Methods Report (Funded by the Canada/Yukon Economic Development Agreement (YEDA)), 1993, 53 p.
48. Forty Mile Placers Inc., Yukon. Testing the viability of floater dredging in frozen ground. Placer Gold Mining Methods Report (Funded by the Canada/Yukon Economic Development Agreement (YEDA)), 1995, 25 p.
49. Fully detailed account of using a pontoon-based floating New Zealand wash-plant (trommel, hydraulic rifles and rear stacker conveyor), fed by a land-based hydraulic excavator. Placer Gold Mining Methods Report. Available at: www.geology.gov.yk.ca.
50. Danny Walker. Placer gold mining in Mongolia – the New Zealand way. *World Placer Journal*, 2, 26-29 (2001).
51. Robin Grayson. BAT - Best Available Techniques for placer gold miners. *The Gold Miner's Book*, 17-28 (2017).

Поступила 29.06.2022; принята к публикации 17.08.2022; опубликована 26.09.2022
Submitted 29/06/2022; revised 17/08/2022; published 26/09/2022

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

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

УДК 504.05

DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-3-77-86



ПЛАНИРОВАНИЕ ПОРОЖДЕНИЯ ОТХОДОВ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА В APQR-ПРОЕКТАХ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА НОВОГО ИЗДЕЛИЯ

Сафарова Л.Р.

Набережночелнинский институт (филиал) Казанского (Приволжского) федерального университета,
Набережные Челны, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Сформулировано определение понятия «попутный продукт». Предложена концепция управления законченным комплексом видов порождаемых в производстве продуктов на основе подробного планирования их жизненных циклов в ходе подготовки производства нового товарного продукта. Наряду с характеристиками нового изделия разработана методика расчета динамики объемов порождения всех видов отходов в каждой технологической операции. Приведена систематизация видов отходов и формализован их жизненный цикл. Разработан документооборот. Приведены примеры расчета объемов образования потенциально опасного для персонала эмульсола и неопасного, но образующегося постоянно в значительных объемах попутного продукта, – стружки в каждом процессе выполнения производственного задания. Для потенциально опасных попутных продуктов приведена карта технологического его жизненного цикла, позволяющая обеспечить управляемые условия их удаления с рабочих мест. Приведен пример графика удаления попутных продуктов, образующихся в результате выполнения производственного задания обработки корпусов фильтров. **Используемые методы.** Функционально-структурная дифференциация производственных процессов, инвентаризация отходов и выбросов. **Новизна.** Предложен термин «попутный продукт», объединяющий все виды отходов, выбросов, сбросов и загрязнений производственных процессов. Процесс расчета объемов попутных продуктов интегрирован в APQR-процесс подготовки производства нового автокомпонента. **Результат.** Интеграция расчетов объемов значимых попутных продуктов технологических процессов позволяет улучшить планирование процессов их жизненного цикла, снизить экологические риски персонала. **Практическая значимость.** Планирование процессов удаления попутных продуктов на основе расчета объемов их порождения в зависимости от структуры, содержания и параметров процесса формообразования резанием деталей машин.

Ключевые слова: экологический менеджмент, APQR-процесс подготовки производства, отходы, планирование объемов отходов, мониторинг жизненного цикла

© Сафарова Л.Р., 2022

Для цитирования

Сафарова Л.Р. Планирование порождения отходов и разработка технологии их жизненного цикла в APQR-проектах подготовки производства нового изделия // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №3. С. 77-86. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-3-77-86>



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

PLANNING WASTE GENERATION AND DEVELOPING THE TECHNOLOGY FOR THE LIFE CYCLE IN APQP PROJECTS FOR THE PREPARATION OF MANUFACTURING A NEW PRODUCT

Safarova L.R.

Naberezhnye Chelny Institute (Branch) of Kazan (Volga Region) Federal University, Naberezhnye Chelny, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The paper contains a definition of the concept of an “associated product”. The author proposed the concept of managing a complete complex of types of products generated, when manufacturing products, based on the detailed planning of their life cycles during the production preparation of a new marketable product. Along with the characteristics of the new product, a method has been developed to calculate the trend in the volume of generation of all types of waste in every technological operation. Types of waste are systemized and their life cycle is formalized. The document flow has been developed. The paper describes the examples of calculating the volume of a cutting emulsion, potentially hazardous for personnel, and significant volumes of associated product, chips, which are non-hazardous, but constantly accumulated in every process of performing a production task. Regarding potentially hazardous associated products, the author provides a technology map of the life cycle, providing for controlled conditions for their removal from workplaces. The paper contains an example of a schedule for removing associated products resulting from machining filter housings. **Methods Applied.** Functional and structural differentiation of production processes, inventory of waste and emissions. **Originality.** The author proposes the term of an “associated product”, combining all types of waste, emissions, discharges and pollution as a result of production processes. Calculation of associated product volumes is integrated into the APQP pre-production process for a new automotive component. **Result.** Integrated calculation of significant associated product volumes, resulting from technological processes, contributes to improved planning of processes of their life cycle and reduced environmental risks for personnel. **Practical Relevance.** It consists in planning the processes of removal of associated products based on the calculated production volumes, depending on the structure, content and parameters of the shaping process by cutting machine parts.

Keywords: environmental management, APQP pre-production process, waste, waste volume planning, life cycle monitoring

For citation

Safarova L.R. Planning Waste Generation and Developing the Technology for the Life Cycle in APQP Projects for the Preparation of Manufacturing a New Product. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 3, pp. 77-86. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-3-77-86>

Введение

На протяжении десятков тысяч лет развития человечества длилась эпоха примитивных технологий. Их возможности едва-едва позволяли получить нужные объемы продуктов для удовлетворения насущных потребностей людей, а все прочие результаты производства (в том числе отходы) рассматривались лишь как неизбежное приложение к желаемому результату. С тех пор технологическое могущество человека многократно возросло. Однако при подготовке производства специалисты по-прежнему подробно разрабатывают технологии жизненного цикла только для товарного продукта.

Меж тем в ряде отраслей производства объемы отходов стали являться значимым фактором изменения природной среды. Для валового расчета объемов отходов или выбросов при оформлении экологического паспорта предприятия к

настоящему времени нарабатаны методики и развиты базы данных [1-7]. В уменьшении воздействия производственных предприятий на природную среду сегодня нередко заинтересовано больше людей, чем в их товарной продукции, а по мере истощения природных ресурсов ими станет практически все население планеты. Поэтому очевидно, что оценка результативности и эффективности производственной деятельности должна включать учет последствий полного комплекса входящего в нее процессов.

Качество товарных продуктов предприятия закладывается в ходе подготовки их производства. Чтобы на практике иметь возможность адекватно прогнозировать и оценивать значимость любых порождаемых в производстве видов продуктов, планирование и детальную подготовку производства очередного товарного продукта необходимо дополнить столь же тщательной разработкой процессов их жизненного

цикла всех порождаемых продуктов. Для этого требуется создание универсальной методики моделирования технологий, из которых состоит жизненный цикл материального продукта, а также процессов деятельности на рабочем месте.

Полученные результаты и их обсуждение

Каждый природный процесс (разлив реки; колебание листа на дереве под действием ветра; возгорание сухой травинки под лучом солнца, сфокусированным каплей росы) по своей сути представляет собой последовательность мгновенных актов взаимодействия друг с другом множества отдельных пар сущностей, обусловленную сложившимися внешними условиями. В этих процессах отсутствуют целенаправленные воздействия. Они неуправляемы.

Чтобы получить в промышленных масштабах нужное количество продукта требуемого качества, с нужной производительностью, при заданном нормативе расхода ресурсов, человек создает искусственные процессы – запланированные технологии и управляемые процессы с иерархической структурой. Для этого он использует наиболее подходящие для этого комбинации природных способов взаимодействия нужных ему сущностей (механических, химических, тепловых и прочих) путем их упорядоченного протекания в искусственных технологических системах. Совершенствуется технология подготовки подходящего сырья. Технологические системы становятся достаточно сложными, состоящими из автономно управляемых модулей. До поры до времени человек пренебрегает побочными для него взаимодействиями структурных элементов этих модулей, считая их малозначительными. Однако они также порождают массу новых продуктов, характеристики которых определяются условиями, созданными для получения товарного продукта. Предложено ввести новое понятие – попутный продукт. Это объем какого-либо элемента природной среды, твердого тела, жидкости, газа, излучения, обязательно порождаемого при реализации технологий жизненного цикла товарного продукта и всех значимых процессов деятельности организации.

В данной работе в отдельных элементах технологии производства материальной продукции объектов рассматривается как порождение множества сопутствующих видов продуктов, в качестве которых могут быть заинтересованы те или иные группы лиц. Для примера взята одна из наиболее развитых технологий – формообразование с требуе-

мой точностью и качеством поверхности будущей детали машины обработкой резанием. Она построена на механическом воздействии одного твердого тела (инструмента) на другое (материал заготовки) в ходе их перемещения относительно друг друга по заданным траекториям. Суть процесса заключается в том, что с заготовки необходимо снять слой лишнего металла (припуск).

Формообразующий элемент инструмента создает характеристики поверхностного слоя детали. Путем приращения создаваемых элементарных площадок срезаемый припуск превращается в элементы стружки – отхода материала. Еще один попутный продукт – частицы износа контактных площадок режущей части инструмента. На шлифовальных операциях эти отходы инструмента (абразивную пыль) приходится принудительно собирать.

Под воздействием высокой температуры атомы элементарных участков поверхностей стружки и режущего клина в зоне контакта интенсивно окисляются. Прочность окислов невелика, их микрообъемы легко стираются с поверхностей резца и уносятся со стружкой или рассеиваются в воздушной среде. Вследствие высокой степени деформации отделяемого металла выделяется огромное количество теплоты в зоне резания, развиваются температуры в сотни градусов Цельсия. Этот попутный продукт приходится отводить смазочно-охлаждающей жидкостью (СОЖ). При взаимодействии с горячим металлом частицы жидкости испаряются, образуя аэрозоли. Комплекс порождаемых продуктов показан на **рис. 1**.

Технологическая машина (станок) обеспечивает рабочие движения. Поддержание требуемых условий рабочего процесса осуществляется, например, приводами подачи и главного движения, механизмами позиционирования. Взаимодействие каждой пары сопряженных деталей (например, зубчатых колес) передаче крутящего момента порождает продукты износа и окисления материала. До смены отработанного масла они находятся внутри корпуса и вроде бы нас не интересуют. Но когда она наступает, мы получаем уже зримый объем выхода комплексного отхода – отработанную смазочную жидкость. Для этого объема нужно заранее запланировать последующие технологические маршруты и операции его жизненного цикла.

Ряд необходимых условий процесса формообразования поверхности нужно заранее подготовить путем наладки технологической системы и базирования заготовки с требуемой точностью,

а значит, порождения еще каких-то попутных продуктов. Наконец, все модули технологической системы подвергаются процедурам технического обслуживания, например при поддержании чистоты поверхностей станка это загрязненная обтирочная ветошь.

В рассмотренном примере подавляющее большинство попутных продуктов не имеет заметного влияния на окружающую среду, но их недопустимо не замечать. В единой схеме управления деятельностью каждый из них должен найти свое место. Разработаны основные

правила выделения этих процессов. В табл. 1 приведен выход значимых попутных продуктов в циклах деятельности на станочном рабочем месте формообразования деталей резанием. Упорядочены процессы по этапам подготовки производства работ, которые позволяют решать прямые и обратные задачи управления. Их можно использовать для планирования объемов порождения, объемов выхода, а также для планирования технологий жизненного цикла практически всех значимых попутных продуктов. Методика осуществляется в рамках APQP-процесса.

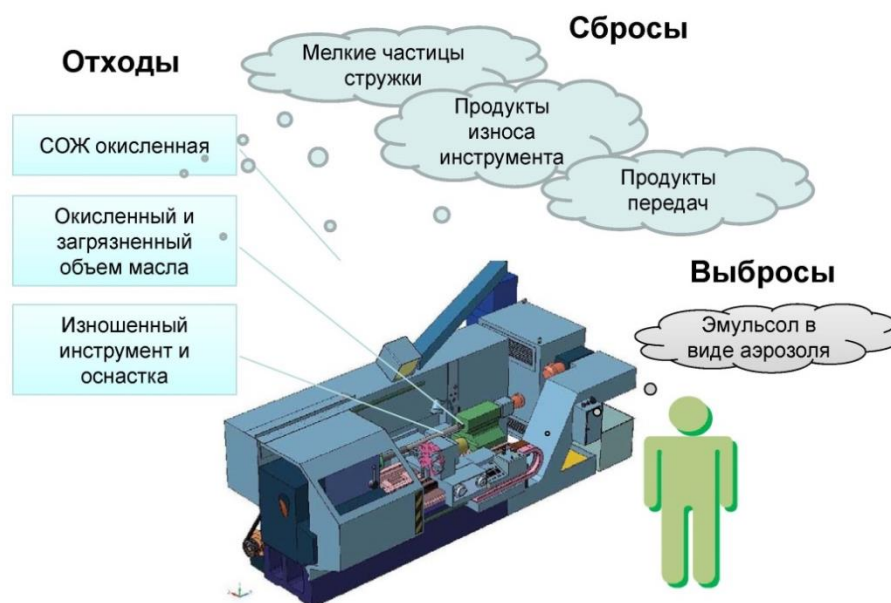


Рис. 1. Основные попутные продукты процесса формообразования деталей машин

Fig. 1. Main associated products of cutting machine parts

Таблица 1. Выход значимых попутных продуктов в циклах деятельности на станочном рабочем месте

Table 1. The output of significant associated products in the cycles of activity at the machine workplace

Содержание цикла	Отходы обрабатываемого материала	Группа продуктов			
		Твердые	Жидкие	Газообразные	Излучения
1. Техническое обслуживание оборудования		Ветошь обтирочная загрязненная Загрязнения твердые	Отработанные смазочные материалы: – СОЖ – промывочные жидкости – гидравлические жидкости – загрязнения жидкие		
2. Производственные операции			Загрязненные моющие жидкости. Брызги СОЖ	Аэрозоли (испарение СОЖ)	Электромагнитное излучение
3. Рабочий процесс	Стружка	Пыль абразивная			Теплота, электромагнитное излучение, шум

Разработаны дополнения к стандартизованным мероприятиям проекта подготовки производства нового товарного продукта. Они представлены в **табл. 2**. APQP-процесс состоит из пяти этапов. Каждый этап сопровождается отдельными видами работ по работе с попутными продуктами.

На этапе 1 по каждому виду продуктов должны быть определены законодательные требования к их качеству и процессу накопления. Так, для токарной операции обработки алюминиевого корпуса фильтра (общая длительность 6,1 мин, 7 технологических переходов) наиболее значимыми отходами являются выбросы эмульсола в виде аэрозоля (ПДК не более 5 мг/м³), наличие алюминиевой пыли в воздухе (ПДК не более 2 мг/м³), а также шум – не более 85 дБ.

На этапе 2 для каждого вида отходов разрабатывается карта потока технологий. В **табл. 3** представлена карта потоков потенциально опасного вещества – эмульсола в виде аэрозоля, возникающего при испарении СОЖ. Ключевая характеристика аэрозоля – предельно допустимая концентрация вещества, а также базовая характеристика процесса – степень герметичности контейнера для хранения отработанного фильтра. Карта потоков включает основные операции

жизненного цикла аэрозоля вплоть до сдачи фильтра на утилизацию.

Чтобы запланировать процессы жизненного цикла всей гаммы порождаемых значимых продуктов, содержание технологии дополнено следующими процедурами:

- интенсивность порождения (возникновения) попутного продукта (в том числе отхода одного вида) в процессе выполнения операции по изготовлению товарного продукта;

- объем выхода попутного продукта – накопленный на рабочем месте его объем, который целесообразно далее перерабатывать;

- жизненный цикл объема попутного продукта – поток технологий от момента его порождения, накопления и выхода до утилизации.

На этапе 3 для основных групп попутных продуктов разработана методика расчета объемов отходов в ходе проектирования технологий производства товарного продукта. Расчет ведется на основе иерархической модели содержания технологии. Элементами модели являются наладочные циклы, операции, обработка в рабочих позициях, технологические переходы, рабочие процессы. Длительность их выполнения нормируется построением временных цепей [8].

Таблица 2. Основные работы по подготовке производства попутных продуктов на этапах APQP-проекта
Table 2. Main operations of preparing the production of associated products at the APQP project stages

Этап	Виды работ по жизненному циклу	
	товарного продукта	планируемых отходов
1. Разработка концепции	Формирование комплекса требований: – законодательных; – заказчиков; – оценка возможностей конкурентов; – оценка собственных возможностей	Формирование базы законодательных требований к качеству потенциальных отходов
2. Проектирование автокомпонента	Разработка технических требований к качеству. Подтверждение выполнения требований путем испытаний опытного образца	Разработка карт потоков технологий жизненного цикла по видам попутных продуктов
3. Разработка процессов	Разработка технологий: – жизненного цикла автокомпонента; – обеспечения рабочих мест ресурсами; – управления и менеджмента	Планирование объемов порождения. Планирование периодичности и объемов выхода. Разработка и документирование технологий жизненного цикла. Разработка заданий по закупке оборудования и средств измерения
4. Окончательная подготовка производства	Верификация результатов подготовки производства. Регистрация значений факторов, влияющих на качество. Разработка планов управления	Регистрация значений показателей качества отходов при выпуске установочной партии. Разработка планов управления
5. Выпуск, поставка, улучшение	Мониторинг качества продукции и стабильности процессов производства	Мониторинг объемов накопления и концентрации отходов, влияющих на здоровье персонала

Таблица 3. Карта потока технологий жизненного цикла выбросов эмульсола в виде аэрозоля
Table 3. Flow map of technologies of the life cycle of cutting emulsion air emissions

Операция 015 Токарная с ЧПУ

Номер операции	Операция жизненного цикла попутных продуктов	Тип операции				Ключевые характеристики отхода или продукта, предельные значения	Ключевые характеристики процесса
		Производство	Перемещение	Хранение	Контроль		
		◆	●	■	▲		
015	Токарная	х				Пыль в рабочей зоне – не более 5 мг/м ³	
015-1	Вентиляционная		х				Производительность вентиляции 20 м ³ /ч
015-2	Фильтровальная			х			
015-3	Контрольная				х		Производительность вентиляции менее 10 м ³ /ч
015-4	Замена фильтра	х					
015-5	Хранение отработанного фильтра			х			Герметичность бака хранения, $t = 20 \pm 5^\circ\text{C}$
015-6	Транспортирование		х				
015-7	Утилизация			х			

По мере проектирования содержания переходов обработки определяются характеристики процессов порождения значимых попутных продуктов. Каждый вид попутного продукта является следствием иерархически вложенных технологических процессов – от производственного задания до отдельного рабочего хода. Рассмотрим пример расчета объемов стружки для каждой составляющей производственного задания (табл. 4). Расчет объема каждого продукта заключается в последовательном суммировании объемов продуктов, порождаемых в элементах производственного задания. Объёмы стружки являются следствием исходной конфигурации припуска заготовки, глубины резания, подачи и скорости. Их принятые значения формируют различные виды скалывания, элементная или сливная стружка с различными собственными параметрами. В рассматриваемом

примере формируется сливная стружка, формирующая ее насыпной объем. Аналогичный подход реализуется и для других попутных продуктов – режущего инструмента, СОЖ, смазочного масла и др. Так, для указанной выше операции суммарная масса стружки, образующейся во всех переходах изготовления обработки 3300 деталей, составляет 267 кг, насыпной объем 1,74 м³.

В результате расчетов на этапе подготовки производства формируется график своевременного удаления всех видов попутных продуктов, пример которого приведен на рис. 2. Изменение режимов резания, материала заготовки, инструмента, оснастки ведет к пересчету объемов попутных продуктов и, соответственно, актуализации плана-графика удаления попутных продуктов для их переработки в последующих операциях. Методика не ставит задачи измене-

ния или проектирования новых способов удаления попутных продуктов с рабочих мест, но при явном несоответствии объемов порождения действующий или проектный способ их удаления может быть изменен на более соответствующий.

Рассмотрим образование попутных продуктов, оказывающих экологическое воздействие на природную среду и рабочий персонал. Норма выброса СОЖ в виде аэрозоля составляет $0,041 \cdot 10^{-5}$ г/кВт мощности двигателя главного движения за одну секунду [1]. Согласно [2] предельно допустимая концентрация составляет 5 мг/м³. В процессе выполнения операции выделяется 2 мг эмульсола. Поскольку рабочая зона станка ориентировочно составляет 2 м³, концентрация в ней аэрозоля составит не более 1 мг/м³. Для гарантированного удаления аэрозоля обменная мощность вентиляции должна составлять не менее 20 м³/ч.

В зависимости от производительности и конструкции вентиляционной системы по этим данным можно планировать периодичность ее включения и выключения для гарантированного удаления вредных загрязнений.

Еще один потенциально опасный продукт – это образующаяся при обработке алюминиевая пыль. По нормативам при обработке алюминиевых сплавов [1] образуется 0,0025 г/с пыли, так что в данном случае ее выделится 0,925 г. Однако применение смазочно-охлаждающей жидкости практически полностью предотвращает распространение пыли на рабочем месте.

Дополнительно специалист планирует и расход ресурсов – потребность в инструменте, трудоемкость оператора и наладчика [9], потребляемую электрическую мощность [10-12]. Результаты расчетов отражаются в комплексе форм приложений к технологической карте операции.

Таблица 4. Пример расчета объемов стружки по структурным составляющим производственного задания на изготовление 3300 деталей

Table 4. Example of the calculation of chip volumes by structural components of the production order for manufacturing 3300 parts

Переход	Рабочий ход	Переход	Позиция	Установ	Операция	Настроечные циклы	Наладочные циклы	Производ- ственное задание
Одновременное сверление 2-х отверстий	381,85 см ³	381,85 см ³	645,84 см ³	645,84 см ³	645,84 см ³	0,048 м ³	0,388 м ³	1,743 м ³
Подрезка торца бобышки	35,85 см ³	35,85 см ³				0,096 м ³		
Растачивание отверстия	10,18 см ³	10,18 см ³				0,24 м ³		
Растачивание отверстия	9,57 см ³	9,57 см ³				0,48 м ³	0,484 м ³	
Растачивание канавки	135,66 см ³	135,66 см ³				0,048 м ³	0,388 м ³	
Развертывание отверстия	67,86 см ³	67,86 см ³				0,096 м ³		
Нарезание резьбы	4,87 см ³	4,87 см ³				0,24 м ³		
						0,48 м ³	0,480 м ³	

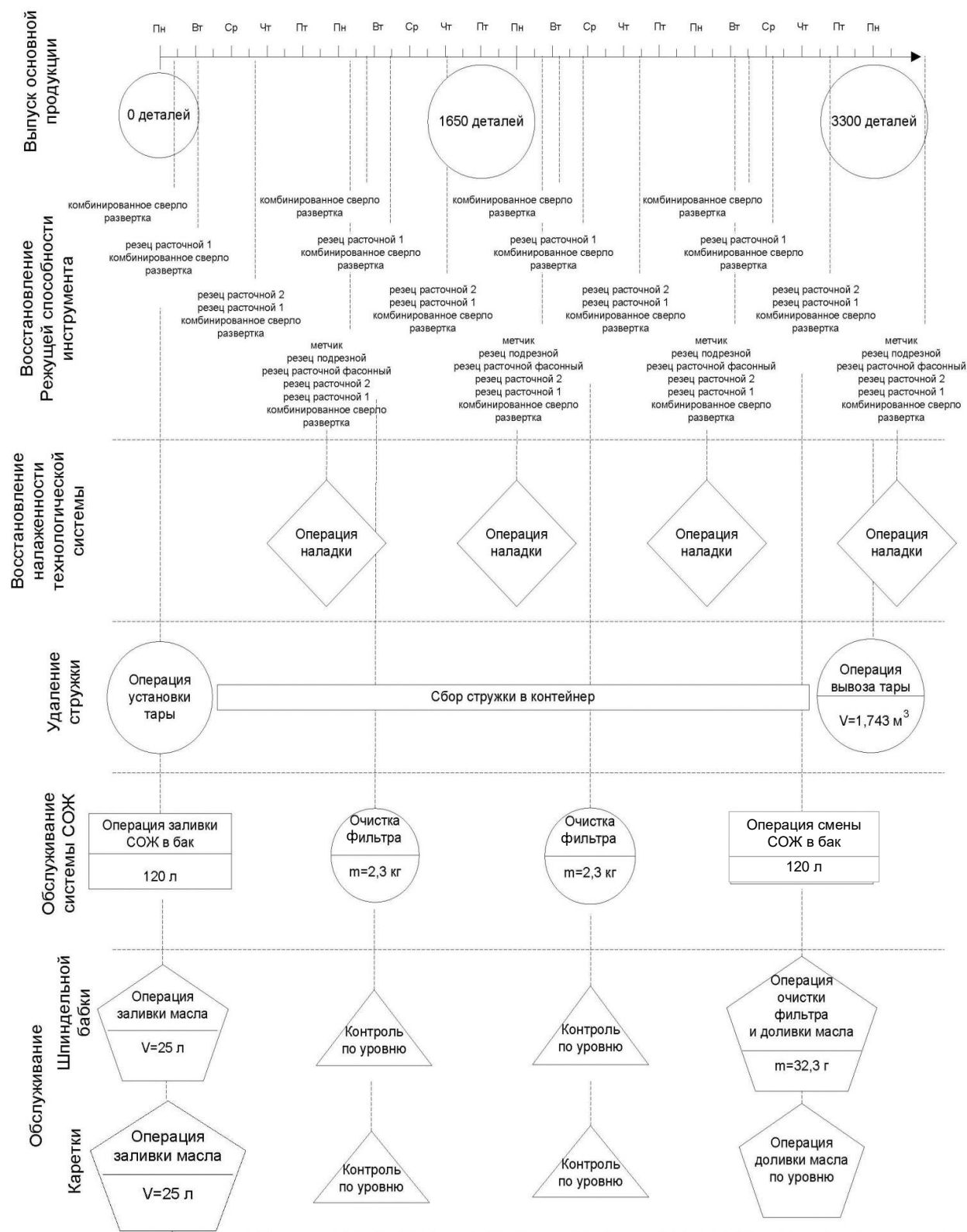


Рис. 2. Схема календарного плана управления выходными материалами токарного рабочего места, оснащенного станком с ЧПУ изготовления корпуса фильтра центробежной очистки масла

Fig. 2. Time schedule design for managing the output materials from a CNC lathe used for manufacturing a filter housing for centrifugal oil cleaning

Заключение

В данной работе представлен общий принцип подготовки информации для управления выпуском всех значимых продуктов на отдельных рабочих местах. Рассмотренный в статье пример не содержит значимых экологических рисков для рабочего персонала и учитывает стандартные требования к выбросам и загрязнениям производственных процессов. Сами по себе ни контрольные карты, ни статистический анализ не позволяют предупреждать появление негативных последствий производственных процессов, реализуемая методика обеспечивает связь измеряемых экологических характеристик с причинами их изменения. Чем более жесткими будут экологические ограничения, тем больше пользы будет от применения разработанной методики, которая позволяет обеспечить объективное планирование объема выхода попутных продуктов в зависимости от содержания технологических процессов, а следовательно, оптимизировать графики их удаления.

Данная методика, конечно, увеличивает трудоемкость подготовки производства. Однако она создает множество новых возможностей управления, чем, например, применение контрольных карт по единичным показателям качества или проведения статистического анализа по случайным выборкам. Ее применение оправдано в процессах обработки деталей автокомпонентов с развитой системой показателей точности – операциях обработки зубчатых колес, ответственных деталей автомобиля с высокими требованиями к точности, например гильзы цилиндра двигателя внутреннего сгорания, головки цилиндра, шаровые наконечники. Безусловно, применение методики востребовано на этапе технологической подготовки в производствах со значимым воздействием на природную среду (литье, горячая штамповка, окраска, нанесение гальванических покрытий, термообработка и пр.). Попутные продукты этих процессов оказывают большее воздействие на рабочий персонал.

Предусмотрено встраивание методики в процесс подготовки производства автомобильных автокомпонентов в соответствии с требованиями стандартов ИСО для обеспечения одобрения производства потребителем.

Планирование и мониторинг жизненных циклов всех видов продукции производства позволяет:

- анализировать достаточно широкую гамму

последствий деятельности производства еще на стадии конструирования изделия и разработки технологий;

- в кратчайшие сроки определить причину превышения объема или ПДК каждого попутного продукта и оперативно уменьшить его до нормативных значений;

- планировать выполнение процессов по этапам жизненного цикла отходов и попутных продуктов;

- в конечном счете создать систему менеджмента всеми видами продуктов производства вместо локальных систем, сертифицируемых, например, в соответствии с [13, 14].

Показана возможность перехода к тотальному управлению всеми видами продукции путем поэтапного дополнения процессов подготовки производства товарного продукта процедурами разработки потоков технологий по жизненному циклу попутных продуктов, начиная с наиболее значимых.

Список источников

1. ГОСТ 32602-2014. Правила расчета выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при механической обработке металлов на основе удельных показателей. М.: Стандартинформ, 2014. 22 с.
2. ГОСТ 56167-2014. Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу. Метод расчета ущерба от промышленного предприятия объектам окружающей среды. М.: Стандартинформ, 2014. 18 с.
3. Квашнин И.М. Промышленные выбросы в атмосферу. Инженерные расчеты и инвентаризация. М.: ООО ИПВ «АВОК-ПРЕСС», 2005. 389 с.
4. Колобов Г.А., Бредихин В.Н., Чернобаев В.М. Сбор и обработка вторичного сырья цветных металлов. М.: Металлургия, 1992. 288 с.
5. СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки. Санитарные нормы. М.: Изд-во стандартов, 1996. 15 с.
6. Алексеенко А.В. Сбор и переработка стружки. М.: Машиностроение, 1980. 120 с. ил.
7. ГОСТ Р 51814.6-2005. Менеджмент качества при планировании, разработке и подготовке производства автомобильных компонентов. М.: Изд-во стандартов, 2005. 68 с.
8. Сафарова Л.Р., Глинина Г.Ф. Затраты времени как основа расчета объемов попутных продуктов, отходов и выбросов в операциях формообразования // Вестник СГТУ. 2013. №2 (71). С. 91-93.
9. Кондрашов А.Г., Сафаров Д.Т., Юрасова О.И. Особенности планирования трудоемкости технологических операций в современном автомобилестроении // Теория и практика общественного развития. 2014. № 16. С. 72-76.

10. Safarov D.T., Kondrashov A.G., Glinina G.F., Safarova L.R. Algorithm of calculation of energy consumption on the basis of differential model of the production task performed on machines with computer numeric control (CNC) IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 240 (2017), 012060, doi: 10.1088/1757-899X/240/1/012060
11. Safarov D.T., Kondrashov A.G., Safarova L.R., and Glinina G.F. Energy Planning in Production Shops with Numerically Controlled Machine Tools Russian Engineering Research, 2017, vol. 37, no. 9, pp. 827-834.
12. Планирование энергетических затрат в производственных заданиях обработки деталей на станках с ЧПУ / Д.Т. Сафаров, А.Г. Кондрашов, Л.Р. Сафарова, Г.Ф. Глинина // СТИН. 2017. №4. С. 27-35.
13. ISO 14001:2015. Systèmes de management environnemental – Exigences et lignes directrices pour son utilisation.
14. ISO 16949:2016. Quality management systems. Particular requirements for the application of SO 9001:2015 for automotive production and relevant service part organizations Examples taken from published papers.
- Sanitarnye normy [Noise at workplaces, in residential, public buildings and residential development. Sanitary Regulations]. Moscow: Publishing House of Standards, 1996, 15 p. (In Russ.)
6. Alekseenko A.V. *Sbor i pererabotka struzhki* [Chip collection and processing]. Moscow: Mechanical Engineering, 1980, 120 p. (In Russ.)
7. GOST R 51814.6-2005 *Menedzhment kachestva pri planirovanii, razrabotke i podgotovke proizvodstva avtomobilnykh komponentov* [Quality management in planning, development and preparation of production of automotive components]. Moscow: Publishing House of Standards, 2005, 68 p. (In Russ.)
8. Safarova L.R., Glinina G.F. Time costs as a basis for calculating the volumes of associated products, waste and emissions in shaping operations. *Vestnik SGTU* [Vestnik of Saratov State Technical University], 2013, no.2 (71), pp. 91-93. (In Russ.)
9. Kondrashov A.G., Safarov D.T., Yurasova O.I. Features of planning the complexity of technological operations in the modern automotive industry. *Teoriya i praktika obshchestvennogo razvitiya* [Theory and Practice of Social Development], 2014, no. 16, pp. 72-76. (In Russ.)
10. Safarov D.T., Kondrashov A.G., Glinina G.F., Safarova L.R. Algorithm of calculation of energy consumption on the basis of differential model of the production task performed on machines with computer numeric control (CNC). IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 240, 012060 (2017). DOI: 10.1088/1757-899X/240/1/012060
11. Safarov D.T., Kondrashov A.G., Safarova L.R., Glinina G.F. Energy planning in production shops with numerically controlled machine tools. Russian Engineering Research, 37, 9, 827–834 (2017).
12. Safarov D.T., Kondrashov A.G., Safarova L.R., Glinina G.F. Planning power consumption in production orders of machining parts on CNC machines. *STIN* [Machines and Tools], 2017, no. 4, pp. 27-35. (In Russ.)
13. ISO 14001:2015 Systèmes de management environnemental – Exigences et lignes directrices pour son utilisation.
14. ISO 16949:2016. Quality management systems. Particular requirements for the application of SO 9001:2015 for automotive production and relevant service part organizations. Examples taken from published papers.

References

1. GOST 32602-2014 *Pravila rascheta vybrosov zagryaznyayushchikh veshchestv v atmosferu pri mekhanicheskoy obrabotke metallov na osnove udelnykh pokazatelei* [Rules for calculating air emissions of pollutants during metal machining based on specific indicators]. Moscow: Standartinform, 2014, 22 p. (In Russ.)
2. GOST 56167-2014 *Vybrosy zagryaznyayushchikh veshchestv v atmosferu. Metod rascheta ushcherba ot promyshlennogo predpriyatiya obektam okruzhayushchey sredy* [Air emissions of pollutants. Method of calculating damage from an industrial enterprise to environment]. Moscow: Standartinform, 2014, 18 p. (In Russ.)
3. Kvashnin I.M. *Promyshlennye vybrosy v atmosferu. Inzhenernye raschety i inventarizatsiya* [Industrial air emissions. Engineering calculations and inventory]. Moscow: LLC AVOK-PRESS, 2005, 389 p. (In Russ.)
4. Kolobov G.A., Bredikhin V.N., Chernobaev V.M. *Sbor i obrabotka vtorichnogo syrya tsvetnykh metallov* [Collection and processing of secondary raw materials of non-ferrous metals]. Moscow: Metallurgy, 1992, 288 p. (In Russ.)
5. Sanitary Regulations SN 2.2.4/2.1.8.562-96 *Shum na rabochikh mestakh, v pomeshcheniyakh zhilykh, obshchestvennykh zdaniy i na territorii zhiloy zastroyki*.

Поступила 04.05.2022; принята к публикации 06.07.2022; опубликована 26.09.2022
Submitted 04/05/2022; revised 06/07/2022; published 26/09/2022

Сафарова Лейля Ринатовна – аспирант,
Набережночелнинский институт (филиал) Казанского (Приволжского) федерального университета,
Набережные Челны, Россия. Email: leila-r.85@mail.ru. AuthorID (SCOPUS): 57196279310

Leylya R. Safarova – postgraduate student,
Naberezhnye Chelny Institute (Branch) of Kazan (Volga Region) Federal University, Naberezhnye Chelny, Russia.
Email: leila-r.85@mail.ru. AuthorID (SCOPUS): 57196279310

ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ MATERIAL PROCESS ENGINEERING

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

УДК 662.63

DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-3-87-93



АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА КАЧЕСТВО ТОПЛИВНЫХ БРИКЕТОВ

Муллина Э.Р., Мишурина О.А., Бессонова Ю.А., Басков В.А., Гамиров Д.Р., Волкова Д.В.,
Жамбуршина К.Б.

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

Аннотация. Данная статья посвящена изучению вопроса производства топливных брикетов из растительного сырья. В работе рассмотрено актуальное состояние данного сегмента рынка в России, странах Европы и США. Изучены причины, обуславливающие значительную востребованность данного вида топлива. На основании представленного анализа установлено, что топливные брикеты превосходят традиционную древесину по таким качественным показателям, как теплотворная способность, время горения, плотность, а также характеризуются существенно более низким содержанием влаги и летучих веществ, при этом являются экологически безопасным видом топлива, позволяющим решать проблему утилизации отходов деревообрабатывающих и сельскохозяйственных предприятий. Установлены виды растительного сырья, применяемого для производства топливных брикетов. Проведен сравнительный анализ основных технологических показателей топливных брикетов, полученных из различных природных материалов. Рассмотрена технология производства брикетированного сырья. Изучены основные способы прессования: гидравлический, ударно-механический и шнековый. Установлено влияние способа прессования на качество готовой продукции. Отмечено, что брикеты, полученные в результате гидравлического и ударно-механического прессования, характеризуются низкими физико-механическими показателями, что существенно ограничивает сроки их хранения и дальность перевозок. Эти обстоятельства обуславливают их низкую стоимость и невысокий спрос на данную продукцию. Показано, что наиболее целесообразным является использование шнекового прессования, которое позволяет получить топливные брикеты высокого качества, стойкие к механическим воздействиям, перевозкам и длительному хранению. Исследование технологических аспектов получения топливных брикетов показало, что высокое качество данного вида продукции достигается благодаря нагреву, который способствует выделению лигнина, выполняющего функцию межволокнутого связующего материала, что в итоге приводит к повышению их физико-механических показателей и, как следствие, к значительному расширению области их применения.

Ключевые слова: топливные брикеты, растительное сырье, теплотворная способность, зольность, влажность, прессование, гидравлический способ, ударно-механический способ, шнековый способ

© Муллина Э.Р., Мишурина О.А., Бессонова Ю.А., Басков В.А.,
Гамиров Д.Р., Волкова Д.В., Жамбуршина К.Б., 2022

Для цитирования

Анализ факторов, влияющих на качество топливных брикетов / Муллина Э.Р., Мишурина О.А., Бессонова Ю.А., Басков В.А., Гамиров Д.Р., Волкова Д.В., Жамбуршина К.Б. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №3. С. 87-93. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-3-87-93>



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

ANALYSIS OF FACTORS INFLUENCING THE QUALITY OF FUEL BRIQUETTES

Mullina E.R., Mishurina O.A., Bessonova Yu.A., Baskov V.A., Gamirov D.R., Volkova D.V., Zhamburshina K.B.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. This paper is devoted to the study on the production of fuel briquettes from vegetable raw materials. It describes the current state of this market segment in Russia, European countries and the USA, and studies on the reasons for a significant demand for this type of fuel. Based on the presented analysis, it was found that fuel briquettes surpassed traditional wood in such qualitative indicators as calorific value, burning time, density, and were also characterized by a significantly lower moisture content and volatiles. They are an environmentally safe type of fuel, contributing to solving the problem of waste disposal of woodworking and agricultural enterprises. The authors determined types of vegetable raw materials used for the production of fuel briquettes and carried out a comparative analysis of the main technological indicators of fuel briquettes produced from various natural materials. The paper describes a production process of briquetted raw materials. The authors studied main pressing methods: hydraulic, mechanical stamping and screw ones, and determined how a pressing method influenced the quality of finished products. It is noted that briquettes produced by hydraulic and mechanical stamping methods are characterized by low physical and mechanical parameters, which significantly limit their storage time and the range of transportation. These circumstances determine their low cost and low demand for these products. It is shown that the most feasible method is screw pressing, which makes it possible to produce high-quality fuel briquettes resistant to mechanical impacts, transportation and long-term storage. The study on the technological aspects of the production of fuel briquettes showed that the high quality of this type of product was achieved by heating, promoting the release of lignin, acting as an intercellular binder and ultimately leading to an increase in the physical and mechanical parameters and, as a result, to a significant expansion of their scope of application.

Keywords: fuel briquettes, vegetable raw materials, calorific value, ash content, moisture, pressing, hydraulic method, mechanical stamping method, screw method

For citation

Mullina E.R., Mishurina O.A., Bessonova J.A., Baskov V.A., Gamirov D.R., Volkova D.V., Zhamburshina K.B. Analysis of Factors Influencing the Quality of Fuel Briquettes. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 3, pp. 87-93. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-3-87-93>

Введение

Наблюдающийся в настоящее время непрерывный рост мирового энергопотребления ставит перед человечеством глобальную задачу поиска новых ресурсных потенциалов. При этом увеличение доли использования традиционных энергоресурсов ограничено в силу ряда факторов, таких как снижение объема поставок газа для электроэнергетики, существенное ухудшение качества добываемых углей, негативные экологические последствия строительства и эксплуатации гидроэлектростанций, значительный радиологический риск для населения и окружающей среды при интенсификации атомной энергетики [1]. Совокупность этих обстоятельств обуславливает необходимость вовлечения в переработку возобновляемых, экологически безопасных энергоресурсов.

На сегодняшний день в России уже имеется огромное количество отходов, которые занимая значительные территории, наносят существенный вред окружающей среде, загрязняя почву, воздушный и водный бассейны [2]. Эта проблема может быть решена путем создания эффективных энергосберегающих технологий по переработке отходов лесной и угольной промышленности, сельского хозяйства, которые позволят не только обеспечить комплексное использование сырья, но и существенно снизить экологическую нагрузку.

Возросший в настоящее время спрос на экологически чистое и доступное топливо привел к увеличению производства топливных брикетов на основе использования природных отходов переработки различных отраслей промышленности [3]. В странах Европы и США данный вид производства развивается давно и очень активно, а в России он только начинает набирать обо-

роты. Современный российский рынок биотоплива, в основном, ориентирован на экспорт. Однако в последнее время увеличивается и внутреннее потребление данного вида топлива [4]. Развитию этого сегмента рынка способствует дешевизна и доступность исходного сырья, в качестве которого используют древесные опилки, щепу, солому, шелуху и другие растительные отходы производства.

Полученные результаты и их обсуждение

Востребованность топливных брикетов из природного сырья обусловлена тем, что этот вид топлива по многим характеристикам превосходит обычные дрова. Так, теплотворная способность древесины составляет 2500-2700 ккал/кг, а брикетов – 4500-4900 ккал/кг [5]. Еще одной особенностью топливных брикетов является увеличенное в 1,5-2 раза по сравнению с древесиной время горения, что позволяет существенно экономить на отоплении. При этом брикетированное сырье, в отличие от дров, дает равномерное спокойное пламя на всём промежутке горения [6]. В процессе горения брикетов выделяется меньшее по сравнению с дровами количество сажи, что обусловлено более низким уровнем влажности [7]. Влажность древесины в среднем составляет 15-20%, а влажность брикетов 4-8%, благодаря принудительной сушке [5]. Низкая влажность способствует увеличению теплоотдачи, так как не требуется дополнительного тепла для выпаривания влаги из сырья [6, 7]. Увеличение теплотворной способности брикетов происходит и за счет более высокой плотности брикетированного сырья, которая в среднем в 2 раза превышает аналогичный показатель у дров [5-7]. В свою очередь, повышенная плотность топливных брикетов обеспечивает их высокие физико-механические характеристики. А это означает, что данное сырье является эф-

фективным при транспортировке и хранении. Немаловажным преимуществом брикетированного топлива является и их экологическая безопасность, обусловленная использованием в качестве исходного материала природного растительного сырья без добавления химических реагентов [7]. Помимо этого, производство такого вида топлива решает проблему утилизации отходов деревообрабатывающих и сельскохозяйственных предприятий [6, 7].

Наличие такого широкого спектра преимуществ позволяет прогнозировать увеличение спроса на данный продукт, особенно в России. Это обусловлено не только отсутствием конкуренции в силу недостаточной развитости данного сегмента на отечественном рынке, но и доступностью сырья [4].

В качестве исходного сырья при производстве топливных брикетов могут использоваться отходы деревоперерабатывающей промышленности, торф, солома, отруби, шелуха семян зерновых и злаковых культур, листья и стебли кукурузы. Также в последнее время в качестве сырья применяется макулатура, твердые бытовые отходы и угольная пыль [5, 8]. Исходное сырье существенно влияет на их основные характеристики топливных брикетов, такие как зольность, теплотворная способность, объем сажи, выделяемой при сгорании и т.д. [7].

Брикеты из торфа содержат наибольшее количество вредных примесей и при этом они характеризуются высокой зольностью, поэтому их не рекомендуется применять для отопления частного сектора. Торф в основном используют в печах и котлах промышленного типа, способных работать на топливе низкого качества [7]. Более безопасными считаются брикеты из растительного сырья. Сравнение основных характеристик брикетов из разных природных материалов приведены в **таблице** [5].

Таблица. Сравнительная характеристика топливных брикетов из различных материалов
Table. Comparison of fuel briquettes made from various materials

Материал брикета	Древесные опилки	Солома	Тырса	Шелуха риса	Шелуха семечки
Высшая калорийность, ккал/кг	5043	4740	4400	3458	5161
Низшая калорийность, ккал/кг	4502	3754	4200	3161	4480
Плотность, г/см ³	0,79	1,08	1,37	1,16	1,15
Влажность, %	4,1	7,8	7,5	7,1	2,7
Зольность, %	1,16	7,3	0,7	20,2	3,6

Анализ характеристик брикетов из различных материалов показал, что наибольшей теплотворностью обладают брикеты из шелухи семечек (5161 ккал/кг) и древесных опилок (5043 ккал/кг). При этом они характеризуются невысокой зольностью – 3,60 и 1,16% соответственно. Меньшей калорийностью (4740 ккал/кг) и более высокой зольностью (7,3%) обладают брикеты из соломы. Рисовая шелуха характеризуется самым высоким показателем зольности (20,2%) при относительно невысокой калорийности (3458 ккал/кг) [4, 9].

Проведенный сравнительный анализ различных материалов, используемых при производстве топливных брикетов, свидетельствует о том, что получаемая продукция существенно отличается по всем основным физико-химическим показателям. Данный факт обусловлен тем, что на конечное качество продукта оказывает влияние множество различных факторов, например качество исходного сырья, уровень его подготовки, а также способы хранения готовой продукции и т.д. [7].

Однако наибольшее влияние на качество топливных брикетов оказывает выбор технологии их производства. При этом следует учитывать тот факт, что для производства брикетов из разного сырья может быть использована одна технологическая линия, так как на стадиях прессования и упаковки принципиальных отличий нет. Внесение изменений требуется только на этапе подготовки сырья – измельчении и сушке. Так, отходы деревоперерабатывающего производства требуют предварительной проработки в отличие от шелухи растений [10].

В зависимости от исходного сырья и вида брикетов технологическая цепочка может отличаться, но основными операциями любого процесса брикетирования являются измельчение, сушка, прессование, охлаждение, резка на брикеты, упаковка [4].

Последовательность процессов измельчения и сушки в зависимости от поступающего сырья может быть любой. В некоторых случаях допускается исключение данных операций из технологической цепочки, что может существенно снизить качество готовой продукции, поскольку измельчение улучшает прохождение сырья на всех этапах производства брикетов, а сушка – процесс его прессования.

Основным этапом производства топливных брикетов является прессование, в ходе которого исходный материал под давлением подвергается

нагреву, в результате чего происходит выделение содержащегося в растительном сырье лигнина, что способствует формированию брикета. В случае использования сырья с малым содержанием лигнина в исходную смесь дополнительно вводят связующие (крахмал, целлюлозу, мелассу, глину, декстрины, полисахариды и др.) [11].

После прессования брикет обрезается и поступает на паллеты, где происходит его охлаждение. Затем готовую продукцию упаковывают в полиэтиленовую пленку или пакеты.

Основой любой технологии производства топливных брикетов является процесс прессования. На сегодняшний день используются следующие способы прессования: гидравлический, ударно-механический и шнековый. Все эти способы объединяют общие требования к входящему сырью, которое должно характеризоваться равномерной степенью измельчения и относительной влажностью 8-12% [9].

Гидравлический способ применяется для изготовления брикетов, именуемых как «RUF» [4]. При этом способе прессования производство брикетов осуществляется за счет гидравлического усилия. Оборудование данного типа, выпускаемое различными производителями, имеет широкий диапазон мощностей. Наибольшее распространение получило оборудование фирмы «RUF». Особенностью этого метода является невысокая стоимость оборудования, его надежность и простота в управлении [4]. Однако получаемые данным способом брикеты используются в основном в промышленности, так как имеют фиксированную форму кирпичиков размером 65×95×150 мм. Помимо этого, эти брикеты характеризуются низкой плотностью (0,75-0,8 г/см³) и способностью впитывать влагу из воздуха [5, 7]. Ограниченность использования данной продукции также обусловлена и тем фактом, что она не выдерживает длительного хранения и дальних перевозок [4]. В связи с этим брикеты «RUF» имеют наименьшую стоимость и невысокий спрос относительно других видов топливных брикетов [9].

Вторым, более востребованным и распространенным, является ударно-механический способ изготовления топливных брикетов, именуемых как «Nestro» [4]. Прессование этих брикетов производится за счет ударов поршня, продавливающего исходное сырье через фильеру. Оборудование этого типа различной мощности производится, в основном, в Европе и США [9]. Популярность этого способа производства обусловлена надежностью и неприхотливостью оборудова-

ния, которое позволяет вовлекать в переработку различные виды сырья. При этом механические прессы ударного типа снабжаются дополнительным оборудованием для увлажнения сырья и добавления лигнина. Помимо этого, могут быть установлены системы контроля и управления оборудованием, позволяющие удаленно управлять процессом производства. Это обстоятельство позволяет существенно снизить себестоимость брикетов. Однако качество этой продукции незначительно выше, чем полученной гидравлическим способом. Брикеты «Nestro» изготавливаются в виде цилиндра диаметром 60-90 мм и длиной 50-350 мм [12]. Средняя плотность полученных брикетов составляет 1-1,15 г/см³ [5, 7]. Данный вид брикетов характеризуется низкой влагостойкостью и прочностью, что отрицательно сказывается на транспортировке [4].

Альтернативой первым двум способам производства брикетов является шнековое прессование, которое позволяет получать продукцию более высокого качества. Брикеты, полученные этим способом, называются «Pini&Kaу». Производство брикетов осуществляется посредством продавливания шнеком исходного сырья через нагретые фильеры. К недостаткам данного способа следует отнести более высокие эксплуатационные затраты, чем при использовании гидравлического и ударно-механического прессования. Это обстоятельство обусловлено необходимостью ручного контроля параметров процесса и периодической замены шнека из-за износа его рабочей поверхности [9].

Брикеты Pini&Kaу получили название «карандаши» из-за своей восьмигранной формы. Их размеры составляют 50-80×200-300 мм [12]. Эти брикеты имеют по центру сквозное отверстие, обеспечивающее не только интенсификацию процесса горения, но и позволяющее применять «Pini&Kaу» в топках с низкой тягой. За счёт отверстия, увеличивающего площадь горения, эти брикеты быстрее разгораются и лучше протапливают помещение. Этот вид брикетов имеет самую высокую плотность – от 1,08 до 1,40 г/см³ [5, 7], поэтому они стойки к любым механическим воздействиям. Высокое качество пинибрикетов достигается благодаря нагреву, который способствует выделению лигнина, выполняющего функцию склеивания волокон исходного материала, что, в свою очередь, делает брикет более плотным [4]. Благодаря этому данные брикеты пользуются спросом не только у частных потребителей, но и применяются в промышленных

и муниципальных котельных. Однако стоимость данной продукции достаточно высока, поскольку она относится к классу «премиум».

Заключение

Таким образом, проведенный анализ различных способов прессования показал, что наиболее целесообразным является использование шнекового прессования, которое позволяет получить топливные брикеты высокого качества, стойкие к механическим воздействиям, длительному хранению и перевозкам.

В целом оценивая перспективы использования топлива, произведенного из растительных отходов переработки различных отраслей промышленности, можно смело прогнозировать увеличение спроса на данную продукцию уже в ближайшем будущем. Это позволит не только решить проблему утилизации бесполезных, а зачастую и вредных компонентов [13], тем самым снизив экологическую нагрузку, но и существенно снизить потребление невозобновляемых энергетических и сырьевых ресурсов.

Список источников

1. Заворин А.С., Казаков А.В., Табакаев Р.Б. Экспериментальные предпосылки к технологии производства топливных брикетов из торфа // Известия Томского политехнического университета. 2012. Т. 320. № 4. С. 18-22.
2. Яблокова М.А., Пономаренко Е.А., Георгиевский Н.В. Современные технологии и оборудование для утилизации мелких нетоварных фракций нефтяного кокса (обзор) // Известия СПбГТИ(ТУ). 2016. №34. С. 67-78.
3. Морозов Д.К., Морозова И.В., Васильев С.Б. Использование мягких отходов лесопиления с целью производства топливных брикетов // Resources and Technology. 2018. № 15 (3). С. 1-28.
4. Технология производства топливных брикетов [Электронный ресурс]. URL: <https://siv-blog.com/tehnologiya-proizvodstva-toplivnyh-briketov/>.
5. Все про топливные брикеты: виды, чем лучше дров, преимущества и недостатки, рекомендации по выбору [Электронный ресурс]. URL: <https://term.od.ua/blog/toplivnie-brikety-drevesnie/>.
6. Использование топливных брикетов: плюсы и минусы, виды, технология производства, чем лучше обычных дров [Электронный ресурс]. URL: <https://provseothody.ru/drevesina/toplivnye-brikety>.
7. Виды топливных брикетов. Рекомендации по выбору [Электронный ресурс]. URL: <https://agrostory.com/info-centre/knowledge-lab/vidy-toplivnykh-briketov-rekomendatsii-po-vyboru/>.
8. Производство топливных брикетов [Электронный ресурс]. URL: <https://agrostory.com/info>.

- centre/knowledge-lab/proizvodstvo-toplivnykh-briketov/.
- Современные технологии производства топливных брикетов [Электронный ресурс]. URL: <https://pandia.ru/text/78/003/70707.php>.
 - Топливные брикеты из семечек и лузги подсолнечника, общий обзор [Электронный ресурс]. URL: <https://ochg.ru/drova/toplivnye-brikety-iz-luzgi-podsolnechnika.html>.
 - Долгов М.С. Анализ связующих веществ для топливных брикетов // Молодой ученый. 2020. № 18 (308). С. 230-231.
 - Топливные брикеты: виды, отличия, преимущества и недостатки [Электронный ресурс]. URL: https://eurodrova.ru/eto_interesno1/stati_pro_biopellety_evrodova/vidy_i_otlichiya_toplivnykh_briketov/.
 - Сравнительный анализ физико-механических свойств биоразлагаемых и синтетических полимеров / Ершова О.В., Медяник Н.Л., Мишурина О.А., Бессонова Ю.А., Багреева К.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т. 19. №4. С. 56-63.
 - Technology of production of fuel briquettes. Available at: <https://siv-blog.com/tehnologiya-proizvodstva-toplivnykh-briketov/>.
 - All about fuel briquettes: types, better than firewood, advantages and disadvantages, selection recommendations. Available at: <https://term.od.ua/blog/toplivnie-brikety-drevesnie/>.
 - The use of fuel briquettes: pros and cons, types, production technology, better than conventional firewood. Available at: <https://provseothody.ru/drevesina/toplivnye-brikety>.
 - Types of fuel briquettes. Recommendations for their selection. Available at: <https://agrostory.com/info-centre/knowledge-lab/vidy-toplivnykh-briketov-rekomendatsii-po-vyboru/>.
 - Production of fuel briquettes. Available at: <https://agrostory.com/info-centre/knowledge-lab/proizvodstvo-toplivnykh-briketov/>.
 - Modern technologies for the production of fuel briquettes. Available at: <https://pandia.ru/text/78/003/70707.php>.
 - Fuel briquettes from sunflower seeds and husks: a general overview. Available at: <https://ochg.ru/drova/toplivnye-brikety-iz-luzgi-podsolnechnika.html>.
 - Dolgov M.S. Analysis of binders for fuel briquettes. *Molodoy ucheny* [Young scientist], 2020, no. 18 (308), pp. 230-231. (In Russ.)
 - Fuel briquettes: types, differences, advantages and disadvantages. Available at: https://eurodrova.ru/eto_interesno1/stati_pro_biopellety_evrodova/vidy_i_otlichiya_toplivnykh_briketov/.
 - Ershova O.V., Medyanik N.L., Mishurina O.A., Bessonova Yu.A., Bagreeva K.V. Comparative analysis of physical and mechanical properties of biodegradable and synthetic polymers. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2021, vol. 19, no. 4, pp. 56-63. (In Russ.)

References

Поступила 30.05.2022; принята к публикации 04.07.2022; опубликована 26.09.2022
Submitted 30/05/2022; revised 04/07/2022; published 26/09/2022

Муллина Эльвира Ринатовна – кандидат технических наук, доцент кафедры химии, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: e.mullina@inbox.ru. ORCID 0000-0002-4254-3260

Мишурина Ольга Алексеевна – кандидат технических наук, доцент кафедры химии, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: olegro74@mail.ru. ORCID 0000-0003-3412-8902

Бессонова Юлия Александровна – кандидат экономических наук, доцент, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: bessonova74@mail.ru. ORCID 0000-0001-8027-3567

Басков Владислав Андреевич – студент, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: baskov-vvvl@mail.ru.

Гамиров Данил Радикович – студент, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: danil.gamirov@yandex.ru.

Волкова Дарья Викторовна – студентка,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: dashuta2003@inbox.ru.

Жамбуршина Карина Бахитжановна – студентка,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: karina_tulubaeva@mail.ru.

Elvira R. Mullina – PhD (Eng.), Associate Professor of the Chemistry Department,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: e.mullina@inbox.ru. ORCID 0000-0002-4254-3260

Olga A. Mishurina – PhD (Eng.), Associate Professor of the Chemistry Department,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: olegro74@mail.ru. ORCID 0000-0003-3412-8902

Yuliya A. Bessonova – PhD (Economics), Associate Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: bessonova74@mail.ru. ORCID 0000-0001-8027-3567

Vladislav A. Baskov – student,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: baskov-vvvl@mail.ru.

Danil R. Gamirov – student,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: danil.gamirov@yandex.ru.

Daria V. Volkova – student,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: dashuta2003@inbox.ru.

Karina B. Zhamburshina – student,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: karina_tulubaeva@mail.ru.



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

УДК 621.92

DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-3-94-102

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ЗОНЕ КОНТАКТА ПРИ КРУГЛОМ ВРЕЗНОМ ШЛИФОВАНИИ

Дегтярева-Кашутина А.С., Болдырев И.С.

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Процесс шлифования является одним из старейших видов обработки, он по-прежнему является одним из наиболее применяемых способов обработки материалов для изготовления изделий с высоким качеством поверхности и точностью размеров. Однако он является одним из самых сложных и наименее понятных процессов по двум основным причинам. Во-первых, абразивные зерна, присутствующие на поверхности инструмента, ориентированы случайным образом. Во-вторых, они подвергаются сложному взаимодействию в зоне обработки. Кроме того, в процессе шлифования, вследствие больших скоростей и низкой теплопроводности шлифовального круга, мгновенная температура в зоне контакта может достигать температуры плавления стали, что приводит к изменению структуры поверхностного слоя детали. Удалить дефектный слой не представляется возможным, потому что размер детали находится в допуске, следовательно, брак является неисправимым, то есть все предыдущие затраты на обработку бесполезны. Температура является одним из главных ограничивающих критериев при назначении режимов резания на операции шлифования. Используемые в статье методы основывались на фундаментальных положениях теории технологии машиностроения, теории резания при лезвийной и абразивной обработке, законах теории теплопроводности твердых тел. Разработана математическая модель расчета температуры в зоне контакта шлифовального круга и заготовки при круглом врезном шлифовании. Разработанная математическая модель учитывает количество абразивных зерен на пятне контакта, физические свойства материала заготовки и шлифовального круга, режимы резания. Полученная модель может в дальнейшем использоваться для проектирования высокоэффективных циклов для операций круглого врезного шлифования в качестве основной для реализации ограничения по неприжоговости обработки.

Ключевые слова: шлифование, шлифовальный круг, тепловой поток, пятно контакта, абразивные зерна

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (грант № FENU-2020-0020).

© Дегтярева-Кашутина А.С., Болдырев И.С., 2022

Для цитирования

Дегтярева-Кашутина А.С., Болдырев И.С. Математическая модель определения температуры в зоне контакта при круглом врезном шлифовании // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №3. С. 94-102. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-3-94-102>



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

MATHEMATICAL MODEL FOR DETERMINING CONTACT ZONE TEMPERATURE DURING CYLINDRICAL PLUNGE GRINDING

Degtyareva-Kashutina A.S., Boldyrev I.S.

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. Although grinding belongs to the oldest machining processes, it is still one of the most used machining techniques for producing parts with high surface quality and dimensional accuracy. At the same time, grinding is among the most complex and least understood processes for two main reasons. First, the abrasive grains present on the surface of the tool are randomly oriented. Secondly, they undergo complex interactions in the processing zone. In addition, during the grinding process, due to high speeds and low thermal conductivity of the grinding wheel, the instantaneous temperature in the contact zone can reach the melting temperature of steel leading to structural changes in the surface layer of the part. It is not possible to remove the defective layer because the size of the part is within tolerance, therefore the defect is irreparable meaning that all previous processing costs were in vain. Therefore, temperature is one of the main limiting criteria when setting cutting parameters for grinding operations. The methods used in the article were based on the fundamental provisions of mechanical engineering theory, the theory of cutting and machining, as well as the theory of thermal conductivity of solids. A mathematical model has been developed for calculating the temperature in the contact zone of the grinding wheel and the workpiece during cylindrical plunge grinding. The developed model takes into account the number of abrasive grains on the contact patch, the physical properties of the workpiece material and the grinding wheel, as well as the cutting parameters. The resulting model can be further used to design high-performance cycles of plunge grinding as the main one for ensuring burn-free machining.

Keywords: grinding, grinding wheel, heat flux, contact patch, abrasive grains

This research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation; Grant No. FENU-2020-0020.

For citation

Degtyareva-Kashutina A.S., Boldyrev I.S. Mathematical Model for Determining Contact Zone Temperature During Cylindrical Plunge Grinding. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 3, pp. 94-102. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-3-94-102>

Введение

Шлифование является высокоскоростным и теплонпряженным процессом механической обработки. Прогнозирование процесса взаимодействия режущего инструмента с заготовкой при шлифовании осложняется тем, что данное взаимодействие имеет стохастический характер и зависит от физических свойств обрабатываемого материала и температурно-скоростных характеристик процесса.

Режущим инструментом при шлифовании является шлифовальный круг, состоящий из абразивных зерен различных форм и размеров, расположенных случайным образом на режущей поверхности и скрепленных связкой. Размер и форма зерен, а также их расположение на поверхности оказывают влияние на режущие свойства шлифовального круга [1, 2].

На температуру в зоне контакта шлифовального круга с заготовкой, помимо прочих факто-

ров, влияет количество абразивных зерен, попадающих на пятно контакта. Это количество зависит от формы и размера зерна, который, в свою очередь, определяется зернистостью шлифовального круга.

Связка в шлифовальном круге служит для скрепления отдельных зерен в единое тело и определяет прочность их удержания. Прочность удержания зерна связкой влияет на скорость износа шлифовального круга и, следовательно, на качество обрабатываемой поверхности. Твердость связки меньше, чем у абразива, поэтому при расчетах допускают, что резание производится только абразивными зернами [3]. Из-за значительного влияния форм и размеров абразивных зерен на температуру в зоне контакта при обработке в процессе разработки математических моделей необходимо описать структуру шлифовального круга.

Ученые, изучающие процесс шлифования, делятся на две группы: первые считают, что контакт

шлифовального круга с заготовкой сплошной [4, 5], а вторые – дискретный [6, 7]. Дискретный контакт дает точные данные о процессе шлифования, но расчеты требуют больших вычислительных мощностей. В.А. Сипайлов [8] отмечал, что применение в расчетах дискретного метода контакта оправдано для исследования тепловых процессов в шлифовальном круге, а для анализа процессов в металле обрабатываемой заготовки сплошной контакт является достаточным и точным. Это связано с тем, что из-за инерционности тепловых явлений в металле прерывание контакта между кругом и заготовкой не оказывает значительного влияния на ход процесса в целом. В сравнении с экспериментом сплошной контакт имеет погрешность не более 15%, но при этом значительно сокращается время расчета [9].

Целью данного исследования является разработка математической модели расчета температуры в зоне контакта шлифовального круга с заготовкой при круглом врезном шлифовании, учитывающей количество контактирующих зерен, физические свойства обрабатываемого материала и их изменение в процесс обработки, а также режимы резания.

Обзор литературы

Процесс формирования рабочей поверхности шлифовального круга носит вероятностный характер, как на этапе его изготовления, так и в процессе взаимодействия с обрабатываемой поверхностью. Стохастичность закладывается на начальных операциях изготовления круга, а на последующих операциях – смешивания и формирования – добавляется вероятностный характер расположения абразивных зерен в объеме круга. В связи с этим удаление металла с обрабатываемой поверхности происходит случайным образом.

В настоящее время у ученых нет единого мнения о характере распределения абразивных зерен на поверхности шлифовального круга, это связано с большим количеством факторов, которые влияют на изменение рабочей поверхности инструмента в процессе обработки. Данный вопрос исследовался большим количеством ученых, рассмотрим ряд наиболее значимых работ.

В работе [10] проведены эксперименты, в которых количество вершин абразивных зерен подсчитывалось по их отпечаткам на алюминиевой фольге. Анализ экспериментальных данных показал, что вероятность распределения вершин абразивных зерен имеет правую асимметрию,

которую авторы объясняют наличием вторых вершин у некоторых абразивных зерен.

В.А. Носенко [11] предлагает методику определения количества вершин абразивных зерен по вероятности контакта в зависимости от времени обработки. Характерной особенностью методики является то, что используемая математическая модель учитывает изменения, которые происходят в процессе шлифования, а именно влияние износа на распределение вершин зерен. Рассматриваются следующие виды износа: истирание и скалывание вершины зерна, вырывание зерна из связки круга. Кроме того, предлагаемая модель учитывает характеристики шлифовального круга, режимы обработки, исходное положение зерен на поверхности инструмента и прочность их удержания связкой.

Закон распределения абразивных зерен на рабочей поверхности шлифовального круга предопределяется технологией его изготовления, при которой зерна и связка распределяются равномерно, поэтому большинство исследователей при создании модели строения рабочей поверхности шлифовального круга использовали закон равномерного распределения $F(x)$ [12]:

$$F(x) = \begin{cases} 0 & x < a; \\ \frac{x}{b-a} & a \leq x < b; \\ 1 & x \geq b. \end{cases} \quad (1)$$

Распределение размеров абразивных зерен для большинства шлифовальных кругов имеет форму нормального распределения $P(d_3)$ [13] и может быть выражено как

$$P(d_3) = \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \exp \left[-0,5 \left(\frac{d_3 - \mu_1}{\sigma_1} \right)^2 \right], \quad (2)$$

где d_3 – размер зерна, м; σ_1 – среднеквадратичное отклонение; μ_1 – средний размер зерна, м.

В разрабатываемой математической модели нас интересует распределение абразивных зерен только на пятне контакта шлифовального круга и заготовки. Вследствие малых размеров рассматриваемого участка будет достаточно точности, которую предоставляют зависимости (1) и (2).

Полученные результаты и их обсуждение

Для расчета температуры в зоне контакта заготовки и шлифовального круга запишем уравнение теплопроводности в полярных координатах:

$$c \frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{\lambda \partial U}{r \partial r} + \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\frac{\lambda \partial U}{r^2 \partial \phi} \right), \quad (3)$$

где r – текущий радиус, м; ϕ – текущий угол; t – время, с; U – температура, °С; c – теплоемкость, Дж/м³·°С; λ – теплопроводность, Дж/м·с·°С.

Краевые условия на пятне контакте (при $r = R$)

$$\lambda \frac{\partial u}{\partial r} = \Omega_3 Q, \quad (4)$$

где Q – мощность теплового источника, Дж/м²·с; Ω_3 – доля теплового потока, поступающего в заготовку.

Краевые условия вне пятна контакта (при $r = R$)

$$\lambda \frac{\partial u}{\partial r} = \alpha (T - U), \quad (5)$$

где T – температура окружающей среды, °С; α – теплоотдача на границе, Дж/м²·°С·с.

Мощность единичного теплового источника рассчитывается по формуле, предложенной в работе С.Н. Корчака [9], которая учитывает тепловыделение от пластического сдвига $Q_{сдi}$ и трения о вершину абразивного зерна обрабатываемого материала $Q_{три}$:

$$Q_0 = Q_{сдi} + Q_{три}, \quad (6)$$

$$Q_{сдi} = 6,75 \cdot \sigma_i \cdot v_k \cdot a \cdot l_3, \quad (7)$$

$$Q_{три} = 0,068 \cdot \sigma_i \cdot v_k \cdot l_3^2, \quad (8)$$

где σ_i – интенсивность сопротивления материала деформации, Дж/м³; v_k – скорость вращения круга, м/с; l_3 – величина площадки затупления зерна, м, $l_3 = 0,1$ мм; a – толщина среза, м.

Для нахождения суммарной мощности теплового источника Q по всему пятну контакта необходимо знать количество режущих и трущихся зерен на пятне контакте.

Согласно исследованиям Д.Г. Евсеева и А.Н. Сальникова [4], доля теплового потока, поступающего в заготовку, определяется как

$$\Omega_3 = \frac{1}{1 + 1,25 \cdot \frac{\lambda_k}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{a}{h_\phi \cdot V_{срад}}}}, \quad (9)$$

где λ_k, λ – коэффициенты теплопроводности шлифовального круга и заготовки соответственно, Вт/(м·К); h_ϕ – средний радиус площадки контакта единичного абразивного зерна с заготовкой, м; a – коэффициент температуропроводности материала заготовки, м²/с; $V_{срад}$ – скорость подачи, м/с.

А.В. Королевым [14] предложена зависимость для определения числа зерен на единичной площади на расстоянии y от наиболее выступающего звена по зависимости

$$Z_y = Z_0 \cdot C_k \left(\frac{y}{d_3} \right)^\alpha, \quad (10)$$

где Z_0 – число зерен на единичной площади круга, 1/м²; C_k, α – коэффициенты; d_3 – размер зерна, м.

$$Z_0 = \frac{W_3 \cdot W_c}{(W_3 + W_c + W_\Pi) \cdot W_\Pi \cdot d_3^2}, \quad (11)$$

где W_3, W_c, W_Π – объемное содержание зерен, связки и пор соответственно, доли.

Для наглядной демонстрации работы разработанной математической модели произведем расчет температуры в зоне контакта для конкретного примера.

Материал заготовки – сталь 30ХГСНА, диаметр заготовки – 70 мм, высота – 10 мм, диаметр круга – 600 мм, материал круга – электрокорунд, зернистость – F46, твердость – средняя СТ2, структура – 6.

В теории физики твердого тела установлено, что физические характеристики материала изменяются в зависимости от температуры. Для пяти групп сталей С.Н. Корчак [9] экспериментально определил зависимости удельной теплоемкости и теплопроводности от температуры. Данные по изменению физических свойств стали 30ХГСНА в зависимости от температуры приведены в **табл. 1**.

Режимы резания, для которых будут произведены расчеты, приведены в **табл. 2**.

Объемное содержание зерен, связки и пор для используемого круга составляет: $W_3 = 0,5$; $W_c = 0,17$; $W_\Pi = 0,33$ [16]. Размер зерна $d_3 = 0,37$ мм = $370 \cdot 10^{-6}$ м [17]. Подставив значения в формулу (11), получим:

$$Z_0 = \frac{0,5 \cdot 0,17}{(0,5 + 0,17 + 0,33) \cdot 0,33 \cdot (370 \cdot 10^{-6})^2} = 1881488 \text{ 1/м}^2 = 1,88 \text{ 1/м}^2.$$

Таблица 1. Изменение интенсивности сопротивления материала деформации, теплоемкости и теплопроводности стали 30ХГСНА и шлифовального круга от температуры

Table 1. Change in the intensity of resistance of the material to deformation, heat capacity and thermal conductivity of steel 30KhGSNA and the grinding wheel as a function of temperature

$T, ^\circ\text{C}$	$\sigma_i \cdot 10^6, \text{Дж/м}^3$	$c, \text{Дж/м}^3 \cdot ^\circ\text{C}$	$\lambda, \text{Дж/м} \cdot \text{с} \cdot ^\circ\text{C}$	$a, \text{м}^2/\text{с}$	$\lambda_k, \text{Вт/(м} \cdot ^\circ\text{C)} [15]$
0	320	0,461	28,989	10,17	2,62
200	280	0,487	35,851	9,39	2,95
400	250	0,539	32,926	8,11	3,31
600	200	0,609	29,153	5,58	3,67
800	130	0,695	26,453	5,5	4,03
1000	100	0,682	24,830	5,33	4,21
1200	80	0,676	23,935	5,89	–
1400	4	0,674	23,465	5,89	–
1500	0	0,673	23,326	5,89	–

Таблица 2. Режимы резания

Table 2. Cutting parameters

Параметр	Круглое наружное с радиальной подачей		
Скорость круга $V_k, \text{м/с}$	35	50	80
Скорость вращения заготовки $V_d, \text{м/мин/об/мин}$	35/158		
Скорость радиальной подачи $V_{\text{рад}}, \text{мм/мин}$	0,787	1,03	1,25
Толщина среза $a, \text{м}$	0,008	0,006	0,005

Подставляем полученное значение в формулу (10), значения коэффициентов $C_k = 0,24$, $\alpha = 2,75$ [16]:

$$Z_y = 1,88 \cdot 0,24 \left(\frac{0,1}{0,37} \right)^{2,75} = 0,12.$$

Значение y должно соответствовать условию $0 \leq y \leq l_z + a$, для нашего примера примем равным значению износа. И тогда получаем, что количество зерен на 1 мм^2 равно 0,012. Размер пятна контакта круга и заготовки найдем по формуле, предложенной Масловым Е.Н. [18]. Тогда для скорости 35 м/с количество зерен на пятне контакта равно 26, для 50 – 23, а для 80 – 21.

Поскольку в формуле (9) теплопроводность и температуропроводность заготовки и теплопроводность шлифовального круга зависят от температуры в зоне контакта, поэтому и доля поступающего в заготовку тепла представлена в виде графика (рис. 1).

Произведем расчет по формулам (6) – (8) и найдем суммарное значение мощности теплового источника для заданных скоростей шлифовального круга в зависимости от температуры в зоне контакта (рис. 2). Как видно из графика и табл. 1, с увеличением температуры сокращается сопротивление материала резанию, а следовательно, и количество усилий, затрачиваемых на резание.

Для проверки адекватности модели сравним рассчитанные значения с результатами, полученными В.И. Ключко [19]. Для этого произведем расчет температуры в зоне контакта для заданных скоростей шлифовального круга и отобразим полученные значения на графике (рис. 3). Как видно из графика, разница между расчетными значениями и данными В.И. Ключко составляет не более 10%. Это позволяет утверждать, что представленную модель можно использовать для определения температуры в зоне контакта при круглом врезном шлифовании.

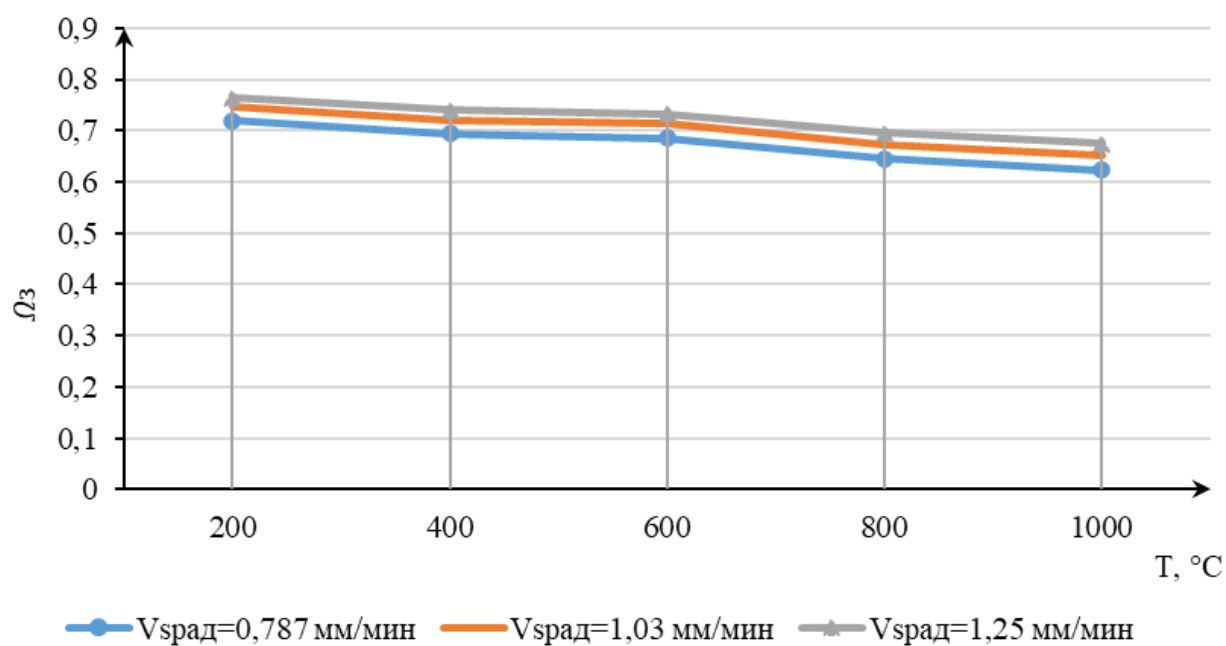


Рис. 1. График доли поступления тепла в заготовку в зависимости от температуры
Fig. 1. Graph of the heat input into the workpiece depending on the temperature

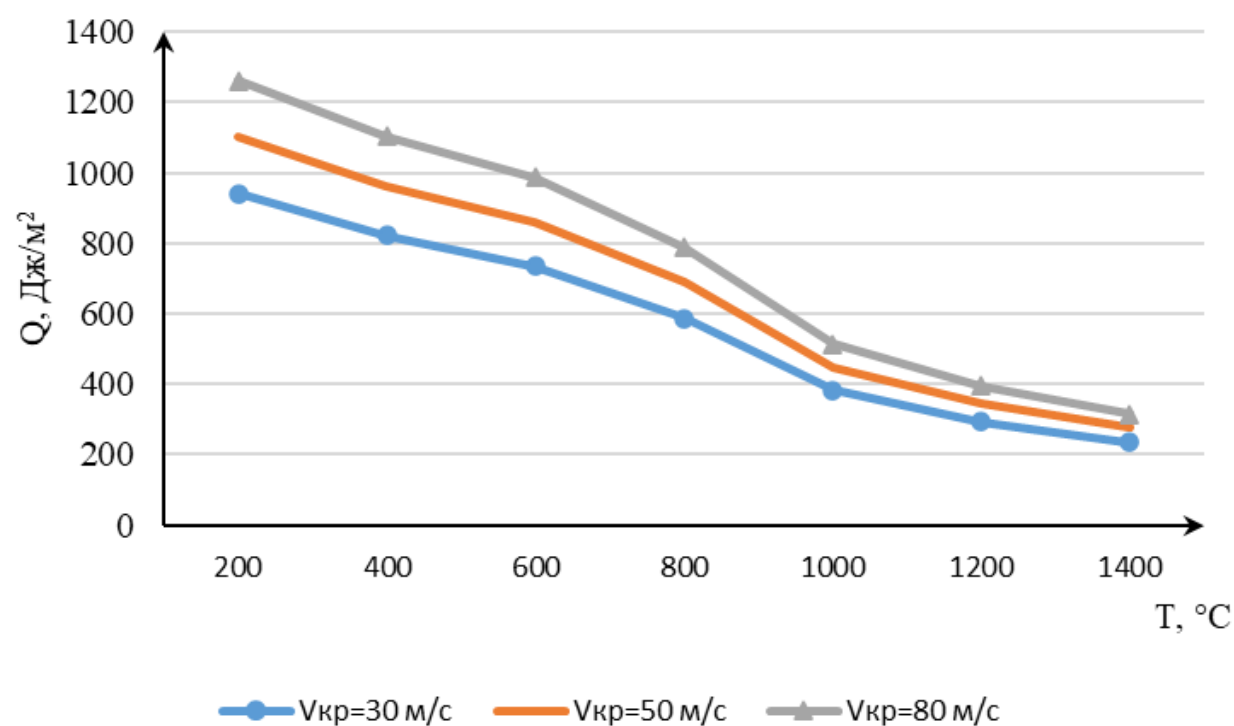


Рис. 2. График суммарной мощности теплового источника в зависимости от температуры
Fig. 2. Graph of the total power of the heat source depending on the temperature

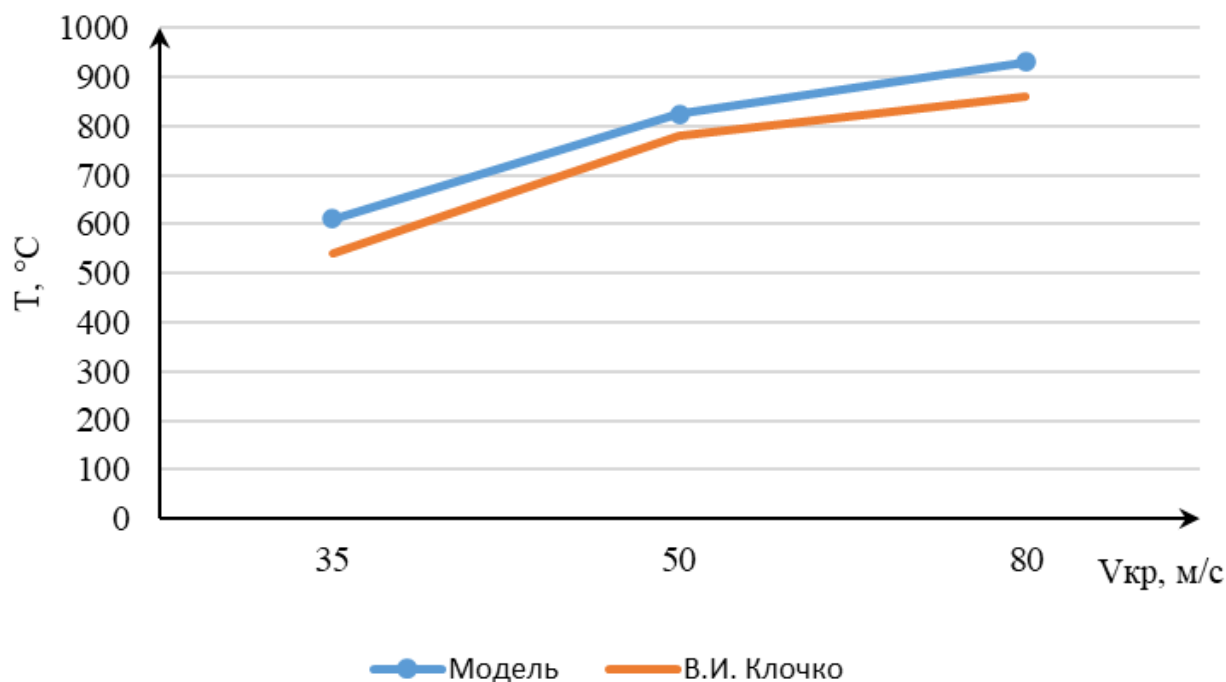


Рис. 3. График температуры в зоне контакта в зависимости от скорости шлифовального круга
Fig. 3. Graph of the temperature in the contact zone depending on the grinding wheel speed

Заключение

Разработана математическая модель проектирования температуры в зоне контакта шлифовального круга и заготовки при круглом врезном шлифовании. Данная модель может в дальнейшем использоваться для реализации ограничения по бесприжоговости обработки при проектировании циклов круглого врезного шлифования.

Список источников

1. Baidakova N.V., Orlova T.N. Influence of Abrasive Grain Geometrical Characteristics on the Grinding Quality // *Procedia Engineering*, 2017, vol. 206, pp. 194-199, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.459>.
2. The Influence of Abrasive Grit Morphology on Wheel Topography and Grinding Performance / J. Palmer, D. Curtis, D. Novovic, H. Ghadbeigi // *Procedia CIRP*, 2018, vol. 77, pp. 239-242. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.09.005>.
3. Новоселов Ю.К., Богуцкий В.Б., Дзюбаба Р.Н. Прогнозирование параметров шероховатости поверхности при абразивной обработке // *Известия ТулГУ. Технические науки*. 2017. Вып. 8. Ч. 1. С. 262-269.
4. Евсеев Д.Г., Сальников А.Н. Физические основы процесса шлифования. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1978. 128 с.
5. Lishchenko N.V., Larshin V.P. The influence of lubricating fluid coolant action on grinding temperature // *Science Vector of Togliatti State University*. 2015. №3-1. С. 68-74.
6. Дьяконов А.А. Исследование прочностных характеристик материалов при скорости деформации и температурном режиме шлифования // *Металлообработка*. 2007. №4. С. 2-5.
7. Grinding force and power modeling based on chip thickness analysis / R.L. Hecker, S.Y. Liang, X.J. Wu, et al. // *Int J AdvManufTechnol* 2007. Vol. 33. P. 449. <https://doi.org/10.1007/s00170-006-0473-y>
8. Сипайлов В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности. М.: Машиностроение, 1978. 167 с.
9. Корчак С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей. М.: Машиностроение, 1974. 280 с.
10. Переладов А.Б., Камкин И.П., Анохин А.В. Исследование статистико-вероятностных характеристик рабочей поверхности шлифовального круга // *Известия вузов. Машиностроение*. 2014. №3 (648). С. 67-71.
11. Носенко В.А., Даниленко М.В., Васильев В.В. Методика определения характера распределения контактирующих вершин зерен на поверхности шлифовального круга с учетом многопроходности процесса // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2021. Т. 1 (248). С. 23-26.
12. Байкалов А.К. Введение в теорию шлифования материалов. Киев: Наукова думка, 1978. 207 с.
13. Parametric evaluation and three-dimensional modelling for surface topography of grinding wheel/ W. Liu, Zh. Deng, Y. Shang, L. Wan // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2019. Vol. 155. Pp. 334-342. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.03.006>.

14. Королев А.В. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1975. 191 с.
15. Киселев Е.С. Теплофизика правки шлифовальных кругов с применением СОЖ. Ульяновск: УлГТУ, 2001. 170 с.
16. Островский В.И. Теоретические основы процесса шлифования. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1981. 144 с.
17. Переверзев П.П. Теория и методика расчета оптимальных циклов обработки деталей на круглошлифовальных станках с программным управлением: дис. ... д-ра техн. наук. Челябинск, 1999. 295 с.
18. Маслов Е.Н. Теория шлифования материалов. М.: Машиностроение, 1974. 320 с.
19. Ключко В.И. Эффективность высокоскоростного шлифования разных сталей и сплавов с учетом точности и качества обработки: дис. ... канд. техн. наук. Челябинск, 1984. 207 с.
9. Korchak S.N. *Proizvoditel'nost' protsessa shlifovaniya stal'nykh detaley* [The performance of steel part grinding process]. Moscow: Mashinostroenie, 1974, 280 p. (In Russ.)
10. Pereladov A.B., Kamkin I.P., Anokhin A.V. Understanding the statistical and probabilistic characteristics of the working surface of the grinding wheel. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye* [Proceedings of Russian Universities. Mechanical Engineering], 2014, no. 3 (648), pp. 67-71. (In Russ.)
11. Nosenko V.A., Danilenko M.V., Vasiliev V.V. A method for determining the distribution of contacting grain peaks on the surface of grinding wheels accounting for multiple passes. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Volgograd State Technical University], 2021, vol. 1 (248), p. 23-26. (In Russ.)
12. Baikalov A.K. *Vvedenie v teoriyu shlifovaniya materialov* [Introduction to the theory of grinding]. Kyiv: Naukova Dumka, 1978, 207 p. (In Russ.)
13. Liu W., Deng Zh., Shang Y., Wan L. Parametric evaluation and three-dimensional modelling for surface topography of grinding wheel. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2019, vol. 155, pp. 334-342, <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.03.006>.
14. Korolev A.V. *Issledovanie protsessov obrazovaniya poverkhnostey instrumenta i detali pri abrazivnoy obrabotke* [Understanding surface formation in tools and workpieces during abrasive machining]. Saratov: Publishing House of Saratov University, 1975, 191 p. (In Russ.)
15. Kiselev E.S. *Teplofizika pravki shlifoval'nykh krugov s primeneniem SOZH* [Thermal physics behind grinding wheel dressing using lubricoolants]. Ulyanovsk: UISTU, 2001, 170 p. (In Russ.)
16. Ostrovsky V.I. *Teoreticheskie osnovy protsessa shlifovaniya* [Fundamentals of the grinding process]. Leningrad: Publishing House of Leningrad University, 1981, 144 p. (In Russ.)
17. Pereverzev P.P. *Teoriya i metodika rascheta optimal'nykh tsiklov obrabotki detaley na krugloshlifoval'nykh stankakh s programnym upravleniyem: dissertatsiya doktora tekhn. nauk* [Calculating optimum machining cycles for cylindrical CNC grinders: Theory and procedure. Doctoral dissertation]. Chelyabinsk, 1999. 295 p. (In Russ.)
18. Maslov E.N. *Teoriya shlifovaniya materialov* [Theory of grinding]. Moscow: Mashinostroenie, 1974, 320 p. (In Russ.)
19. Klochko V.I. *Effektivnost' vysokoskorostnogo shlifovaniya raznykh staley i splavov s uchetom tochnosti i kachestva obrabotki: dis. ... kand. tekhn. nauk* [The efficiency of high-speed grinding of different steels and alloys taking into account precision and quality. PhD dissertation]. Chelyabinsk, 1984, 207 p. (In Russ.)

References

1. Baidakova N.V., Orlova T.N. Influence of Abrasive Grain Geometrical Characteristics on the Grinding Quality. *Procedia Engineering*, 2017, Volume 206, pp. 194-199, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.459>.
2. Palmer J., Curtis D., Novovic D., Ghadbeigi H. The Influence of Abrasive Grit Morphology on Wheel Topography and Grinding Performance. *Procedia CIRP*, 2018, vol. 77, pp. 239-242, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.09.005>.
3. Novoselov Yu.K., Bogutsky V.B., Dzyubaba R.N. Prediction of surface roughness parameters during abrasive machining. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of TulGU. Engineering sciences], 2017, vol. 8, ch. 1, pp. 262-269. (In Russ.)
4. Evseev D.G., Salnikov A.N. *Fizicheskie osnovy protsessa shlifovaniya* [Physical basis of the grinding process]. Saratov: Publishing House of Saratov University, 1978, 128 p. (In Russ.)
5. Lishchenko N.V., Larshin V.P. The influence of lubricating fluid coolant action on grinding temperature. *Science Vector of Togliatti State University*, 2015, no. 3-1, pp. 68-74.
6. Dyakonov A.A. Understanding the strength of materials at the rate of deformation and the temperature regime of grinding. *Metallrobrabotka* [Metalworking], 2007, no. 4, pp. 2-5. (In Russ.)
7. R.L. Hecker, S.Y. Liang, X.J. Wu, et al. Grinding force and power modeling based on chip thickness analysis. *Int J AdvManufTechnol*, 2007, vol. 33, p. 449, <https://doi.org/10.1007/s00170-006-0473-y>
8. Sipailov V.A. *Teplovye protsessy pri shlifovanii i upravlenie kachestvom poverkhnosti*. [Thermal processes during grinding and surface quality control]. Moscow: Mashinostroenie, 1978, 167 p. (In Russ.)

Поступила 24.08.2022; принята к публикации 12.09.2022; опубликована 26.09.2022

Submitted 24/08/2022; revised 12/09/2022; published 26/09/2022

Дегтярева-Кашутина Анастасия Сергеевна – старший преподаватель,
Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.
Email: asdegtyareva24@gmail.com. ORCID 0000-0002-4236-9207

Болдырев Игорь Станиславович – кандидат технических наук, доцент,
Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.
Email: boldyrev@susu.ru.

Anastasia S. Degtyareva-Kashutina – Senior Lecturer,
South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: asdegtyareva24@gmail.com. ORCID 0000-0002-4236-9207

Igor S. Boldyrev – PhD (Eng.), Associate Professor,
South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: boldyrev@susu.ru.

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.92
DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-3-103-110



МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ТЕКУЩЕГО ЗНАЧЕНИЯ ГЛУБИНЫ РЕЗАНИЯ В АВТОМАТИЧЕСКОМ СТУПЕНЧАТОМ ЦИКЛЕ ПРОГРАММНОЙ ПОДАЧИ НА ОПЕРАЦИИ ПЛОСКОГО ШЛИФОВАНИЯ С ЧПУ

Акинцева А.В., Переверзев П.П.

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. На данный момент в САМ-системах отсутствует какой-либо «цифровой инструмент» прогнозирования стабильностей показателей точности и качества при изготовлении партии деталей. В результате на производствах вынуждены проводить апробацию назначенных режимов резания на выполнение требований чертежа по точности, часто занижая их при этом. Это приводит к снижению производительности современных станков с ЧПУ и делает невозможным проведение цифровизации всей машиностроительной отрасли России. Поэтому решение вопроса прогнозирования стабильности показателей точности и качества при изготовлении партии деталей в «цифровой среде» является актуальной задачей. В качестве решения предложена аналитическая модель съема металла при плоском шлифовании с ЧПУ при ступенчатом изменении программной подачи на глубину и без учета поперечной подачи. Модель устанавливает функциональную взаимосвязь между глубиной резания, упругими деформациями технологической системы и другими параметрами процесса обработки с учетом влияния нестабильных условий формообразования. В результате становится возможным расчет изменения технического размера и погрешности его изготовления на протяжении всего цикла. Данная модель получена на основе имитационного моделирования с использованием аналитических методов математического моделирования, базирующихся на фундаментальных физических законах и основных положениях механики резания и теории пластической деформации металла в зоне стружкообразования. Научная новизна приведенных в данной статье исследований заключается в разработке аналитической модели съема металла, которая впервые устанавливает взаимосвязь между глубиной резания, режимами резания, упругими деформациями, силами резания и т.д. с точностью обработки на операциях плоского шлифования с ЧПУ. Представленную в данной статье модель съема металла возможно использовать также для оптимизации режимов резания проектируемой операции плоского врезного шлифования. В результате можно сказать о большой практической значимости результатов приводимых исследований для реального машиностроительного производства.

Ключевые слова: плоское шлифование, ЧПУ, модель, глубина резания, цикл, программная подача

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-00792.

© Акинцева А.В., Переверзев П.П., 2022

Для цитирования

Акинцева А.В., Переверзев П.П. Модель расчета текущего значения глубины резания в автоматическом ступенчатом цикле программной подачи на операции плоского шлифования с ЧПУ // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №3. С. 103-110. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-3-103-110>



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

MODEL OF CALCULATING THE CURRENT VALUE OF THE CUTTING DEPTH IN AN AUTOMATIC STEPWISE CYCLE OF THE PROGRAMMED FEED ON A CNC-CONTROLLED FLAT GRINDING OPERATION

Akintseva A.V., Pereverzev P.P.

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. Current CAM systems do not have any “digital tool” for predicting the stability of accuracy and quality indicators, when manufacturing a batch of parts. As a result, production units are forced to test the assigned cutting modes for meeting the requirements of the drawing for accuracy, frequently keeping them low at the same time. This leads to a decrease in performance of modern CNC machines and makes it impossible to digitalize the entire machine-building industry in Russia. Therefore, predicting the stability of accuracy and quality indicators, when manufacturing a batch of parts, in a “digital environment” is currently relevant. To solve this issue, an analytical model of metal removal is proposed for CNC-controlled flat grinding with a stepwise change of the programmed feed to a depth, without considering the traverse feed. The model establishes a functional interrelation between the cutting depth, elastic deformations of the technological system, and other parameters of the processing operation, considering the influence of unstable geometry generation conditions. As a result, it becomes possible to calculate changes of the technical size and the error of its manufacturing throughout the entire cycle. This model is designed by a simulation modeling using analytical methods of mathematical modeling that follows the basic physical laws and basic provisions of cutting mechanics and the theory of plastic deformation of metal in the chip formation zone. Scientific novelty of the studies presented in this paper lies in the development of the analytical model of metal removal, which establishes the interrelation between the cutting depth, cutting modes, elastic deformations, cutting forces, etc. and the processing accuracy on CNC-controlled flat grinding operations. The model of metal removal presented in this paper can be also used to optimize the cutting modes of the designed operation of flat plunge grinding. As a result, it is possible to say about the great practical significance of the research results for machine-building production.

Keywords: flat grinding, CNC, model, cutting depth, cycle, programmed feed

The research was funded by grant of the Russian Science Foundation No. 22-29-00792.

For citation

Akintseva A.V., Pereverzev P.P. Model of Calculating the Current Value of the Cutting Depth in an Automatic Stepwise Cycle of the Programmed Feed on a Cnc-Controlled Flat Grinding Operation. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 3, pp. 103-110. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-3-103-110>

Введение

Одним из распространенных видов чистовой обработки плоских поверхностей является плоское шлифование периферией круга на станках с прямоугольным столом. Данному виду шлифования присуща сложная кинематика процесса, требующая настройки и управления тремя подачами – скорости стола (м/мин), скорости подачи на глубину (мм/раб. ход) и поперечной подачи (мм/ход). Также наличие осевой подачи круга дает возможность осуществлять различные стратегии съема припуска [1]. В результате съема припуска с обрабатываемой поверхности осуществляется многократно и при различном взаимодействии шлифовального круга с заготовкой. Поскольку на поверхности стола станка размещаются несколько заготовок, которые образуют

суммарную прерывистую поверхность для обработки, это приводит к существенному усложнению моделирования данного процесса из-за необходимости учета переменной ширины контакта круга с обрабатываемой поверхностью и наличия на всей шлифуемой поверхности стола отверстий, пазов, профильных выемок и т.д.

В настоящий момент на подготовительном этапе производства в виду наличия большого числа шлифовальных станков с ЧПУ проектирование управляющих программ (УП) проводится в автоматизированном режиме в САМ-системе почти на всех этапах, за исключением этапа назначения режимов резания, важной частью которого является назначение параметров циклов программных подач.

Несмотря на достаточно богатый выбор САМ-систем различных производителей, они

имеют ряд общих недостатков, делающих невозможным проведение полной цифровизации машиностроительного производства. Во-первых, назначение режимов резания осуществляется по оцифрованным справочникам 60-80-х гг. выпуска, отражающих технические возможности универсального оборудования. Во-вторых, отсутствует какой-либо вид контроля возможности достижения при обработке на данных режимах резания заданных чертежом параметров точности и качества при изготовлении партии деталей. Единственный этап контроля, которые предлагают почти все САМ-системы, является проверка на возможность столкновения заготовки, режущего инструмента или элемента технологического оборудования, то есть происходит только моделирование траектории передвижения последних. Поэтому на практике в производственных условиях технолог вынужден корректировать вручную режимы резания, опираясь на заводской опыт обработки схожих деталей, а затем еще проводить апробацию назначенных режимов резания на возможность обеспечения ими показателей точности и качества. Зачастую, для гарантированного обеспечения заданных чертежом параметров точности, технолог занижаются режимы резания до безопасного уровня. Следствием таких процессов является низкая производительность операций плоского шлифования на современных мощных и точных станках с ЧПУ. Отметим, что наличие этапов ручного назначения, корректировки и адаптации режимов резания к производственным условиям делает невозможным проведение полной цифровизации машиностроительной отрасли.

Выделим основные работы, посвященные повышению стабильности точности и производительности в цикле при изготовлении партии деталей на операциях плоского шлифования [2-9]. В ряде работ описано формирование отклонений формы обрабатываемых поверхностей, имеющих различную податливость, но при этом использованы статистические методы [2, 3]. Отсутствуют публикации по прогнозированию погрешности обработки, возникающей в цикле при совместном управлении тремя программными подачами на операциях плоского шлифования с ЧПУ. В работах [3, 4] получены эмпирические узкодиапазонные модели, устанавливающие взаимосвязь между высотными параметрами шероховатости шлифованной поверхности для конкретных марок материалов. Работы [8, 9] посвящены повышению производительности операций плоского шлифования в автоматическом

цикле, но точность обработки не рассматривается, только качество обрабатываемой поверхности. Большинство работ, посвященных моделированию силы резания при плоском шлифовании, являются узкодиапазонными и ограничиваются определенным перечнем марок материала [10-12]. Отсутствуют публикации по широкодиапазонным моделям расчета силы резания, возникающей в цикле при совместном управлении программными подачами на операциях плоского шлифования, выполняемых на станках с ЧПУ. В первую очередь для успешного прогнозирования точности обработки при разработке математического обеспечения необходимо установить взаимосвязь между глубиной резания и упругими деформациями технологической системы (ТС), которые возникают под действием радиальной силы резания. Рассмотрим основные этапы разработки модели съема металла в автоматическом цикле радиальной подачи на примере плоского шлифования без осевой подачи.

Полученные результаты и их обсуждение

В работе [13] получена аналитическая модель силы резания для процесса плоского врезного шлифования с учетом функциональной взаимосвязи интенсивности съема металла кругом с деформируемыми в зоне сдвига элементами объемами металла:

$$P_{Y_{z,i}} = M_1 F_{z,i} + M_2 \sqrt{F_{z,i}}, \quad (1)$$

где $P_{Y_{z,i}}$ – радиальная составляющая силы резания на i -м ходе стола z -й ступени, Н; $F_{z,i}$ – фактическая радиальная подача на i -м ходе стола z -й ступени, мм/ход; M_1 , M_2 – поправочные коэффициенты, находящиеся по формулам:

$$M_1 = \frac{1,86 V_c T \sigma_i}{V_k \pm V_c}, \quad (2)$$

$$M_2 = \frac{\sigma_i \eta T \sqrt{D}}{3}, \quad (3)$$

где T – ширина шлифования, мм; V_c – скорость движения стола, м/мин; η – степень затупления круга; D – диаметр круга, мм; σ_i – среднее значение интенсивности напряжений, Н/мм²; V_k – скорость круга, м/с.

Из-за наличия податливости в технологической системе плоскошлифовальных станков фактическая подача на глубину шлифовального круга отличается от программной. Этот момент наглядно показан на двух графиках **рис. 1** – гра-

фиках съема припуска на i -м ходе трехступенчатого цикла программной подачи на глубину (при поперечной скорости подачи равной нулю). На **рис. 1, а** представлен график цикла подачи на глубину, в котором прямой и обратный ходы – рабочие, а на **рис. 1, б** прямой ход – рабочий ход (РХ), а обратный – выхаживающий ход (ВХ). На рабочем ходе радиальная подача не равна нулю, а на холостом – равна нулю. При холостом ходе радиальная подача на глубину равна нулю, при этом за счет натяга осуществляется съём неснятой на предшествующих ходах части припуска.

В результате «поведение» фактической подачи на глубину на РХ и ВХ в значительной мере отличается друг от друга. На **рис. 1** представлена последовательность изменения графиков накопленной программной и фактической радиальной подачи в зависимости от i -го номера хода стола и z -й ступени цикла программной подачи на глубину. По сути, **рис. 1** показывает положение «режущей кромки» круга относительно исходного местоположения заготовки (начало координат – неподвижная точка отсчета). Графики на **рис. 2** являются увеличенным выделенным фрагментом **рис. 1**, отображающего содержание прямоугольников АБВГ и ДЕЖИ. Отметим, что на **рис. 1** и **2** программная и фактическая подачи на глубину изображены в виде гистограммы. **Рис. 2, а** отражает случай, когда совершаются ходы РХ-РХ, а **рис. 2, б** – случай РХ-ВХ.

Отрезок А1А2 (Б1Б2) ограничивает величину накопленной программной радиальной подачи при рабочем ходе (для обоих рассматриваемых случаев прямой ход – рабочий). Данный отрезок показывает величину припуска, который бы снял круг, если бы не было упругих деформаций ТС. При обратном ходе в случае, если сделаны ходы РХ-РХ (см. **рис. 2, а**), программная радиальная подача равна А2А3, при втором варианте развития события, когда обратный ход холостой РХ-ВХ (см. **рис. 2, б**), программная радиальная подача равна нулю и занимает отрезок Б2Б3, равный Б1Б2 (в данном случае столбцы равны при двойном ходе). Радиальная сила резания в технологической системе вызывает упругие деформации, которые уменьшают величину программной радиальной подачи. Для случая РХ-РХ – на величину А1А8, а накопленная фактическая радиальная подача (отмечена на **рис. 2, а** отрезком А8А7) – на $i-1$ ходе стола z -й ступени цикла. Для случая РХ-ВХ возникает упругая деформация на величину Б1Б5, а накопленная фактическая подача отмечена на **рис. 2, б** отрезком Б4Б6 на $i-1$ ходе z -й ступени. Размер

столбца А8А7А11А10 отражает накопленную фактическую подачу на рабочем ходе, а столбца Б10Б7Б8Б11 – при холостом, там, где съём металла происходит за счет упругой деформации. Величина съема при холостом ходе равна расстоянию Б6Б7, а при рабочем ходе равна А6А7. Отметим, что построение графиков на **рис. 1** и **2** осуществлялась по расчетным формулам, приведенным в данной статье при помощи программного обеспечения Excel. В дальнейшем полученные диаграммы были переведены в графический вид для удобства добавления комментариев.

Из замкнутого контура (см. **рис. 2**) найдем фактическую радиальную подачу:

– для рабочего хода

$$S_{z,i}^P + y_{z,i-1}^X = F_{z,i}^P + y_{z,i}^P; \quad (4)$$

– для холостого хода

$$y_{z,i-1}^P = F_{z,i}^X + y_{z,i}^X, \quad (5)$$

где $S_{z,i}^P$ – программное значение радиальной подачи на рабочем ходе, мм/раб. ход; $y_{z,i-1}^{X(P)}$ – упругая деформация ТС на $i-1$ -м холостом (рабочем) ходе, мм; $F_{z,i}^{P(X)}$ – фактическая радиальная подача на i -м рабочим (холостом) ходе z -й ступени, мм; $y_{z,i}^{X(P)}$ – упругая деформация ТС на i -м холостом (рабочем) ходе, мм.

Объединим формулы (4) и (5) в одну общую, учитывающую наличие программной радиальной подачи на i -м ходе z -й ступени:

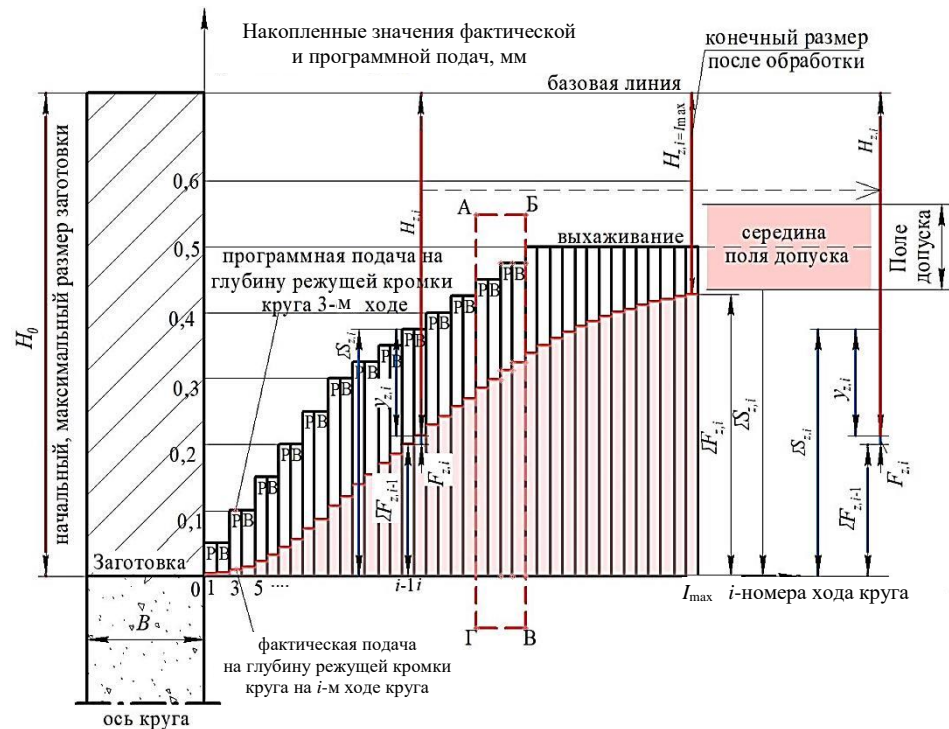
$$S_{z,i} + y_{z,i-1} = F_{z,i} + y_{z,i}, \quad (6)$$

где $S_{z,i}$ – программное значение радиальной подачи на i -м ходе z -й ступени, мм/ход*; $y_{z,i}(y_{z,i-1})$ – упругая деформация ТС на i -м ($i-1$ -м) ходе, мм; $F_{z,i}$ – фактическая радиальная подача на i -м ходе z -й ступени, мм.

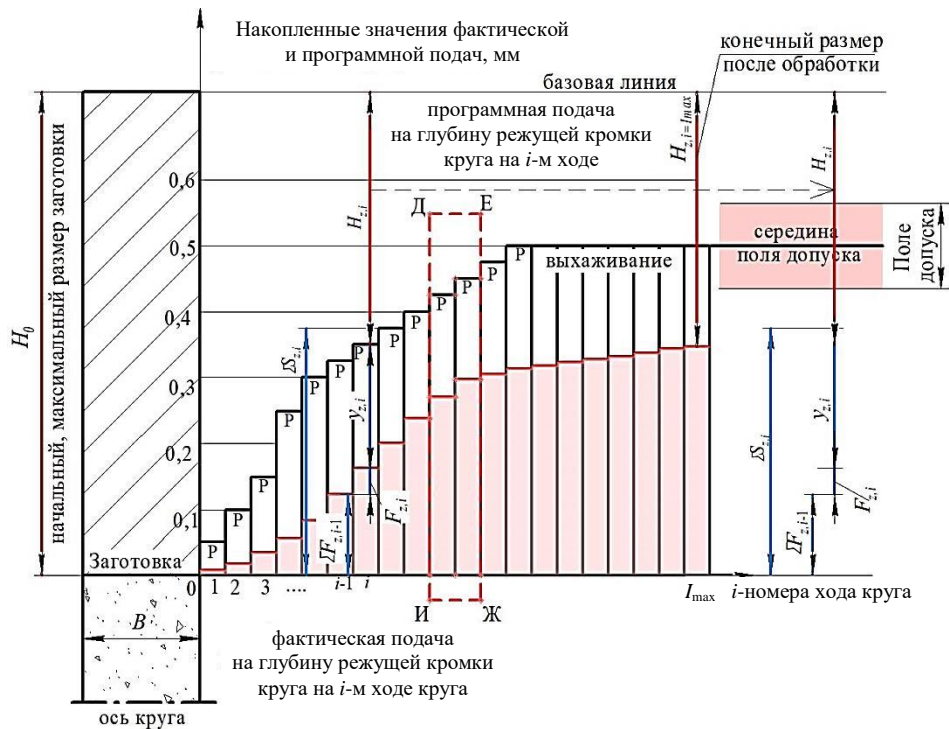
В уравнении (6) показана функциональная взаимосвязь между величиной снимаемого припуска (фактической радиальной подачей), программной радиальной подачей и упругими деформациями ТС на i -м ходе z -й ступени, которая находится по формуле

$$y_{z,i} = P_{Yz,i} j, \quad (7)$$

где j – податливость технологической системы, м/Н.



а



б

Рис. 1. Графическое представление взаимосвязи накопленных значений фактической и программной подачи на глубину для 2-ступенчатого цикла плоского шлифования ($\Sigma S_{z,i}$ ($\Sigma F_{z,i}$) – накопленное значение программной (фактической) подачи на глубину): а – прямой и обратные ходы – рабочие PX-PX; б – прямой ход – рабочий, обратный ход – выхаживающий PX-BX

Fig. 1. Diagram of relations between accumulated values of actual and programmed depth feeds for a 2-step cycle of flat grinding ($\Sigma S_{z,i}$ ($\Sigma F_{z,i}$) is an accumulated value of programmed (actual) depth feed): а is forward and backward travel – operating cycle PX-PX; б is forward travel is operating, and backward travel is spark-out PX-BX

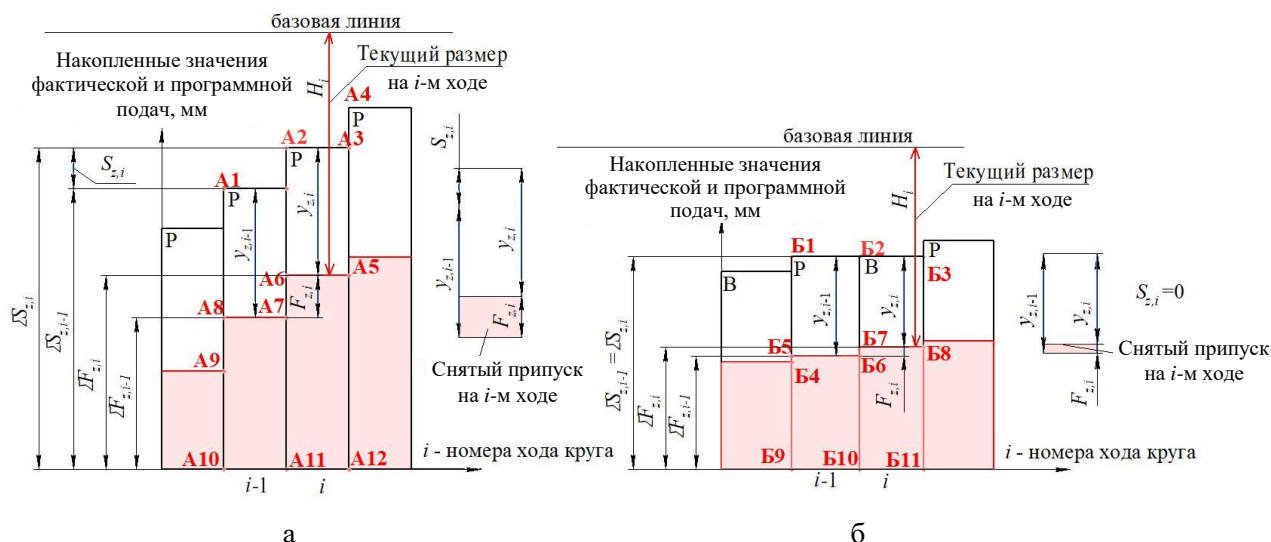


Рис. 2. Графическое представление взаимосвязи накопленных значений фактической и программной радиальных подач для случаев PX-PX (а) и PX-BX (б) в цикле плоского шлифования

Рис. 2. Diagram of relations between accumulated values of actual and programmed radial feeds for cases PX-PX (a) and PX-BX (b) in a flat grinding cycle

Подставив формулу (7) в выражение (6), получим

$$S_{z,i} + P_{Y_{z,i-1}} j = F_{z,i} + P_{Y_{z,i}} j, \quad (8)$$

$$\Delta P_{Y_{z,i}} = P_{Y_{z,i}} - P_{Y_{z,i-1}}. \quad (9)$$

Произведем преобразования, подставив в формулу (8) выражение (9), получим

$$S_{z,i} = F_{z,i} + \Delta P_{Y_{z,i}} j. \quad (10)$$

Выразим из уравнения (10) величину фактической радиальной подачи на i -м ходе z -й ступени, подставив в него радиальную составляющую силы резания:

$$F_{z,i} = \left[\sqrt{\left[\frac{jM_2}{2(1+jM_1)} \right]^2 + \frac{S_{z,i} + jM_1 F_{z,i-1} + jM_2 \sqrt{F_{z,i-1}}}{1+jM_1}} - \frac{jM_2}{2(1+jM_1)} \right]^2. \quad (11)$$

Таким образом, формула (11) является моделью расчета текущего значения глубины резания в автоматическом ступенчатом цикле программной подачи на операции плоского шлифования с ЧПУ. Отметим, что расчет по формуле (11) на первом ходе начинается при условии, что значения программной и фактической радиальной подачи с предшествующего хода принимаются равными нулю для обоих случаев PX-PX и PX-ХЛ.

При известном значении величины фактической подачи на каждом ходе становится возмож-

ным расчет накопленного значения величин фактически снятого припуска через суммирование значений всех подач на глубину на i -м ходе z -й ступени:

$$F_{sum} = \sum_{z=1}^Z \sum_{i=1}^I F_{z,i}, \quad (12)$$

где Z – максимальное число ступеней цикла (в нашем примере 3); I – максимальное число ходов стола с заготовкой на z -й ступени.

Формула (11) устанавливает функциональную взаимосвязь между величиной снимаемого припуска на i -м ходе z -й ступени входными и выходными параметрами процесса обработки (параметрами станка, параметрами детали, параметрами инструмента и т.д.). Применение формул (11) и (12) дает возможность рассчитать величину снимаемого припуска, что позволит определить технологический размер и его погрешность.

Закключение

1. На операциях плоского шлифования происходит ступенчатое изменение программной подачи на глубину. Обзор литературы показал, что до сих пор не существует моделей и программ расчета текущих значений силы и глубины резания при ступенчатом изменении программной подачи на глубину, что не позволяет разработать методику прогнозирования параметров точности и качества обработки партии деталей для заданных условий операции плоского шлифования с ЧПУ.

2. Назначение режимов резания для операций плоского шлифования производится вручную, что приводит к снижению производительности обработки на современных плоскошлифовальных станках с ЧПУ. Это делает невозможным проведение полной автоматизации расчета режимов резания для УП и цифровизацию технологической подготовки производства.

3. В статье представлена аналитическая модель расчета текущего значения глубины резания в автоматическом ступенчатом цикле программной подачи на операции плоского шлифования с ЧПУ, которая устанавливает функциональную взаимосвязь между глубиной резания, упругими деформациями технологической системы и другими параметрами процесса обработки на протяжении всего цикла плоского врезного шлифования. Полученную модель расчета глубины резания можно использовать при прогнозировании точности обработки, а также для системы оптимизации режимов резания проектируемой операции плоского врезного шлифования с ЧПУ.

Список источников

1. Филимонов Л.Н. Плоское шлифование. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1985. 109 с.
2. Воронов С.А., Вэйдун М.А. Математическое моделирование процесса плоского шлифования // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2017. №4. С. 85-94.
3. Ильиных А.С. Формирование качества поверхности при плоском шлифовании торцом круга // Технология машиностроения. 2011. №4. С. 19-22.
4. Подборнов И.В., Свирищев В.И. Прогнозирование формирования остаточной шероховатости поверхности при плоском торцовом планетарном шлифовании // СТН. 2011. №5. С. 36-37.
5. Дианов А.А., Татаркин Е.Ю., Терентьев В.А. Образование волнистости при плоском прерывистом шлифовании периферией круга // Ползуновский Вестник. 2009. №1-2. С. 127-131.
6. Shipulin L.V., Shmidt I.V. Three-Stage Cycle in Plane Grinding by the Wheel Periphery // Russian Engineering Research. 2020, vol. 40, pp. 347-350. DOI: 10.3103/S1068798X20040218
7. Николаенко А.А. Моделирование обеспечения точности обработки при плоском глубинном шлифовании периферией круга // Технология машиностроения. 2011. №5. С. 57-59.
8. Михайлин С.М. Силы и контактные температуры при плоском торцовом шлифовании композиционными кругами // СТН. 2008. №5. С. 31-35.
9. Bakša T., Farsky J., Hronek O., Zetek M. Impact of Cutting Speed on Grinding Wheel Wear and Cutting Force when Grinding // Manufacturing Technology. 2018, vol. 18(5), pp. 699-703. DOI: 10.21062/ujep/180.2018/a/1213-2489/MT/18/5/699
10. Носенко В.А., Носенко С.В. Плоское глубинное шлифование пазов в заготовках из титанового сплава с непрерывной правкой шлифовального круга // Вестник машиностроения. 2013. №4. С. 74-79.
11. Переверзев П.П., Пименов Д.Ю. Модель силы резания при круглом врезном шлифовании с учетом затупления режущих зерен абразивного круга // Трение и износ. 2016. №1(37). С. 76-82.

References

1. Filimonov L.N. *Ploskoe shlifovanie* [Flat grinding]. Leningrad: Mechanical engineering, Leningrad branch, 1985. 109 p. (In Russ.)
2. Voronov S.A., Weidong M.A. Mathematical modeling of the flat grinding process. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin* [Journal of Machinery Manufacture and Reliability], 2017, no. 4, pp. 85-94. (In Russ.)
3. Ilinykh A.S. Formation of the surface quality at flat grinding with the wheel face end. *Tekhnologiya mashinostroeniya* [Engineering Technology], 2011, no. 4, pp. 19-22. (In Russ.)
4. Podbornov I.V., Svirshchev V.I. Prediction of the formation of residual surface roughness during flat end planetary grinding. *STIN* [Machines and Tools], 2011, no. 5, pp. 36-37. (In Russ.)
5. Dianov A.A., Tatarkin E.Yu., Terentiev V.A. Undulation formation during flat intermittent grinding by the wheel periphery. *Polzunovskiy Vestnik* [Polzunovskiy vestnik], 2009, no. 1-2, pp. 127-131. (In Russ.)
6. Shipulin L.V., Shmidt I.V. Three-stage cycle in plane grinding by the wheel periphery. *Russian Engineering Research*, 40, 347-350 (2020). DOI: 10.3103/S1068798X20040218
7. Nikolaenko A.A. Modeling of ensuring the accuracy of processing at flat deep grinding by the wheel periphery. *Tekhnologiya mashinostroeniya* [Engineering Technology], 2011, no. 5, pp. 57-59. (In Russ.)
8. Mikhailin S.M. Forces and contact temperatures at flat end grinding by composite wheels. *STIN* [Machines and Tools], 2008, no. 5, pp. 31-35. (In Russ.)
9. Bakša T., Farsky J., Hronek O., Zetek M. Impact of cutting speed on grinding wheel wear and cutting force when grinding. *Manufacturing Technology*, 18, 699-703 (2018). DOI: 10.21062/ujep/180.2018/a/1213-2489/MT/18/5/699
10. Nosenko V.A., Nosenko S.V. Flat deep grinding of slots in titanium alloy workpieces with continuous dressing of the grinding wheel. *Vestnik mashinostroeniya* [Russian Engineering Research], 2013, no. 4, pp. 74-79. (In Russ.)
11. Pereverzev P.P., Pimenov D.Yu. Model of the cutting force at circular plunge grinding, considering the blunting of the cutting grains of the abrasive wheel. *Trenie i iznos* [Friction and Wear], 2016, no. 1 (37), pp. 76-82. (In Russ.)

Поступила 27.05.2022; принята к публикации 30.08.2022; опубликована 26.09.2022
Submitted 27/05/2022; revised 30/08/2022; published 26/09/2022

Акинцева Александра Викторовна – кандидат технических наук, доцент кафедры техники, технологии и строительства, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.
Email: akintsevaav@susu.ru. ORCID 0000-0003-0588-1401

Переверзев Павел Петрович – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технологии автоматизированного машиностроения, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.
Email: pereverzevpp @ susu.ru. ORCID 0000-0002-1416-8918

Aleksandra V. Akintseva – PhD (Eng.), Associate Professor of the Engineering, Technology and Construction Department, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: akintsevaav@susu.ru. ORCID 0000-0003-0588-1401

Pavel P. Pereverzev – DrSc (Eng.), Associate Professor, Professor of the Automated Mechanical Engineering Technology Department, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: pereverzevpp@susu.ru. ORCID 0000-0002-1416-8918

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.9.048.4
DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-3-111-121



ВЛИЯНИЕ ФАЗОВОГО СОСТАВА НА ОБРАЗОВАНИЕ НАНО- И МИКРОТРЕЩИН В ПРИПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ, ПОДВЕРГНУТЫХ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКЕ

Федоров А.А., Полонянкин Д.А., Бредгауэр Ю.О., Жданова Ю.Е., Линовский А.В., Бобков Н.В.

Омский государственный технический университет, Омск, Россия

Аннотация. В статье изложены результаты экспериментального исследования влияния фазового состава на образование микро- и наноразмерных трещин в приповерхностном слое одно(α -Ti и β -Ti)- и двухфазных (α + β)-сплавов титана, подвергнутых проволочно-вырезной электроэрозионной обработке на станке Sodick VZ300L. Выполненный в ходе работы сравнительный анализ трещинообразования в однофазных сплавах титана, недостаточно описанный в литературе, с хорошо изученным образованием трещин в двухфазных титановых сплавах обуславливает актуальность данного исследования. Научная новизна работы заключается в установленном методами оптической, растровой и просвечивающей электронной микроскопии отсутствии качественного и количественного влияния фазового состава на трещинообразование в приповерхностном слое титановых сплавов BT3-1, BT5 и BT6. Практическая значимость полученных результатов заключается в определении преимущественной ориентации, а также характерных размеров микротрещин и магистральных нанотрещин в приповерхностном слое титановых сплавов BT3-1, BT5 и BT6, подвергнутых электроэрозионной обработке в 1, 2, 3 и 4 прохода, которые составили порядка 20, 12, 7 и 1 мкм соответственно. Полученные результаты являются основой рекомендаций по выбору метода финишной обработки поверхности: удаление дефектного «белого слоя» предлагается производить механической или электрохимической обработкой. Для полного удаления сетки микротрещин рекомендуется удалять припуск, превышающий глубину проникновения микротрещин не менее чем в 2 раза: для первого прохода – 40 мкм, для второго – 25 мкм, для третьего – 15 мкм, для четвертого – прохода 2 мкм.

Ключевые слова: титановые сплавы, фазовый состав, нанотрещины, микротрещины, приповерхностный слой, электроэрозионная обработка

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90219.

© Федоров А.А., Полонянкин Д.А., Бредгауэр Ю.О., Жданова Ю.Е., Линовский А.В., Бобков Н.В., 2022

Для цитирования

Влияние фазового состава на образование нано- и микротрещин в приповерхностном слое титановых сплавов, подвергнутых электроэрозионной обработке / Федоров А.А., Полонянкин Д.А., Бредгауэр Ю.О., Жданова Ю.Е., Линовский А.В., Бобков Н.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №3. С. 111-121. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-3-111-121>



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

EFFECT OF A PHASE COMPOSITION ON NANO- AND MICROCRACK FORMATION IN THE NEAR-SURFACE LAYER OF TITANIUM ALLOYS AFTER ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING

Fedorov A.A., Polonyankin D.A., Bredgauer Iu.O., Zhdanova Iu.E., Linovsky A.V., Bobkov N.V.

Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Abstract. The article presents the experimental study on the effect of a phase composition on micro- and nanocrack formation in the near-surface layer of a single(α -Ti and β -Ti)- and two-phase ($\alpha+\beta$) titanium alloys after wire-cut electrical discharge machining on Sodick VZ300L machine. A comparative analysis performed during the study on cracking in single-phase titanium alloys, insufficiently described in literature, with the well-studied crack formation in two-phase titanium alloys determines the relevance of this study. Scientific novelty of the study consists in the absence of a qualitative and quantitative impact of the phase composition on cracking in the near-surface layer of titanium alloys VT3-1, VT5 and VT6, established by optical, scanning and transmission electron microscopy. Practical relevance of the achieved results lies in establishing the preferred orientation, as well as the characteristic sizes of microcracks and mainline nanocracks in the near-surface layer of VT3-1, VT5 and VT6 titanium alloys after electrical discharge machining in 1, 2, 3 and 4 passes, being 20, 12, 7 and 1 μm , respectively. The achieved results are the basis for recommendations for selecting a surface finishing method: the defective «white layer» is proposed to be removed by mechanical or electrochemical treatment. To completely remove the network of microcracks, it is recommended to take off an allowance exceeding the penetration depth of microcracks by twice or higher: for the first pass is 40 μm , for the second one is 25 μm , for the third one is 15 μm and for the fourth one is 2 μm .

Keywords: titanium alloys, phase composition, nanocracks, microcracks, near-surface layer, electrical discharge machining

This research was funded by the Russian Foundation for Basic Research under Research Project No. 20-38-90219.

For citation

Fedorov A.A., Polonyankin D.A., Bredgauer Iu.O., Zhdanova Iu.E., Linovsky A.V., Bobkov N.V. Effect of a Phase Composition on Nano- and Microcrack Formation in the Near-Surface Layer of Titanium Alloys after Electrical Discharge Machining. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 3, pp. 111-121. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-3-111-121>

Введение

Повышение физико-механических свойств и функциональных характеристик изделий из сталей и сплавов является актуальной задачей в различных областях промышленности. Общеизвестно, что рабочий поверхностный слой деталей, узлов и агрегатов оказывает значительное влияние на их эксплуатационные характеристики, что особенно важно при производстве ответственных изделий, таких как авиационные двигатели. Воздействие высоких температур, агрессивных сред, а также больших динамических нагрузок определяет соответствующие требования к физико-химическим свойствам материалов и функциональным характеристикам конструктивных элементов, используемых в производстве изделий данного типа. Высокие коррозионная и теплостойкость, отношение прочности к весу обуславливают широкое применение титана и сплавов на его основе в авиации и ракетостроении, а также автомобильной промышленности и биомедицине. Вместе с тем вы-

сокая вязкость, химическая активность и высокотемпературная прочность наряду с относительно низкой теплопроводностью значительно усложняют обрабатываемость титана лезвийными методами [1], что подчеркивает актуальность применения альтернативных методов обработки титановых сплавов.

Электроэрозионная обработка (ЭЭО) относится к группе нетрадиционных электрофизических методов, обеспечивающих возможность повышения обрабатываемости титановых сплавов благодаря сочетанию следующих возможностей и преимуществ.

Так, методом ЭЭО реализуется высокоточная обработка любых токопроводящих материалов (в том числе сложной геометрической формы) вне зависимости от их физико-механических характеристик. Важной особенностью ЭЭО является возможность бездеформационной обработки тонкостенных заготовок, которая достигается за счет отсутствия непосредственного контакта между электродом-инструментом и деталью и, как следствие, силы резания [2].

К недостаткам ЭЭО титановых сплавов, обладающих различным исходным фазовым составом и микроструктурой, относится образование так называемого дефектного слоя, анализ состояния которого обладает важным прикладным значением [3-17]. Сверхбыстрый нагрев и последующее быстрое охлаждение и, как следствие, действие возникающих напряжений растяжения и сжатия приводят к возникновению сетки микро- и наноразмерных трещин, при этом трещинообразование в приповерхностном слое является неотъемлемой частью процесса ЭЭО и не может быть полностью исключено посредством подбора соответствующего режима обработки.

Как свидетельствует литературный обзор, большинство опубликованных работ посвящено исследованию состояния приповерхностного слоя самого распространенного класса ($\alpha+\beta$)-сплавов титана [1, 4, 6, 7, 11-17], тогда как подвергнутые электроэрозионной обработке сплавы однофазного состава остаются менее изученными. Ранее нами рассматривалось влияние режимов проволоочно-вырезной ЭЭО на морфологию, шероховатость и глубину залегания микротрещин титанового сплава BT3-1 (β -сплав) [8, 9].

В данной работе представлены результаты исследования влияния проволоочной электроэрозионной обработки (ПЭЭО) на образование микро- и наноразмерных трещин в приповерхностном слое одно(α -Ti и β -Ti)- и двухфазных ($\alpha+\beta$)-сплавов титана.

Материалы и методы исследования

В ходе эксперимента использовались титановые сплавы следующих марок: BT3-1 (β -сплав), BT5 (α -сплав) и BT6 ($\alpha+\beta$ -сплав). Образцы в ви-

де дисков толщиной 5 мм изготавливались из сортового проката вышеуказанных сплавов цилиндрической формы диаметром 42 мм. Проволочно-вырезная обработка проводилась в 1, 2, 3 и 4 прохода на электроэрозионном станке Sodick VZ300L. В качестве диэлектрической жидкости использовалась деионизированная вода. ПЭЭО выполнялась с применением латунной проволоки (Cu 65%, Zn 35%) в качестве электрода-инструмента, диаметр проволоки составлял 0,2 мм. В ходе экспериментальной части работы эмпирически подбирались режимы, удовлетворяющие требованию стабильности обработки и обеспечивающие минимальное количество обрывов проволоки (табл. 1).

Для аналитического исследования трещинообразования в приповерхностном слое методами оптической и электронной микроскопии по стандартным методикам изготавливались поперечные микрошлифы образцов титановых сплавов. Для анализа микроструктуры и фазового состава образцов методами оптической микроскопии (ОМ) и растровой электронной микроскопии (РЭМ) микрошлифы подверглись травлению длительностью ~3 секунды в спиртовом растворе азотной и плавиковой кислот (2% HNO_3 + 2% HF). Исследование микрошлифов после травления методом ОМ проводилось на микроскопе AxioObserver A1 (Carl Zeiss) с увеличением $\times 500$ крат. Анализ микрошлифов также выполнялся методом РЭМ на микроскопе JEOL JCM-5700 с увеличением $\times 10000$ крат. Исследование образцов в виде тонких фольг реализовано методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) на микроскопе JEOL JEM-2100 с увеличением от $\times 15000$ до $\times 50000$ крат.

Таблица 1. Режимы ПЭЭО обработки титановых сплавов

Table 1. WEDM (wire-cut electrical discharge machining) modes of titanium alloys

Марка сплава	Количество проходов	Длина импульса On, мкс	Пауза между импульсами Off, мкс	Средний ток $I_{\text{ср}}$, А	Среднее напряжение $U_{\text{ср}}$, В	Сила натяжения проволоки, Н
BT3-1	1	3,5	7	3,2	42	12
	2	1,5	6	2,2	62	16
	3	1	1,2	0,9	30	
	4	1	1,2	0,4	20	
BT5	1	3,5	7	3,2	40	12
	2	1,5	6	2,2	61	16
	3	1	1,2	0,9	30	
	4	1	1,2	0,4	25	
BT6	1	3,5	7	3,2	42	12
	2	1,5	6	2,2	62	16
	3	1	1,2	0,9	30	
	4	1	1,2	0,4	20	

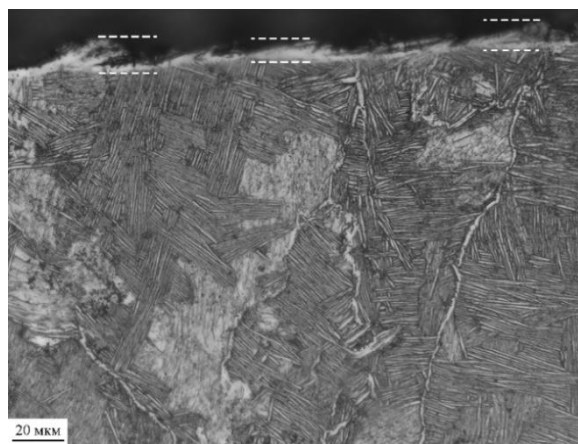
Результаты и их обсуждение

1. Оптическая микроскопия.

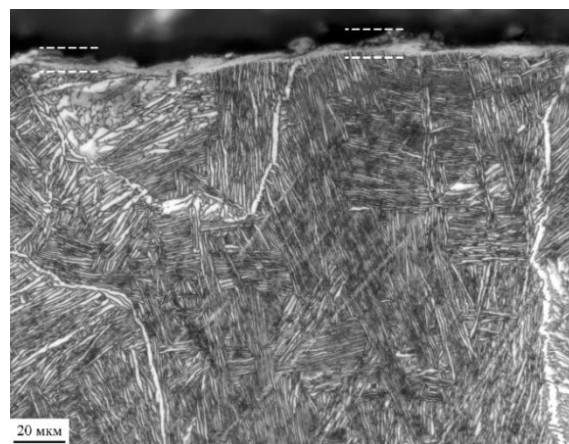
На **рис. 1** представлены оптические микрофотографии приповерхностного слоя поперечных микрошлифов титанового сплава ВТ3-1 (β -сплав), подвергнутого ПЭЭО в 1, 2, 3 и 4 прохода. На оптических микрофотографиях (**рис. 1, а, б**) вблизи обработанных поверхностей хорошо заметен так называемый «белый слой» [17], обозначенный параллельными пунктирными линиями. Значительно меньшая травимость границ зерен и (или) нанокристаллическая структура отличает «белый слой» от остального объема приповерхностного слоя. В ЭЭО приповерхностный слой образцов подвергается воздействию импульсов тока и претерпевает быстрый нагрев и локальное плавление с последующим резким охлаждением и кристаллизацией за счет прокачки диэлектрической жидкости.

При ПЭЭО в 1 и 2 прохода толщина «белого слоя» является практически одинаковой (см. **рис. 1,**

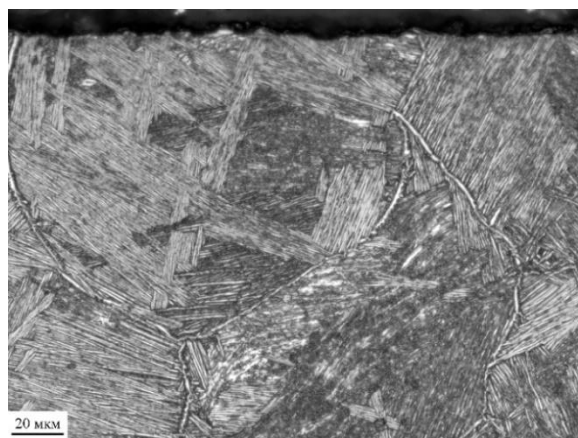
а, б). На оптических микрофотографиях образцов, обработанных в 3 (**рис. 1, в**) и 4 прохода (**рис. 1, г**) «белый слой» не визуализируется методом ОМ, что объясняется более низкими значениями действующей силы тока по сравнению с величиной тока, используемого при обработке в 1 и 2 прохода, и, следовательно, значительно меньшим количеством выделяемого тепла. Следует отметить, что микротрещины в приповерхностном слое образцов титанового сплава ВТ3-1, обработанных в 1, 2, 3 и 4 прохода, также не идентифицируются методом оптической микроскопии. Как свидетельствуют оптические микрофотографии на **рис. 1**, микроструктура приповерхностного слоя образцов после ПЭЭО типична для игольчатой α -фазы мартенсита и представлена колониями ламелей, ориентированных преимущественно параллельно друг другу и расположенных внутри крупных первичных β -зерен, достигающих размеров в несколько сотен микрометров.



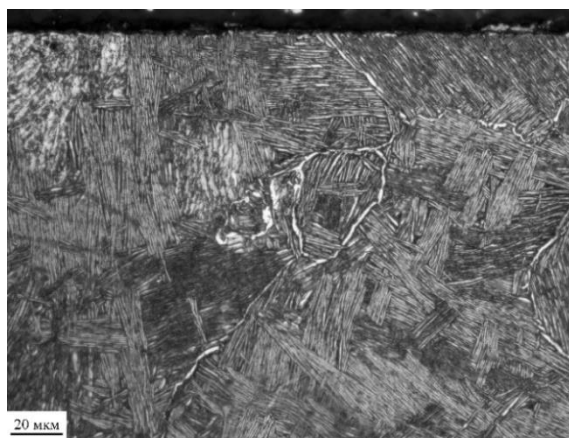
а



б



в



г

Рис. 1. Оптические микрофотографии поперечных микрошлифов титанового β -сплава ВТ3-1, подвергнутого ПЭЭО: а – после 1-го прохода; б – после 2-го прохода; в – после 3-го прохода; г – после 4-го прохода

Fig. 1. Optical micrographs of the cross-sections of β -Ti alloy samples (titanium grade VT3-1) after WEDM (wire-cut electrical discharge machining): а is after the 1st pass; б is after the 2nd pass; в is after the 3rd pass; г is after the 4th pass

На **рис. 2** представлены оптические микрофотографии приповерхностного слоя поперечных микрошлифов титанового сплава ВТ5 (α -сплав) после ПЭЭО в 1, 2, 3 и 4 прохода. После обработки в 1 (**рис. 2, а**) и 2 (**рис. 2, б**) прохода на оптических микрофотографиях наблюдается «белый слой», содержащий значительное количество микротрещин (указаны стрелками белого цвета), ориентированных преимущественно в направлении нормали к поверхности и в основном пересекающих всю глубину дефектного слоя. Микротрещины обладают различной протяженностью, при этом их длина не превышает 10 мкм. После ПЭЭО в 3 (**рис. 2, в**) и 4 (**рис. 2, г**) прохода «белый слой» не визуализируется методом ОМ, тогда как возможность идентификации микротре-

щин данным методом сохраняется. Микроструктура сплава ВТ5 (твердый раствор алюминия в титане) является однофазной (α -фаза) и представлена зернами полиэдрической формы.

На **рис. 3** представлены оптические микрофотографии микрошлифов титанового ($\alpha+\beta$)-сплава ВТ6, подвергнутого ПЭЭО. На оптической микрофотографии образца, обработанного в 1 проход (**рис. 3, а**), визуализируется сравнительно тонкий дефектный слой, при этом возникновение микротрещин в нем методом ОМ не установлено. После ПЭЭО титанового ($\alpha+\beta$)-сплава в 2 (**рис. 3, б**), 3 (**рис. 3, в**) и 4 (**рис. 3, г**) прохода «белый слой», равно как и микротрещины в приповерхностном слое, не визуализируются методом ОМ.

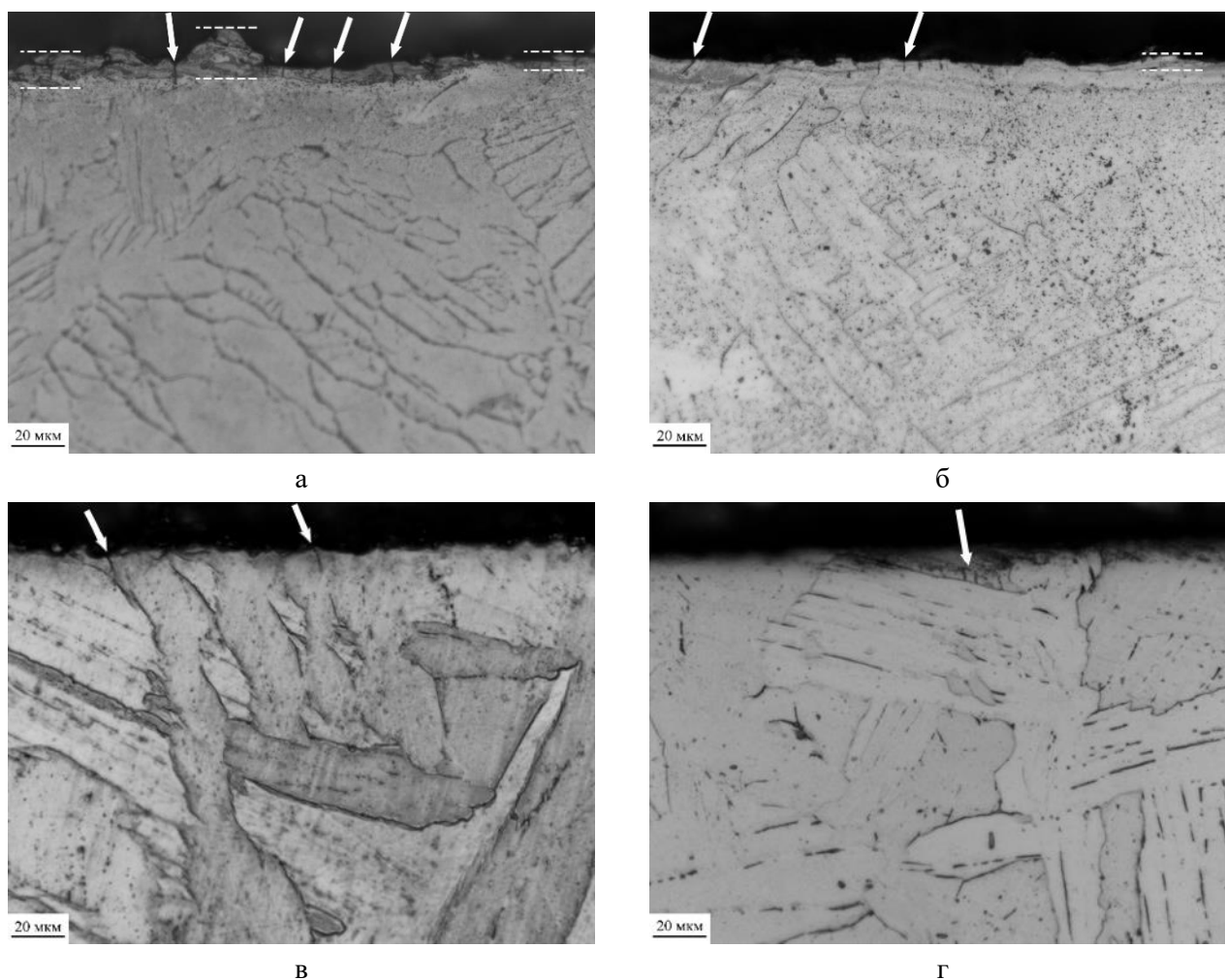


Рис. 2. Оптические микрофотографии поперечных микрошлифов титанового α -сплава ВТ5, подвергнутого ПЭЭО: а – после 1-го прохода; б – после 2-го прохода; в – после 3-го прохода; г – после 4-го прохода
Fig. 2. Optical micrographs of the cross-sections of α -Ti alloy samples (titanium grade VT5) after WEDM: а is after the 1st pass; б is after the 2nd pass; в is after the 3rd pass; г is after the 4th pass

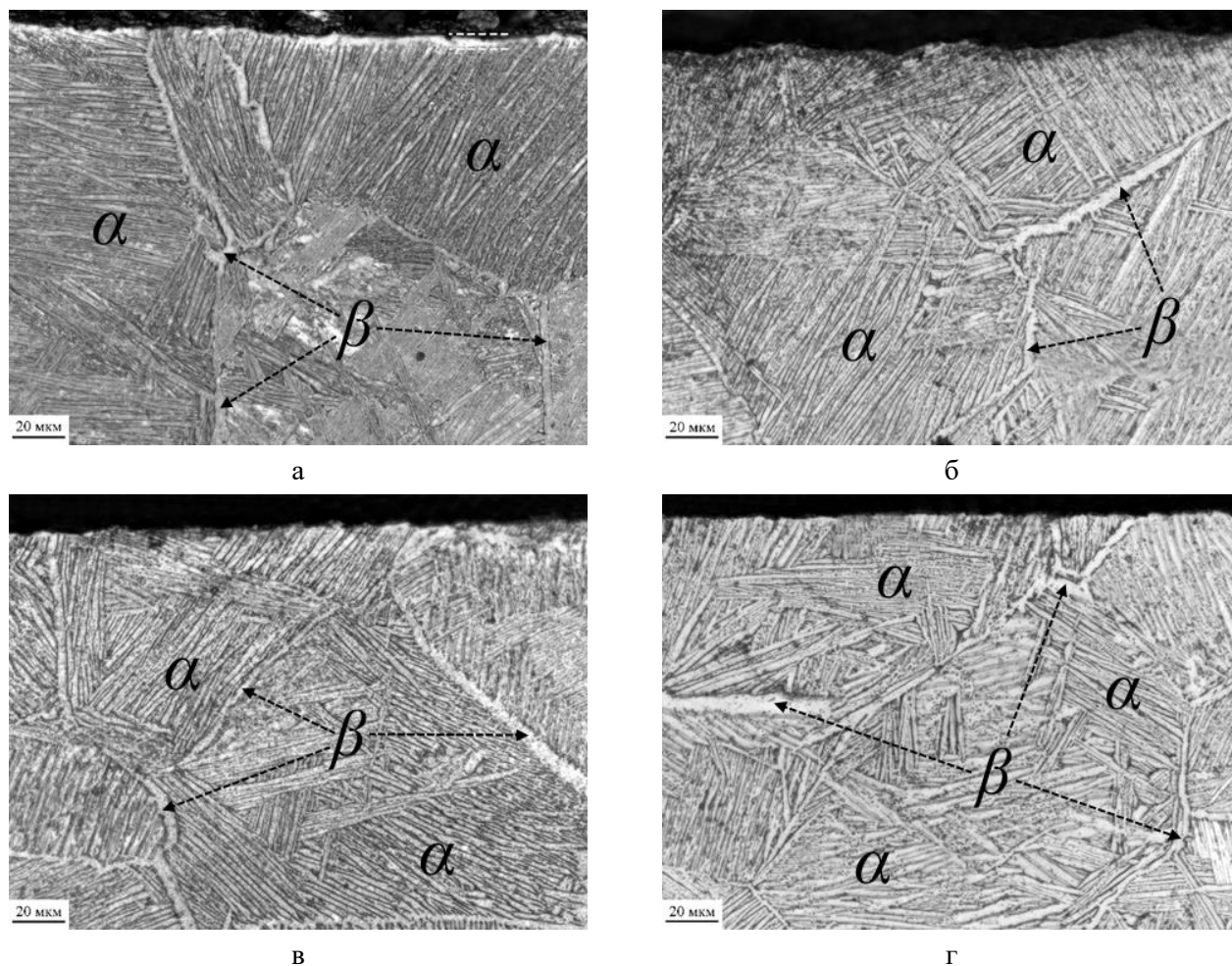


Рис. 3. Оптические микрофотографии поперечных микрошлифов титанового ($\alpha+\beta$)-сплава ВТ6, подвергнутого ПЭЭО: а – после 1-го прохода; б – после 2-го прохода; в – после 3-го прохода; г – после 4-го прохода

Fig. 3. Optical micrographs of the cross-sections of ($\alpha+\beta$)-Ti alloy samples (titanium grade VT6) after WEDM: а is after the 1st pass; б is after the 2nd pass; в is after the 3rd pass; г is after the 4th pass

Как свидетельствуют оптические микрофотографии (см. **рис. 3**), микроструктура приповерхностного слоя образцов ВТ6 после ПЭЭО типична для титановых ($\alpha+\beta$)-сплавов мартенситного класса и представлена равноосными зернами с ламеллярной структурой. Внутренние области зерен, содержащие пластинчатую α -фазу и колонии α -ламелей, отделяются друг от друг межзеренной β -фазой. Размеры зерен варьируются в широком диапазоне от нескольких десятков до нескольких сотен микрометров.

Таким образом, метод оптической микроскопии с увеличением $\times 500$ крат обеспечивает возможность визуализации микротрещин в приповерхностном слое титанового сплава ВТ5 после его ЭЭО в 1, 2, 3 и 4 прохода. Метод оптической микроскопии с увеличением $\times 500$ крат не обеспечивает возможность визуализации микро-

наноразмерных трещин в дефектном приповерхностном слое титановых сплавов ВТ3-1 и ВТ6, что исключает возможность его применения для анализа трещинообразования после электроэрозионной обработки сплавов этих марок и обуславливает необходимость использования альтернативных электронно-микроскопических методов исследования.

2. Растровая электронная микроскопия.

Поперечные микрошлифы образцов титановых сплавов ВТ3-1, ВТ5 и ВТ6 после ПЭЭО также анализировались методом растровой электронной микроскопии.

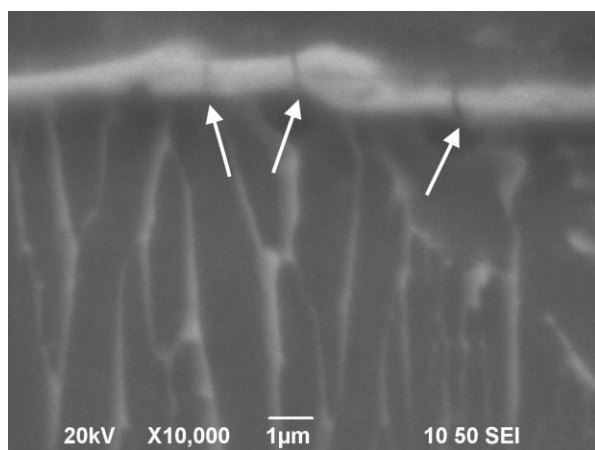
Методом РЭМ не установлены характерные различия в ориентации, ширине и глубине проникновения микротрещин в приповерхностный слой образцов титановых сплавов ВТ3-1, ВТ5 и ВТ6 после ПЭЭО в 1, 2 и 3 прохода. Наибольшее

количество микротрещин обнаруживается при анализе микрошлифов образцов исследуемых сплавов, обработанных в 1 проход. Значения силы тока и напряжения, используемые в этом режиме, обеспечивают максимальную производительность обработки, при этом величина возникающих в приповерхностном слое термонапряжений превышает его предел прочности, способствуя образованию развитой сетки микротрещин. После первого прохода ПЭЭО максимальная длина микротрещин не превышает 20 мкм, а ширина достигает порядка 3 мкм, что свидетельствует о наибольшей интенсивности трещинообразования в приповерхностном слое титановых сплавов, подвергнутых электроэрозионной обработке в 1 проход. По мере увеличения числа проходов ПЭЭО уменьшаются размеры и количество микротрещин в приповерхностном слое титановых сплавов ВТ3-1, ВТ5 и ВТ6, при этом

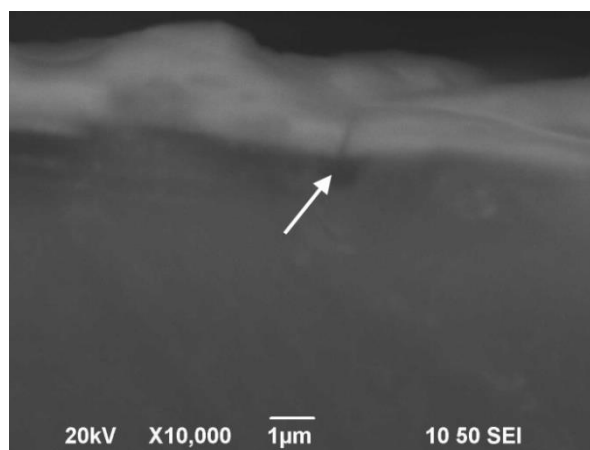
сохраняется их преимущественная ориентация в направлении нормали к обработанной поверхности. По данным РЭМ после 2-го и 3-го проходов не были обнаружены микротрещины длиной более 12 и 7 мкм соответственно.

После 4-го прохода ПЭЭО в приповерхностном слое титановых сплавов ВТ3-1, ВТ5 и ВТ6 образуется микро- и нанотрещины, которые визуализируются методом РЭМ недостаточно хорошо даже при увеличении 10,000 крат (**рис. 4**).

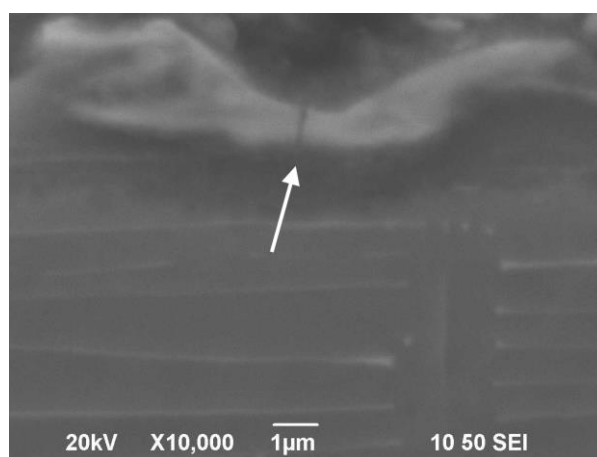
После 4-го прохода ПЭЭО наибольшее количество трещин зафиксировано в приповерхностном слое титанового сплава ВТ3-1 (**рис. 4, а**), тогда как микротрещины наибольшей длины образуются в приповерхностном слое титанового сплава ВТ5 (**рис. 4, б**). Как и после ПЭЭО в 1, 2 и 3 прохода, после 4-го прохода трещины преимущественно ориентированы в направлении нормали к обработанной поверхности.



а



б



в

Рис. 4. РЭМ-микрофотографии поперечных микрошлифов титановых сплавов после 4-го прохода ПЭЭО:

а – ВТ3-1; б – ВТ5; в – ВТ6

Fig. 4. SEM micrographs of the cross-sections of Ti alloys after the 4th pass of WEDM: а is VT3-1; б is VT5; в is VT6

Сложность визуализации трещин субмикронных размеров, образующихся в приповерхностном слое титановых сплавов ВТ3-1, ВТ5 и ВТ6, подвергнутых ПЭЭО в 4 прохода, обуславливает целесообразность их анализа с применением метода ПЭМ.

3. Просвечивающая электронная микроскопия.

На рис. 5 представлены светлопольные ПЭМ-изображения участков приповерхностного слоя титановых сплавов, подвергнутых ПЭЭО в 4 прохода.

Как свидетельствует рис. 5, а, после 4-го прохода ПЭЭО приповерхностный слой титанового сплава ВТ3-1 содержит ориентированную перпендикулярно поверхности сужающуюся магистральную нанотрещину длиной ~ 700 нм и шириной, не превышающей 90 нм практически на всем своем протяжении. На рис. 5, а также наблюдается вторичная нанотрещина, являющаяся ответвлением от первичной нанотрещины. Длина и ширина вторичной нанотрещины значительно меньше, чем соответствующие размеры первичной магистральной нанотрещины.



а



б



в

Рис. 5. ПЭМ-микрофотографии титановых сплавов ВТ3-1 (а), ВТ5 (б) и ВТ6 (в) после 4-го прохода ПЭЭО (светлопольные изображения)

Fig. 5. TEM micrographs of Ti alloys VT3-1 (a), VT5 (б) and VT6 (в) after the 4th pass of WEDM (bright-field images)

Рис. 5, б демонстрирует ветвление нанотрещин в приповерхностном дефектном слое сплава BT5, обработанного ПЭЭО в 4 прохода: в середине первичной нанотрещины длиной порядка 250 нм и не превышающей 80 нм шириной образуется значительно более протяженная (~750 нм) вторичная нанотрещина. Первичная и вторичная нанотрещины ориентированы перпендикулярно обработанной поверхности и обладают сопоставимой шириной.

Как свидетельствует **рис. 5, в**, после 4-го прохода ПЭЭО приповерхностный слой титанового сплава BT6 содержит ориентированную перпендикулярно поверхности сужающуюся магистральную нанотрещину длиной ~1 мкм и шириной, не превышающей 100 нм практически на всем своем протяжении.

Установленные методом ПЭМ результаты подтверждают данные, полученные методами ОМ и РЭМ: магистральные нанотрещины в приповерхностном слое сплавов BT3-1, BT5 и BT6 ориентированы перпендикулярно обработанной поверхности, а их длина не превышает характерные размеры дефектного слоя.

Заключение

Полученные в ходе выполнения работы результаты позволяют сформулировать следующие основные выводы:

1. Приповерхностный слой подвергнутых электроэрозионной обработке титановых сплавов BT3-1, BT5 и BT6 подвержен образованию микро- и нанотрещин независимо от фазового состава и режима ПЭЭО (номера прохода).

2. Метод оптической микроскопии обеспечивает возможность визуализации микротрещин в приповерхностном слое титанового сплава BT5 после его ПЭЭО в 1, 2, 3 и 4 прохода.

3. Методом РЭМ не установлены характерные различия в ориентации, ширине и глубине проникновения микротрещин в дефектный приповерхностный слой титановых сплавов BT3-1, BT5 и BT6 после ПЭЭО в 1, 2 и 3 прохода, составляющий не более 20, 12 и 7 мкм соответственно.

4. Установленные методом ПЭМ результаты подтверждают данные, полученные методами ОМ и РЭМ: магистральные нанотрещины в приповерхностном слое сплавов BT3-1, BT5 и BT6 после ПЭЭО в 4 прохода ориентированы перпендикулярно поверхности обработки, а их протяженность не превышает характерных размеров дефектного слоя, который составил порядка 1 мкм.

Удаление дефектного слоя, содержащего сетку микротрещин, может быть осуществлено шлифованием, полированием или электрохимической обработкой. При этом рекомендуется удалять припуск, превышающий глубину проникновения микротрещин не менее чем в 2 раза. Для первого прохода – 40 мкм, для второго – 25 мкм, для третьего – 15 мкм и для четвертого – 2 мкм.

Список источников

1. Karkalos N.E., Galanis N.I., Markopoulos A.P. Surface roughness prediction for the milling of Ti-6Al-4V ELI alloy with the use of statistical and soft computing techniques // *Measurement*. 2016. Vol. 90. P. 25-35. DOI: 10.1016/j.measurement.2016.04.039.
2. Шлыков Е.С., Абляз Т.Р., Муратов К.Р. Обеспечение точности проволоочно-вырезной электроэрозионной обработки изделий, выполненных из труднообрабатываемых материалов // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2020. Т. 22. № 3. С. 6-17. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.3-6-17.
3. The World's Leading Titanium Distributor // *Supra Alloys*. URL: <http://www.supraalloys.com> (дата обращения: 07.02.2020).
4. HaCalik A., Caydas U. Electrical discharge machining of titanium alloy // *Appl. Surf. Sci.* 2007. Т. 253. С. 9007-9016. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2007.05.031>
5. Sarkar S., Mitra S., Bhattacharyya B. Parametric analysis and optimization of wire electrical discharge machining of γ -titanium aluminide alloy // *Journal of Materials Processing Technology*. 2005. Vol. 159, Issue 3. P. 286-294. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2004.10.009.
6. Kushwaha A., Jadam T., Datta S. [et al.]. Assessment of surface integrity during electrical discharge machining of titanium grade 5 alloys (Ti-6Al-4V) // *Materials Today: Proc.* 2019. Vol. 18, Part 7. P. 2477-2485. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.07.097.
7. Pramanik A., Basak A. K., Prakash C. Understanding the wire electrical discharge machining of Ti6Al4V alloy // *Heliyon*. 2019. Vol. 5, Issue 4. e01473. DOI: 10.1016/j.heliyon.2019. e01473.
8. Влияние режимов проволоочно-вырезной электроэрозионной обработки на морфологию и шероховатость поверхности титанового сплава BT3-1 / А.А. Федоров, А.И. Блесман, Д.А. Полонянкин [и др.] // *Россия молодая: передовые технологии – в промышленность*. 2017. № 1. С. 62-66.
9. Исследование поверхности образцов титанового сплава BT3-1, изготовленных с помощью электроэрозионной обработки / Ю.Е. Жданова, А.А. Федоров, А.И. Блесман [и др.] // *Россия молодая: передовые технологии – в промышленность*. 2019. № 1. С. 5-10. DOI: 10.25206/2310-4597-2019-1-5-10.
10. Исследование влияния режимов проволоочно-вырезной электроэрозионной обработки на трещинообразование и морфологию поверхностного

- слоя титанового сплава BT3-1 / А.А. Федоров, Д.А. Полонянкин, А.И. Блесман [и др.] // Омский научный вестник. 2020. № 2 (170). С. 23-30. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-170-23-30.
11. Soo S.L., Antar M.T., Aspinwall D.K. [et al.]. The effect of wire electrical discharge machining on the fatigue life of Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo aerospace alloy // *Procedia CIRP*. 2013. Vol. 6. P. 215-219. DOI: 10.1016/j.procir.2013.03.043.
 12. Tondy H.R., Tigga A.M. Characterization of surface integrity of Ti6Al4V alloy machined by using wire electrical discharge machining process // *Materials Today: Proc.* 2019. Vol. 11, Part 2. P. A8-A14. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.03.049.
 13. Kumar R., Roy S., Gunjan P. [et al.]. Analysis of MRR and surface roughness in machining Ti-6Al-4V ELI titanium alloy using EDM process // *Procedia Manufacturing*. 2018. Vol. 20. P. 358-364. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.02.052.
 14. Patnaik P., Datta S., Mahapatra S.S. WEDM performance of Ti-6Al-4V: emphasis on multi-cut strategy, effects of electrode wire // *Materials Today: Proc.* 2019. T. 18, Part 7. P. 4102-4110. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.07.354.
 15. Jain S.P., Ravindra H.V., Ugrasen G. [et al.]. Study of surface roughness and AE signals while machining titanium grade-2 material using ANN in WEDM // *Materials Today: Proc.* 2017. Vol. 4, Issue 9. P. 9557-9560. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.06.223.
 16. Arikatla S.P., Mannan K.T., Krishnaiah A. Surface integrity characteristics in wire electrical discharge machining of titanium alloy during main cut and trim cuts // *Materials Today: Proc.* 2017. Vol. 4, Issue 2, Part A. P. 1500-1509. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.01.172.
 17. Muralova K., Kovar J., Klakurkova L. [et al.]. Analysis of surface and subsurface layers after WEDM for Ti-6Al-4V with heat treatment // *Measurement*. 2018. Vol. 116. P. 556-564. DOI: 10.1016/j.measurement.2017.11.053.
 5. Sarkar S., Mitra S., Bhattacharyya B. Parametric analysis and optimization of wire electrical discharge machining of γ -titanium aluminide alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 159, 3, 286-294 (2005). DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2004.10.009
 6. Kushwaha A., Jadam T., Datta S. et al. Assessment of surface integrity during electrical discharge machining of titanium grade 5 Alloys (Ti-6Al-4V). *Materials Today: Proc.*, 18, 7, 2477-2485 (2019). DOI: 10.1016/j.matpr.2019.07.097
 7. Pramanik A., Basak A.K., Prakash C. Understanding the wire electrical discharge machining of Ti6Al4V alloy. *Heliyon*, 5, 4, e01473 (2019). DOI: 10.1016/j.heliyon.2019.e01473
 8. Fedorov A.A., Blesman A.I., Polonyankin D.A. et al. Influence of modes of wire-cut EDM on the morphology and roughness of the surface of titanium alloy VT3-1. *Rossiia molodaya: peredovye tekhnologii – v promyshlennost* [Russia is young: advanced technologies for industry], 2017, no. 1, pp. 62-66. (In Russ.)
 9. Zhdanova Yu.E., Fedorov A.A., Blesman A.I. et al. Study on the surface of samples of titanium alloy VT3-1 manufactured using electroerosion machining. *Rossiia molodaya: peredovye tekhnologii – v promyshlennost* [Russia is young: advanced technologies for industry], 2019, no. 1, pp. 5-10. (In Russ.) DOI: 10.25206/2310-4597-2019-1-5-10
 10. Fedorov A.A., Polonyankin D.A., Blesman A.I. et al. Study on the influence of wire-cut EDM modes on crack formation and morphology of the surface layer of titanium alloy VT3-1. *Omskiy nauchnyi vestnik* [Omsk Scientific Bulletin], 2020, no. 2 (170), pp. 23-30. (In Russ.) DOI: 10.25206/1813-8225-2020-170-23-30
 11. Soo S.L., Antar M.T., Aspinwall D.K. et al. The effect of wire electrical discharge machining on the fatigue life of Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo aerospace alloy. *Procedia CIRP*, 6, 215-219 (2013). DOI: 10.1016/j.procir.2013.03.043
 12. Tondy H.R., Tigga A.M. Characterization of surface integrity of Ti6Al4V alloy machined by using wire electrical discharge machining process. *Materials Today: Proc.*, 11, 2, A8-A14 (2019). DOI: 10.1016/j.matpr.2019.03.049
 13. Kumar R., Roy S., Gunjan P. et al. Analysis of MRR and surface roughness in machining Ti-6Al-4V ELI titanium alloy using EDM process. *Procedia Manufacturing*, 20, 358-364 (2018). DOI: 10.1016/j.promfg.2018.02.052
 14. Patnaik P., Datta S., Mahapatra S.S. WEDM performance of Ti-6Al-4V: emphasis on multi-cut strategy, effects of electrode wire. *Materials Today: Proc.*, 18, 7, 4102-4110 (2019). DOI: 10.1016/j.matpr.2019.07.354
 15. Jain S.P., Ravindra H.V., Ugrasen G. et al. Study of surface roughness and AE signals while machining titanium grade-2 material using ANN in WEDM. *Materials Today: Proc.*, 4, 9, 9557-9560 (2017). DOI: 10.1016/j.matpr.2017.06.223

References

1. Karkalos N.E., Galanis N I., Markopoulos A.P. Surface roughness prediction for the milling of Ti-6Al-4V ELI alloy with the use of statistical and soft computing techniques. *Measurement*, 90, 25-35 (2016). DOI: 10.1016/j.measurement.2016.04.039
2. Shlykov E.S., Ablyaz T.R., Muratov K.R. Ensuring the accuracy of wire-cutting EDM processing of products made of hard-to-handle materials. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* [Metal Working and Material Science], 2020, vol. 22, no. 3, pp. 6-17. (In Russ.) DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.3-6-17
3. The world's leading titanium distributor. Supra Alloys. Available at: <http://www.supraalloys.com> (Accessed on February 07, 2020).
4. Hascalik A., Caydas U. Electrical discharge machining of titanium alloy. *Appl. Surf. Sci.*, 253, 9007-9016 (2007). <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2007.05.031>

16. Arikatla S.P., Mannan K.T., Krishnaiah A. Surface integrity characteristics in wire electrical discharge machining of titanium alloy during main cut and trim cuts. *Materials Today: Proc.*, 4, 2, A, 1500-1509 (2017). DOI: 10.1016/j.matpr.2017.01.172
17. Muralova K., Kovar J., Klakurkova L. et al. Analysis of surface and subsurface layers after WEDM for Ti-6Al-4V with heat treatment. *Measurement*, 116, 556-564 (2018). DOI: 10.1016/j.measurement. 2017.11.053

Поступила 06.07.2022; принята к публикации 08.08.2022; опубликована 26.09.2022
Submitted 06/07/2022; revised 08/08/2022; published 26/09/2022

Федоров Алексей Аркадьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения», Омский государственный технический университет, Омск, Россия.
Email: fedot83@gmail.com. ORCID 0000-0002-6681-087X

Полонянкин Денис Андреевич – кандидат педагогических наук, доцент кафедры «Физика», Омский государственный технический университет, Омск, Россия.
Email: polonjan@mail.ru. ORCID 0000-0001-6799-3105

Бредгауэр Юлия Олеговна – ассистент кафедры «Технология машиностроения», Омский государственный технический университет, Омск, Россия.
Email: bredjulia9449@gmail.com. ORCID 0000-0002-0267-8179

Жданова Юлия Евгеньевна – аспирант кафедры «Технология машиностроения», Омский государственный технический университет, Омск, Россия.
Email: gdanovajulia@mail.ru. ORCID 0000-0002-9129-1450

Линовский Александр Валерьевич – старший преподаватель кафедры «Технология машиностроения», Омский государственный технический университет, Омск, Россия.
Email: alexlinovsky@mail.ru. ORCID 0000-0003-1487-7893

Бобков Николай Владимирович – старший преподаватель кафедры «Технология машиностроения», Омский государственный технический университет, Омск, Россия.
Email: bobkov-n@mail.ru. ORCID 0000-0002-5831-282X

Alexey A. Fedorov – PhD (Eng.), Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, Omsk State Technical University, Omsk, Russia.
Email: fedot83@gmail.com. ORCID 0000-0002-6681-087X

Denis A. Polonyankin – PhD (Pedagogy), Associate Professor of the Physics Department, Omsk State Technical University, Omsk, Russia.
Email: polonjan@mail.ru. ORCID 0000-0001-6799-3105

Iuliia O. Bredgauer – Teaching Assistant of the Department of Mechanical Engineering Technology, Omsk State Technical University, Omsk, Russia.
Email: bredjulia9449@gmail.com. ORCID 0000-0002-0267-8179

Iuliia E. Zhdanova – postgraduate student of the Department of Mechanical Engineering Technology, Omsk State Technical University, Omsk, Russia.
Email: gdanovajulia@mail.ru. ORCID 0000-0002-9129-1450

Alexander V. Linovsky – Senior Lecturer of the Department of Mechanical Engineering Technology, Omsk State Technical University, Omsk, Russia.
Email: alexlinovsky@mail.ru. ORCID 0000-0003-1487-7893

Nikolay V. Bobkov – Senior Lecturer of the Department of Mechanical Engineering Technology, Omsk State Technical University, Omsk, Russia.
Email: bobkov-n@mail.ru. ORCID 0000-0002-5831-282X

СТАНДАРТИЗАЦИЯ, СЕРТИФИКАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ

STANDARDIZATION, CERTIFICATION AND QUALITY MANAGEMENT

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 658.56
DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-3-122-129



ИЗОБРЕТАТЕЛЬСКАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ БУДУЩЕГО ТЕХНИЧЕСКОГО ПРОГРЕССА: СТАНДАРТИЗАЦИЯ И ПРОБЛЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА НАУЧНЫХ РАЗРАБОТОК

Васецкая Н.О.

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

Аннотация. Рассмотрена проблема попыток стандартизации инноваций, связанная с творческим характером изобретательской деятельности. При этом отмечается историчность данного вопроса, подробно освещаются попытки его решения в прошлом. Предлагается принципиально новый подход к проведению такой стандартизации ввиду сложности классического объектного подхода. Автор отмечает актуальность данного вопроса, исходя из увеличившейся скорости научно-технического прогресса, обосновывая важность изменений в стандартизации и необходимость её наличия. В качестве данных для исследования были использованы книги Г.С. Альтшуттера – основателя теории решения изобретательских задач – как первые попытки выработать стандарт для изобретательской деятельности, далее были проанализированы имеющиеся реалии и изучены социально-психологические аспекты. В качестве результатов работы предлагаются два возможных варианта решения поставленной проблемы: типологическая стандартизация изобретательской деятельности и стандартизация условий осуществления данной деятельности. При этом оба решения позволяют получить качественный результат для увеличения продуктивности изобретателей. Также этот подход позволит учитывать личностные особенности сотрудников научных организаций, что обеспечит необходимое качество разработок ввиду полезного и продуктивного психологического климата в среде научно-конструкторских разработок. Приведена полезная информация по отдельным аспектам изобретательской деятельности, сопровождаемая показательными примерами, на основании которых проводится аргументация тех или иных положений.

Ключевые слова: стандартизация, научный прогресс, наука, развитие, эффективность, управление

© Васецкая Н.О., 2022

Для цитирования

Васецкая Н.О. Изобретательская деятельность в условиях неопределённости будущего технического прогресса: стандартизация и проблемы повышения качества научных разработок // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №3. С. 122-129. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-3-122-129>



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

INVENTOR WORK AMID UNCERTAINTY OF THE FUTURE TECHNICAL PROGRESS: STANDARDIZATION AND PROBLEMS OF IMPROVING R&D QUALITY

Vasetskaya N.O.

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

Abstract. This paper describes the problem of standardization of innovations, which is related to the creative aspect of R&D work. The author looks at the historical context of the problem describing in detail previous attempts to resolve it. As the classical object-based approach would not be easy to apply in this case, a completely new approach to standardization is proposed. Pointing at today's higher rate of scientific and technical progress, the author stresses the relevance of this problem while substantiating the need for such a system and explaining why it is crucial to revise it. The study is based on the works by G. S. Altschuller, the founder of the Theory of Inventive Problem Solving, which constitute the first attempts to elaborate a standard for inventions. The author also analyzes the current situation and looks at the social and psychological aspects of the issue. The paper offers two possible solutions for the above problem: typology-based standardization of inventions and standardization of the inventor work environment. Both solutions prove effective in boosting inventor efficiency. This approach allows to account for the personality traits of researchers, which can help create a stimulating work environment thus ensuring quality output. The paper gives some useful information on certain aspects of inventor work while using case studies to support certain statements.

Keywords: standardization, scientific progress, science, development, efficiency, management

For citation

Vasetskaya N.O. Inventor Work Amid Uncertainty of the Future Technical Progress: Standardization and Problems of Improving R&D Quality. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 3, pp. 122-129. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-3-122-129>

Введение

В современном мире скорость технических и технологических изменений настолько велика, что зачастую становится сложно предположить направление технического прогресса в будущем. Это касается как долгосрочных прогнозов, так и среднесрочных. Зачастую даже краткосрочный анализ не способен учесть внезапные технологические скачки, такие как, например, разработка Илоном Маском электромобиля [1].

При этом важно, что не всегда понятно, какое именно направление будет принимать технический прогресс. Часто оказывается так, что технология сложнопредсказуема и её дальнейшее направление развития резко меняется. В качестве примера можно привести изменения в техпроцессе процессоров на архитектуре x86, которое пытались (достаточно успешно) предсказать разработчики печатных плат и литографических устройств. Однако ими был закономерно предсказан «минимальный порог» техпроцесса, которым возможно было бы использовать в таких процессорах, и так и оказалось в действительности: при использовании техпроцесса менее 7 нм между транзисторами возникало взаимодействие внутренних гравитационных сил атомов, что не позволяло в дальнейшем уменьшать размеры транзисторов. Предсказать

дальнейшее развитие было невозможно, какие-либо комментарии сами разработчики давать отказывались. Однако решение предоставила компания Apple, разработав принципиально иную архитектуру процессоров: ARM.

Стоит сказать, что в этом примере направление технического прогресса не просто поменялось, а разделилось на две ветви: одна направлена в сторону усовершенствования архитектуры кристалла, другая решила отказаться от использования жёстких логических транзисторов в принципе и направилась в сторону разработки квантовых компьютеров [2]. На текущий момент также довольно сложно сказать, каким будет дальнейшее развитие.

При этом мы должны учитывать, что для получения высококачественного результата нам необходимо разработать эталон, который и считать образцом качества, то есть, говоря другими словами, технологический стандарт. И здесь мы сталкиваемся с проблемой его разработки.

Дело в том, что стандарт по определению опирается на какие-либо имеющиеся данные, будь то научные эксперименты, производственные испытания или данные от конечного потребителя. А как быть в случае, когда таких данных просто нет? Например, довольно легко разработать стандарт для производства коровьего молока: нам точно известно, какие вещества в молоке

должны быть и в каком количестве, а также мы точно знаем, каких веществ и микроорганизмов там быть не должно. У нас есть данные клинических испытаний, есть данные от биологов и маркетологов – то есть мы владеем полной информацией о продукте и его качестве, чтобы выработать соответствующие требования к нему.

В случае же с инновационными продуктами у нас возникают сложности: мы не можем выработать эталон в связи с отсутствием достаточной информации (как аналитической, так и статистической), при этом мы тем не менее имеем необходимость в такой разработке, поскольку жертвовать качеством, отдавая приоритет новым технологиям, зачастую не только неразумно, но и смертельно опасно. Новая разработка компании Samsung, например, спровоцировала серьёзные травмы для потребителей: их смартфоны взрывались из-за перегрева аккумуляторной батареи.

В свете данной проблемы, а также учитывая критическую важность качества для конечного потребителя, мы считаем необходимым решить этот актуальный вопрос конфликта между инновациями и прогрессом, с одной стороны, и качеством и безопасностью – с другой [3].

Для решения этого вопроса обратимся к истории и посмотрим, как такие конфликты решались в прошлом и можно ли применить эти приёмы в настоящее время.

Исторический аспект

В прошлом попытки предсказать направление прогресса имели место быть. В частности, советский учёный Г.С. Альтшуллер предложил теорию решения изобретательских задач, о которой подробно рассказал в книге «Алгоритм изобретения» [4]. Суть его разработок сводилась к тому, что в любом изобретении используются некоторые шаблонные способы усовершенствований, которые способны приносить пользу и быть реализуемыми в промышленных масштабах. Такие правила изобретательства он выделил в отдельные алгоритмы, названные им «алгоритмами ТРИЗ» (ТРИЗ – теория решения изобретательских задач).

ТРИЗ отвечала на вопросы, связанные с тем, как и по каким правилам происходит изобретательский процесс. Нам это интересно в том контексте, что если такие правила объективны, существуют независимо от технологического уровня и при этом их число конечно, то в принципе будет возможным выполнить разработку стандарта не к отдельным конкретным изобре-

тениям, а к этим принципам изобретательства. Это бы также позволило обойти необходимость выработки каких-либо отдельных стандартов для каждого неиспробованного изобретения, так как стандартные вопросы безопасности зачастую неприменимы к сфере инноваций ввиду их высокой вариативности. Но если бы такие стандарты можно было создать применительно к процессу изобретения, то мы могли бы обойти такую необходимость, обеспечив при этом безопасность новых разработок.

Исторически, однако, такие попытки не увенчались успехом. Попытки выработать стандарты предпринимались неоднократно, сам алгоритм ТРИЗ был одним из таковых, однако и он, ни в одной из своих версий, не получил широкого распространения во всём научном сообществе. Вероятно, причиной тому было несколько факторов, один из которых заметил сам Альтшуллер: невозможно заранее предсказать, как будут развиваться способы изобретательства. Поэтому даже его авторский алгоритм имел больше десятка версий, последние из которых очень сильно отличаются от первых, при этом значительно расширены и включают на порядок больше способов изобретательства, чем первые версии этого алгоритма.

Стандартизация как средство контроля качества

Стандартизация, будучи достаточно ригидным методом ушедшей промышленной эпохи, тем не менее является до сих пор одним из самых эффективных её продуктов. Стандарты как эталоны качества, безопасности и эффективности до сих пор выполняют функцию первоочередного способа обеспечения качества продукции. Однако в реалиях сегодняшнего мира стандарты начинают сдавать свои позиции. Для этого есть две причины, которые мы выявили путём анонимного опроса сотрудников промышленных производств.

Первая причина заключается в том, что стандарты являются очень мощной системой контроля, настолько жёстко закреплённой, что она начинает тормозить технический прогресс. Зачастую с момента выдвижения предложения до его полного согласования и выработки стандарта проходит несколько лет, когда разрабатываемая технология оказывается морально устаревшей и уже не представляет интереса [5].

Вторая проблема – это значительная привязанность стандарта к объектам материального мира [6]. Сущность этой проблемы сводится к

тому, что сферы человеческой деятельности, относящиеся к материальному производству, стандартизировать достаточно легко, так как объект стандартизации – это вещь, которая имеет исключительно объективные параметры безопасности и условий эксплуатации. Но в случае, когда мы пытаемся подвергнуть стандартизации объект нематериального мира, например сферу услуг, мы сталкиваемся с проблемой, так как услуги намного более волатильны по своей внутренней сущности, чем товары. Сложнее же всего тогда, когда объектом стандартизации становится преподавательская, творческая или изобретательская деятельность [7, 8].

В этом случае даже объект деятельности не поддаётся чёткому осмыслению. Пояснить это можно вопросом: каким критериям должно соответствовать изобретение? Этот вопрос, при простоте формулировки, является одним из самых дискуссионных в среде научно-технических и конструкторских разработок. Дело в том, что изобретение – это не какой-то объект, а общее название целого класса очень разнородных объектов. Это следует из самого определения слова «изобретение». Нам сейчас важно отметить тот факт, что изобретательская деятельность плохо поддаётся стандартизации, а если и поддаётся – то такая стандартизация сильно тормозит научно-технический прогресс.

При этом мы отмечаем, что стандартизация – один из самых удобных способов решения производственных задач, и поэтому отказываться от неё было бы неразумно. Логичным представляется не отказываться от стандартизации совсем, а изменить её систему. Но прежде чем изучить вопрос изменения системы стандартизации, давайте рассмотрим вопросы качества изобретений в целом.

Полезность изобретений

Изобретения по своей сути должны быть полезны для общества и окружающей среды. Поэтому в первую очередь к любой инновации, не обязательно промышленной, предъявляется требование безопасности для человека, общества, государства, их имущества и окружающей среды. Данное требование содержится в Федеральном законе «О безопасности», где среди приоритетных направлений деятельности государства указаны научные разработки по обеспечению безопасности.

Поэтому важно понять, что безопасность научной деятельности является важным источником прогресса, так как в этих условиях труд

учёных будет более продуктивен. Появление потенциально опасных изобретений может приводить к нежелательным последствиям, в том числе к глобальным катастрофам [9, 10]. Как показали последние данные, именно неосведомлённость о потенциальной опасности промышленных производств вызвала экологическую катастрофу в нескольких регионах планеты. При этом само по себе изобретение мартеновской печи, например, было настоящим индустриальным прорывом. Но, к сожалению, строители и инженеры, использующие мартеновские плавильные установки, были просто не осведомлены о пагубном влиянии своего изобретения на окружающую среду и сотрудников металлургических производств.

Кроме требования к безопасности, изобретение должно быть инновационным и полезным. И здесь кроется ещё одна сложность применения стандартов.

Дело в том, что стандарты определяют эффективность на основании данных об использовании какого-либо продукта. Следовательно, они не могут применяться к любым изобретениям, так как у любого изобретения этих данных нет. В этом плане мы приходим в оптимизаторский тупик: стандарт необходим, но создать его применительно к изобретениям невозможно. Поэтому вопрос поставим следующим образом: как можно на практике применить стандартизацию и повысить качество изобретений?

Давайте предложим два варианта решения этого вопроса.

Во-первых, можно было бы разработать стандарт не самого изобретения как такового, а изобретательского процесса, о чём мы говорили выше. Это позволит обойти неприменимость стандарта к самим изобретениям, так как применим мы его к процессу изобретательской деятельности.

Второй вариант – заменить стандартизацию чем-либо иным, похожим по своей сути, но при этом не использующим изобретения как объект оптимизации.

Разработка стандарта для изобретательской деятельности

В изобретательской деятельности, как мы указали выше, не может быть стандарта в отношении продукта этой деятельности – изобретения. Поэтому попытаемся разработать критерии стандарта применимо к самой деятельности. Для этого в первую очередь определим, выполняема ли задача.

Задачу разработки критериев можно считать выполнимой, если есть категории, их определяющие. То есть при наличии формализуемых категорий для критериев стандарта мы сможем разработать и сам стандарт.

Предложим, например, такие категории:

1. Безопасность. Данный критерий важен с точки зрения обеспечения сохранности жизни, здоровья граждан, их имущества, общества и государства от различных видов опасностей. Данный критерий можно считать формализуемым, так как имеются нормативно-правовые акты (далее – НПА), определяющие данные критерии. Сюда относятся Федеральные законы «О безопасности», «О пожарной безопасности» и другие НПА, отвечающие за безопасность в производственной и повседневной жизни граждан.

2. Инновационность. Данный критерий важен исходя из понятия «изобретение». Он также формализуем, основанием формализации является глава 72 Гражданского Кодекса Российской Федерации.

3. Ориентированность на качество. Среди гипотез, поступающих в разработку, следует избирать те, которые позволят получить максимальное качество конечного продукта. При этом потенциальное качество может оцениваться исходя из эффективности того продукта, который разрабатывается, ориентируясь на стандарты аналогичных продуктов в текущей отрасли. Важно понимать, что здесь мы смотрим не на конкретные параметры изобретаемого продукта, а на те показатели его эффективности, которые обычно учитываются в данной отрасли. Это позволит оценить эффективность возможного изобретения ещё в процессе разработки, не привязываясь к конкретному продукту или стандарту, что значительно облегчит процесс оценки эффективности и повысит его стабильность, так как стандарты отрасли пересматриваются значительно реже.

4. Открытость к новым путям. Это самое уязвимое место в стандартизации. Дело в том, что, исходя из самого определения стандарта, здесь исключаются какие-либо инновационные открытия. Этим же искажением страдают и предыдущие пункты, разработанные нами: зачастую безопасность и ориентация на качество привносят слишком много ригидности в прогресс. Для решения этой дилеммы предлагаем поступать следующим образом: качество и безопасность являются приоритетами до момента, когда их ценность превосходит ценность предполагаемого изобретения. При этом ценность

изобретения можно оценить исходя из критериев эффективности, характерных для данной отрасли (см. п. 3). Данный критерий уже формализован в его описании.

5. Реализуемость, или внедряемость. Любой стандарт должен быть удобным, то есть применимым на практике без значительных издержек. Если внедрение стандарта требует значительных вложений, а также кардинального изменения производственных процессов, то такой стандарт будет неприменим на практике из-за слишком великих издержек на его внедрение. Формализуемость данного критерия следует из экономического термина «издержки», который сам по себе подразумевает чёткую формализацию и подсчёты.

6. Редактируемость. Стандарт должен быть не только чётко и однозначно формализован, но и иметь возможность корректировки. При этом к корректировке стандарта применяются все те же требования, что и к исходному стандарту, в том числе и экономическо-производственная рациональность их внедрения. Стандарт должен быть сформулирован таким образом, чтобы была возможность внесения таких корректировок. Данный принцип формализован в своей формулировке, дополнительного доказательства формализуемости не требуется.

Как мы видим, создать шаблон для стандарта изобретательской деятельности действительно возможно, кроме того, он будет формализуемым исходя из формализуемости каждого отдельного его критерия. При этом нужно понимать следующее обстоятельство: разработка стандарта как такового предполагает наличие неких шаблонных действий в той деятельности, которую данный стандарт определяет. Иными словами, мы пытаемся придать чёткую форму творческой, неподконтрольной законам логики деятельности. Поэтому нам следует быть очень осмотрительными при разработке таких стандартов, чтобы не усугубить положение научных работников и не уничтожить возможность научно-технического прогресса как таковую.

Опасности внедрения изобретательских стандартов

При всех своих преимуществах стандарты имеют и значительные недостатки. В частности, они исключают волатильность в той деятельности, которую стандартизируют. Это хорошо в тех отраслях, где такая волатильность нежелательна: например, при производстве железнодорожных вагонов отклонения в составе сплава для

колёс не просто нежелательны, но и смертельно опасны. В этом случае стандарт позволяет спасать жизни и поддерживать высокое качество продукции.

Однако есть отрасли (как правило, сфера услуг и в особенности творческая сфера), где такие стандарты оказывают пагубное влияние. Более того, по мнению экспертов, некоторые стандарты приводят к гибели целых секторов экономики.

Также в пример можно привести образовательный стандарт. По отзывам преподавателей, введение образовательного стандарта привело систему российского образования в упадок. Нам важно то, что вводить стандарт следует очень осторожно, проводя постоянный текущий контроль за результатами и последствиями.

Стандартизация изобретательской деятельности имеет достаточно высокий уровень риска, к таким изобретательским рискам можно отнести следующие:

1. Моральное устаревание изобретения. При наличии стандарта значительное количество времени уходит на проверку соответствия деятельности этому стандарту. В этом случае на любые разработки будет уходить больше времени, так что новое изобретение будет уже морально устаревшим. Ярчайший пример такого устаревания – это проекты космической отрасли, где из-за огромного количества стандартов безопасности проверки и тесты занимают столько времени, что отправляющиеся в космос в 2021-м году космические аппараты работают на процессорах позапрошлого поколения, то есть фактически на очень устаревшем оборудовании. Однако в космической отрасли такая безопасность оправдана, но этот случай скорее исключение, чем правило.

2. Экономическая невыгодность изобретения. Разработка стандарта и осуществление стандартизационного контроля – затратный процесс. И именно из-за возросших издержек ранее рентабельные научные проекты могут оказаться убыточными.

3. Отсутствие прорывов. Научный прорыв – это такое изобретение, которое принципиально отличается от всех предыдущих и закладывает инженерно-конструкторские законы нового порядка. И такое изобретение попросту невозможно в условиях наличия любого стандарта.

4. Неприменимость стандарта. Здесь могут быть два случая: либо для нового изобретения невозможно создать стандарт (как, например, сделать стандарт для оборудования, работающе-

го на генераторе случайных чисел со стороны математического моделирования?), либо данный стандарт неприменим в промышленных масштабах (например, тщательный контроль в космической отрасли возможен исключительно потому, что это штучные разработки, и в производственных масштабах его осуществить невозможно никакими разумными средствами).

5. Бесполезность изобретения. Стандарт строится на основе уже существующих реалий. Если существуют какие-то реалии, то есть присутствует проблема, то стандарт строится на основании решения этой проблемы. Отсюда высок риск того, что новое, иное решение проблемы, разработанное на основании стандарта, будет менее эффективным либо более дорогостоящим, чем имеющееся. И такое изобретение, даже будучи по своей сути инновационным и передовым, в конечном итоге окажется бесполезным. Наглядный пример – бум экологических технологий в начале 2000-х годов. Огромное количество полезных изобретений – геотермальные генераторы, ветровые турбины и т.д. – так и не были повсеместно внедрены, так как оказались просто невыгодными и имели слишком большой срок окупаемости вложений. Использование этих технологий стало возможным совсем недавно, когда из-за нефтяного кризиса стало выгоднее строить энергонезависимые экологичные установки.

В случае когда результаты стандартизации начинают негативно сказываться на отрасли, стандарт следует немедленно отменить. Продолжение стандартизации при уже проявляющихся негативных эффектах не только бессмысленно, но и опасно.

Мы хотим заметить, что научно-исследовательская деятельность ещё более сложна и разнообразна, чем преподавательская. Поэтому к её стандартизации следует подходить очень осторожно и ответственно. Введение неадекватного стандарта может привести к разрушению научно-исследовательской системы, о чём следует помнить в первую очередь.

Также критически важно обратиться к статистическим данным по каждой конкретной отрасли. Важно собрать статистику инновационных разработок в ней и чётко понимать, когда и при каких условиях были совершены те или иные прорывы. Мы уверены, что стандартизация научной деятельности, исходя из вышеизложенного предупреждения, должна относиться скорее к условиям проведения научных исследований и креативной атмосфере в научных коллективах, нежели к самому процессу изобретательства как таковому.

Поэтому в качестве второго названного нами способа решения проблемы стандартизации, а именно – отказа от стандартов, предложим отказаться от стандартизации процесса изобретательства и заняться стандартизацией в области создания творческого пространства и условий, при которых возможна эффективная изобретательская деятельность.

Стандартизация условий обеспечения изобретательской деятельности

Изобретательская деятельность сама по себе подразумевает отсутствие стандартов. Поэтому в качестве альтернативы стандартизации самой деятельности мы предлагаем внедрить стандарты условий, в которых такая деятельность возможна. Для этого необходимо провести аналитическую выборку условий работы по тем инженерно-конструкторским бюро и иным инновационным организациям, которые разработали наиболее полезные и значимые изобретения, проанализировать полученные данные и сделать выводы о том, при каких условиях научного труда работа идёт наиболее продуктивно.

Также необходимо провести опрос сотрудников научных учреждений с целью выявления факторов, способствующих продуктивному рабочему ритму, включая социальный климат в организации, систему управления, обуславливающую наиболее эффективное взаимодействие в процессе научно-конструкторских разработок, систему межгрупповой коммуникации, имеющиеся особенности рабочих мест и трудового распорядка. Также будет полезным выявление психологических особенностей научного труда в таких организациях. Например, часто в передовых IT-компаниях принят гибкий график, так как при таком режиме работы продуктивность программистов выше, а результаты – лучше.

Кроме этих данных следует изучить особенности личности в научном коллективе. Часто оказывается так, что самые продуктивные команды имеют некоторые особенности их участников и особенности внутрикомандного взаимодействия. Например, доказано, что в тех командах, в которых отсутствует наказание за ошибки, продуктивность выше, а количество самих ошибок, как ни парадоксально, меньше, чем в тех командах, где за ошибки принято наказывать.

Все эти особенности позволят выработать стандарт обеспечения научной и исследовательской деятельности, который, хотя сам никак не затрагивает научную деятельность как таковую,

оказывает очень положительное влияние на развитие научно-технического прогресса и продуктивность научных сотрудников.

Заключение

Изучены особенности научного труда, затронут исторический контекст и попытки стандартизации научной деятельности в прошлом. Выявив проблему, которая заключается в невозможности грамотной стандартизации творческого по своему характеру труда, предложены два альтернативных варианта решения проблемы. Первый из них подразумевает необходимость стандартизации не самого изобретения, а применения некоторых стандартов к научной деятельности в широком смысле. Так как регламентация отдельных параметров этой деятельности затруднена, предложена стандартизация в достаточно широких пределах, основанная на принципах научной деятельности. При этом полностью исключается возможность стандартизации самой текущей деятельности, предлагается выполнение принципиальной, то есть основанной на принципах стандартизации.

При этом выполнение такой стандартизации требует грамотного и очень аккуратного подхода, так как чрезмерная либо некорректная стандартизация может привести к стагнации и нежизнеспособности всего научного сектора в целом.

Второе решение основано на психологическом подходе и идеях управленческой школы человеческих отношений. Предлагается реализовать стандартизацию не самой деятельности, а условий таковой деятельности. Это позволит исключить возможность неправильного использования стандарта и, как следствие, исключит возможные негативные последствия для научной сферы. При этом стандартизация затронет условия работы, рабочее пространство, график работы и управленческие структуры в научных организациях. Грамотное управление при этом позволит полностью нивелировать издержки, связанные с потенциальной опасностью исследовательских разработок путём разработки подходящих под специфику данной организации локальных нормативно-правовых актов.

Автор надеется, что данное исследование положит начало новому подходу к повышению эффективности научно-исследовательских работ путём акцента внимания не на самой деятельности, а на личности сотрудника и его удобстве.

Список источников

1. Киселев Д.В., Казанцев А.А., Сухинина Д.Н. Феномен Теслы в Китае // Скиф. Вопросы студенческой науки. 2020. №7 (47). С. 331-338.
2. Попова И.Г., Грицай И.П., Скворцова Н.С. Перспективы создания квантовых компьютеров // Молодой исследователь Дона. 2019. №6 (21). С. 86-88.
3. Целищева З.А. Научно-инновационный климат в России: общие тенденции, участие вузов и молодых специалистов // Дискуссия. 2018. №2 (87). С. 66-71.
4. Альтшуллер Г.С. Алгоритм изобретения. М.: Московский рабочий, 1969. 63 с.
5. Ильина И.А., Демидова Е.В. Внедрение профстандарта в процесс аттестации персонала // Решетневские чтения. 2018. Т. 2. С. 482-484.
6. Фатеева Н.Б., Петрова Л.Н., Кузнецова А.А. Внедрение профессиональных стандартов в организации // Аграрное образование и наука. 2018. №2.
7. Стандартизация в процессе внедрения инноваций / Льянов Т.Б., Льянов Р.Б., Льянов Г.Б., Киселева М.С. // StudNet. 2020. №5. Т. 3. С. 503-507.
8. Ваганова Н.И., Невмятуллина Х.И. Стандартизация в области инжиниринга // Успехи в химии и химической технологии. 2018. №8(204). Т. 32. С. 89-91.
9. Янченко А.Ю., Андросенко Н.В., Иванова Г.Н. Современные механизмы стандартизации для улучшения экологической обстановки в регионах // Экономика региона. 2018. №2. Т. 14. С. 516-529.
10. Окрепилов В.В., Чуудиновских И.В. Применение механизмов стандартизации в целях улучшения окружающей среды как составляющей качества жизни на основе развития технологического потенциала предприятия // Проблемы прогнозирования. 2018. №5(170). С. 51-59.
11. *eskoy nauki* [Skiff. Problems of student science], 2020, no. 7 (47), pp. 331-338. (In Russ.)
12. Popova I.G., Gritsay I.P., Skvortsova N.S. The prospects of creating quantum computers. *Molodoy issledovatel Dona* [Young researcher from the Don region], 2019, no. 6 (21), pp. 86-88. (In Russ.)
13. Tselishcheva Z.A. The science and innovation climate in Russia: General trends, involvement of universities and young experts. *Diskussiia* [Discussion], 2018, no. 2 (87), pp. 66-71. (In Russ.)
14. Altschuller G.S. *Algoritm izobreteniya* [The invention algorithm]. Moscow: Moskovskiy rabochiy, 1969, 63 p. (In Russ.)
15. Ilyina I.A., Demidova E.V. Introduction of occupational standards in the personnel certification process. *Reshetnevskie chteniya* [Reshetnev readings], 2018, vol. 2, pp. 482-484. (In Russ.)
16. Fateeva N.B., Petrova L.N., Kuznetsova A.A. Introduction of occupational standards for organizations. *Agrarnoe obrazovanie i nauka* [Agricultural education and science], 2018, no. 2. (In Russ.)
17. Lyanov T.B., Lyanov R.B., Lyanov G.B., Kiseleva M.S. Standardization as part of innovation. *StudNet*, 2020, no. 5, vol. 3, pp. 503-507. (In Russ.)
18. Vaganova N.I., Nevmyatullina Kh.I. Standardization in engineering. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii* [Advancements in chemistry and chemical engineering], 2018, no. 8(204), vol. 32, pp. 89-91. (In Russ.)
19. Yanchenko A.Yu., Androsenko N.V., Ivanova G.N. Modern standardization systems aimed at improving the ecological status in the regions. *Ekonomika regiona* [Regional economy], 2018, no. 2, vol. 14, pp. 516-529. (In Russ.)
20. Okrepilov V.V., Chudinovskikh I.V. Use of standardization systems to improve the environment as a life quality factor by utilizing the technological potential of production companies. *Problemy prognozirovaniya* [The issues of forecasting], 2018, no. 5(170), pp. 51-59. (In Russ.)

References

Поступила 06.08.2022; принята к публикации 12.09.2022; опубликована 26.09.2022
Submitted 06/08/2022; revised 12/09/2022; published 26/09/2022

Васецкая Наталья Олеговна – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, докторант Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.
Email: nat.vasetskaya@yandex.ru. PИИЦ AuthorID: 168388; ORCID ID: 0000-0002-1921-5453;
ResearcherID: T-4318-2017

Natalia O. Vasetskaya – PhD (Physics & Mathematics), Senior Researcher, Doctoral Student, Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russia.
Email: nat.vasetskaya@yandex.ru. AuthorID: 168388; ORCID ID: 0000-0002-1921-5453;
ResearcherID: T-4318-2017

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ NEW TECHNOLOGICAL PROCESSES AND EQUIPMENT

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 544.634
DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-3-130-140



ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОДОВ В МОДЕЛЬНЫХ РАСТВОРАХ ХРОМИРОВАНИЯ

Груба О.Н., Ардашев Д.В.

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Хромирование широко применяется для придания поверхности различных металлических изделий необходимой твердости, износостойкости, коррозионной стойкости. В настоящее время существует несколько модельных представлений о нанесении покрытий хрома из растворов, содержащих в своем составе как шести-, так и трехвалентный хром. Считается, что получение качественных хромовых покрытий даже из растворов шестивалентного хрома невозможно без присутствия ионов трехвалентного хрома, присутствия в растворе ионов-активаторов (сульфат-ионов, фторидов и др.), а также органических компонентов. Нанесение хромовых покрытий на титан для нужд авиа-, двигателе- и судостроения при сохранении всех достоинств этого конструкционного материала позволяет увеличить износостойкость и термостойкость изделий. При этом имеется большое количество экспериментальных данных о хромировании железа, никелевых и медных сплавов, в то время как для изделий из титана имеется лишь ограниченная информация. Хромирование титана также встречает затруднения из-за наличия естественных защитных оксидных пленок на его поверхности. Практический интерес в работе представляет изучение электрохимического поведения титанового электрода в модельных растворах шести- и трехвалентного хрома в сравнении с электродами из железа и никеля в режиме потенциодинамических исследований. Использованы две группы растворов электролитов хромирования: на основе солей трехвалентного хрома ($KCr(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$, $Cr_2(SO_4)_3$) и хромового ангидрида CrO_3 . В результате получены вольтамперные характеристики циклической анодной и катодной поляризации в диапазонах от -1500 до +1500 мВ. Установлены эффекты восстановления шестивалентного хрома до трехвалентного на катодных ветках и частичного окисления $Cr(III) \rightarrow Cr(VI)$ на анодных. Обнаружено, что титановый электрод обладает меньшей электрохимической активностью по сравнению с никелем и железом, что подтверждается большим катодным перенапряжением процесса восстановления хрома.

Ключевые слова: электролитическое хромирование, титан, никель, электролит, потенциал, плотность тока, вольтамперометрия, потенциостатический и потенциодинамический методы, лимитирующая стадия, механизм, поляризация

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

© Груба О.Н., Ардашев Д.В., 2022

Для цитирования

Груба О.Н., Ардашев Д.В. Особенности электрохимического поведения металлических электродов в модельных растворах хромирования // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №3. С. 130-140. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-3-130-140>



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

ELECTROCHEMICAL BEHAVIOUR OF METAL ELECTRODES IN MODEL CHROME PLATING SOLUTIONS

Gruba O.N., Ardashev D.V.

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. Chrome plating is widely used to make the surface of metal parts harder, as well as wear and corrosion resistant. Currently, there exists a number of model approximations for chromium plating using solutions containing both six- and trivalent chromium. It is believed that, even when using hexavalent chromium solutions, quality chromium coatings can only be obtained if trivalent chromium ions are also present, as well as activator ions (sulphate ions, fluorides, etc.) and organic components. Chrome plating of titanium parts to be used in aircraft, engine and shipbuilding industries helps enhance the wear and heat resistance of such parts without compromising any of the advantages offered by this structural material. One can find a rather large amount of experimental data relating to chrome plating of iron, nickel and copper alloys, whereas only limited information is available regarding parts made of titanium. Chrome plating of titanium can be complicated due to the presence of natural protective oxide films on its surface. Of practical interest in this research is the study of the electrochemical behaviour of a titanium electrode in model solutions of six- and trivalent chromium compared with iron and nickel electrodes. The study was carried out in potentiodynamic mode. Two groups of chrome solutions were used: based on trivalent chromium salts ($\text{KCr}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$, $\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3$) and chromium anhydride Cr_2O_3 . As a result, the current-voltage characteristics of cyclic anode and cathode polarization in the range from -1500 to $+1500$ mV were obtained. Effects of hexavalent chromium reduction to trivalent chromium on cathode lines and those of partial oxidation of $\text{Cr}(\text{III}) \rightarrow \text{Cr}(\text{VI})$ on anode lines were established. The titanium electrode was found to be less electrochemically active compared with nickel or iron. This is confirmed by the major cathodic over-voltage of the chromium reduction process.

Keywords: electrolytic chromium plating, titanium, nickel, electrolyte, potential, current density, voltammetry, potentiostatic and potentiodynamic methods, limiting stage, mechanism, polarization

This research was funded by the Russian Science Foundation under Grant No. 22-29-00418; <https://rscf.ru/project/22-29-00418>.

For citation

Gruba O.N., Ardashev D.V. Electrochemical Behaviour of Metal Electrodes in Model Chrome Plating Solutions. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 3, pp. 130-140. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-3-130-140>

Введение

Одним из материалов для авиационной, ракетной и военной техники является титан и его сплавы. Применение этого материала в авиастроении, космической отрасли позволяет увеличить грузоподъемность летательных аппаратов, повысить их ресурс и снизить затраты на текущую эксплуатацию машины.

Хромирование широко применяется для придания поверхности металлических изделий твердости, износостойкости, а также коррозионной стойкости. Кроме этого, вследствие плохих антифрикционных свойств титана и его сплавов на наружную поверхность деталей, работающих в условиях трения, также необходимо наносить хромовое покрытие.

Нанесение твердохромового покрытия на титановые детали сопряжено с некоторыми трудностями, основная из которых – мгновенное появление на подготовленной поверхности хроми-

руемой детали оксидной пленки, которая очень прочно соединена с основным материалом. Эта пленка выступает разделительной средой между формируемым хромовым покрытием и материалом основы. Таким образом, при хромировании титановых деталей покрытие наносится на оксидную пленку, а не на материал детали, что ухудшает ее эксплуатационные показатели.

Несмотря на высокую необходимость применения хромированных титановых деталей в авиа- и ракетостроении, как таковая технология нанесения твердохромовых покрытий на титановые детали в нашей стране до сих пор не создана. Это объясняется отсутствием научной базы, вскрывающей процессы, протекающие при нанесении твердохромового покрытия на титановые детали и связывающей условия формирования покрытия с его качеством.

В настоящее время существует несколько модельных представлений о нанесении покрытий

хрома из растворов, содержащих в своем составе как шести-, так и трехвалентный хром. Принято считать, что качественное хромовое покрытие возможно сформировать лишь при наличии трехвалентного хрома, различного рода активаторов, а также органических компонентов. В научной литературе описываются особенности хромирования железа, никелевых и медных сплавов. Целью настоящей работы является исследование электрохимического поведения различных типов металлических материалов (железо, никель, титан) в модельных хромсодержащих растворах в режиме потенциодинамических исследований.

Теоретическое исследование

Метод электрохимического хромирования обладает рядом существенных недостатков: низкий выход по току хрома, самая низкая среди гальванических процессов рассеивающая способность; высокая энергоемкость; неблагоприятная «экологичность» процесса; наличие высоких внутренних напряжений хромовых покрытий; наводороживание осадков хрома и сплава основы. Поэтому выполнение основной задачи – получение высококачественных хромовых покрытий с заданными свойствами – невозможно без дальнейшего изучения механизма процесса хромирования, а также необходимости повышения экологичности производства.

Особенностью нанесения хромового покрытия на титановые изделия является то, что на поверхности, подлежащей нанесению покрытия, мгновенно появляется прочная оксидная пленка, препятствующая сцеплению хромового покрытия с основным материалом. Удаление этой пленки можно осуществить в процессе электролиза путем воздействия на катод ультразвуковым полем, либо при помощи специальной подготовки поверхности, которая обеспечит достаточное сцепление покрытия с основным материалом. Примером такой подготовки может являться травление в концентрированной соляной кислоте в течение 1 ч при 50°C [1]. В целом для титановых сплавов практически отсутствует производственная практика о режимах хромирования, поэтому проблема выбора оптимальных условий проведения электролиза (выбор оптимального состава электролита, режима проведения процесса, технологии предварительной подготовки поверхности) представляется весьма наукоемкой и актуальной задачей.

Электрохимические методы анализа [2, 3] применяют для исследования процессов обмена

электронами на электродах или в межэлектродном пространстве. К неоспоримым преимуществам данной группы физико-химических методов относят высокую точность результатов при относительной простоте аппаратного и методического обеспечения анализа [4].

В простейшем случае ячейка для проведения исследований состоит из ёмкости с раствором электролита (электролизера). В электролизер погружены рабочий (исследуемый) электрод, вспомогательный и электрод сравнения. На электроды с помощью внешнего источника подают поляризующее напряжение, равномерно меняющееся с заданной скоростью.

В циклической вольтамперометрии фиксируется зависимость изменения тока I , протекающего через изучаемую систему, от времени. При этом напряжение изменяется по закону треугольника. Скорость изменения потенциала и пределы его изменения – это задаваемые независимые друг от друга параметры. Правильный выбор границ изменения потенциала позволяет избежать появления на графике «побочных» пиков, отвечающих процессам электрохимического окисления-восстановления воды, протонов водорода и пр. Главная особенность метода заключается в цикличности изменения потенциала в область окисления (анодную), а затем в область восстановления (катодную). На рис. 1 показан вид типичной циклической вольтамперограммы (ЦВА), полученной для квазиобратимого окислительно-восстановительного процесса.

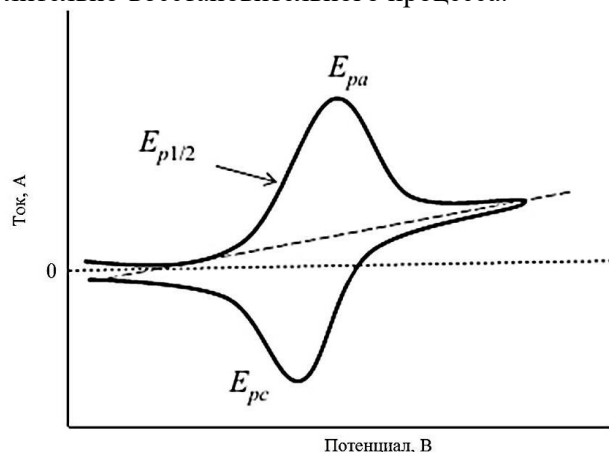


Рис. 1. Циклическая вольтамперограмма квазиобратимого окислительно-восстановительного процесса: E_{pa} , E_{pc} – потенциалы пиков анодного и катодного процессов; $E_{p1/2}$ – потенциал полупиков

Fig. 1. Cyclic voltammogram (CVA) of the quasi-reversible oxidation-reduction process: E_{pa} , E_{pc} – peak potentials of anode and cathode processes; $E_{p1/2}$ – half-peak potentials

Традиционно выделяют два механизма формирования поверхности электрода при протекании электрохимических процессов – химический и адсорбционный. Первый связывают с протеканием топохимической реакции с участием электролита. В результате образуется плотная приповерхностная пленка продуктов. В этом случае потенциал линейно зависит от корня квадратного скорости развертки потенциала. Во втором случае на электроде образуется рыхлый осадок продукта. Процесс адсорбции продукта происходит после растворения верхнего слоя электрода и прохождения химического превращения в приэлектродном слое. В сложных случаях оба механизма могут реализовываться одновременно и пики будут накладываться [5].

При низких концентрациях инертного (для рассматриваемой окислительно-восстановительной реакции) электролита скорость перемещения электронов между ионами существенно зависит от строения двойного электрического слоя. В этом случае заряженные частицы при приближении к поверхности электрода должны преодолеть дополнительный энергетический барьер [6].

Для электролитического хромирования традиционно используют электролиты на основе хромового ангидрида с добавлением серной кислоты. Соединения Cr(VI) чрезвычайно токсичны, что создает сложности и в процессе работы с растворами (приготовление, непосредственное использование), и при утилизации производственных сточных вод. В последнее время постоянно предлагаются новые электролиты хромирования на основе соединений Cr(III). Однако у подобных растворов есть ряд существенных недостатков. Плохая растворимость солей хрома (III) приводит к усложнению состава электролитов хромирования. Кроме того, следует отметить плохую воспроизводимость результатов электроосаждения из-за нестабильности и неоднородности продукта, жесткие интервалы рабочих значений pH и плотностей тока.

Еще одна характерная особенность электрохимически осажденного хрома – зависимость его свойств от условий электроосаждения. В зависимости от условий проведения электролиза (температура электролита и плотность тока) можно получить осадки хрома, различные по своим физическим свойствам, главным образом по твердости и отражательной способности [7-9]. Понижение температуры электролита увеличивает выход

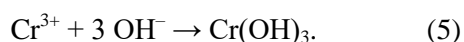
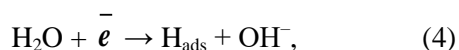
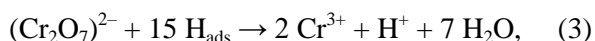
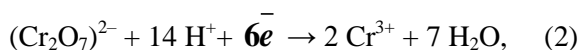
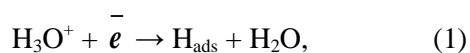
по току, но при температуре ниже 40°C получаются осадки низкого качества. Поддерживать температуру 55-60°C при средних плотностях тока (около 50 А/дм²) сложно, так как электролит необходимо подогревать. Хромирование при такой же плотности тока (50 А/дм²) при температуре электролита ниже 30°C, напротив, требует охлаждения электролита, так как происходит разогрев электролита джоулевым теплом. Как нам представляется, хромирование при температуре 40°C будет экономически целесообразным, что подтверждается тепловым расчетом, так как разогрев электролита джоулевым теплом компенсируется рассеиванием тепла в окружающую среду. Проведенные исследования при температуре электролита 38-40°C, плотности тока 50 А/дм² позволили получить выход по току 30% [10]. При этом получаются покрытия хорошего качества и не требуется ни дополнительного разогрева, ни дополнительного охлаждения.

С точки зрения кинетики электрохимическое нанесение хромовых покрытий из растворов электролитов существенно отличается от других гальванических процессов. В процессе хромирования на катоде одновременно протекает целая серия параллельных процессов: восстановление водорода, процессы последовательного восстановления хрома (от Cr(VI) до Cr(III) и далее до свободного хрома), образование на поверхности катода тонкой пленки, состоящей из продуктов восстановления хромовой кислоты и активного аниона электролита [9, 11-15]. Для раскрытия кинетических особенностей и механизма катодных процессов часто используются методы потенциостатических и потенциодинамических кривых.

В работе [16] было рассмотрено влияние материала электрода на скорость катодных процессов в разбавленных хромсодержащих растворах. В качестве рабочих электродов были выбраны Ст-3, титан, медь, спектральный графит и графитовая фольга «Графлекс». Процесс проводился в разбавленных растворах хромового ангидрида и бихромата калия. Величина потенциала рабочего электрода определялась двумя конкурирующими процессами – адсорбцией на поверхности рабочего электрода анионов хромовой кислоты и адсорбцией молекул воды. С уменьшением концентрации раствора, определяющим становится второй процесс. Лимитирующая стадия катодного процесса в хромовокислом электролите носит диффузионный

характер. Наименьшие диффузионные затруднения обнаружены на спектральном графите. В состав адсорбционной пленки на поверхности электрода входит атомарный водород, который в дальнейшем принимает участие в восстановлении Cr(VI). В пользу этого предположения свидетельствуют два факта: практически постоянный уровень кислотности среды вблизи электрода; отсутствие интенсивного выделения газообразных продуктов электрохимического окисления воды. Образующиеся в результате анодной реакции окисления воды гидроксогруппы могут быть связаны ионами трехвалентного хрома в нерастворимый гидроксид хрома (III).

Процессы, предположительно протекающие на электродах, могут быть описаны следующими реакциями:



В работе [17] для изучения механизма восстановления хрома (VI) в присутствии органической добавки (веретенного дистиллята НФ-ВГИСИ) определялись поляризационные характеристики процесса. Анализ полученных экспериментальных данных показал, что присутствие органической добавки значительно снижает время образования катодной пленки. Установлено, что скорость процесса частичного восстановления ионов хрома Cr(VI) до Cr(III) (в интервале -0,3...-0,6 В) пропорционально зависит от концентрации органической добавки: чем больше содержание добавки, тем выше скорость. При дальнейшем увеличении потенциала (в интервале -1,0...-1,4 В) возможно одновременное протекание всех трех электродных реакций: частичного восстановления ионов хрома, полное восстановление ионов хрома до металла и восстановление ионов водорода. Были сняты поляризационные кривые в интервале температур 25-70°C. Обнаружены следующие закономерности. При нагревании скорость восстановления ионов хрома до металла и, следовательно, выход по току уменьшаются, а скорость

восстановления ионов водорода – увеличивается [17]. Таким образом, оптимальный температурный режим проведения хромирования в электролитах в присутствии органической добавки был определен как 25-40°C.

Материалы и методы исследования

Анализ литературных данных для аналогичных систем [7-9, 11-15, 18] позволил выделить 7 наиболее перспективных растворов для проведения экспериментального исследования процесса электролитического хромирования. Концентрация использованных в работе электролитов приведена в **таблице**.

Объектами исследования явились электроды из углеродистой стали (У8), никеля, титана и спектрального графита, модельные электролиты, содержащие соли трехвалентного хрома ($\text{KCr}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$, $\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3$, $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3$, CrCl_3), CrO_3 , анионы-активаторы и различные органические компоненты (см. **таблицу**). Растворы готовились на основе дистиллированной воды и реактивов марки «х.ч.». Электрохимические исследования проводили на универсальном потенциостате-гальваностате IPC-PRO P-40X с помощью метода вольтамперометрии. Потенциостат-гальваностат предназначен для задания, измерения и регулирования токов и напряжений на рабочем электроде в процессе электрохимических исследований. Потенциостат применяется для исследований любых электрохимических процессов, в частности процессов осаждения и растворения металлов, электродных процессов в химических источниках тока, характеристик коррозионной стойкости различных материалов и проведения других электрохимических измерений.

Потенциалы регистрировали относительно хлорсеребряного электрода сравнения ЭСр-10101 4,2 М, находящегося при той же температуре, что и рабочий электрод. Предварительная подготовка рабочих электродов заключалась в шлифовке и обезжиривании поверхности пластины, травление не проводилось.

Измерения проводились при плотности тока $i_K = i_A = 1 \text{ А/дм}^2$, температуре процесса $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$, расстоянии между электродами не более 2 см, скорости развертки 10-500 мВ/с, количестве циклов – 10. Объем электролита на единицу поверхности составил 0,4 л/дм².

Таблица. Концентрация модельных электролитов хромирования, моль/л
 Table. Concentration of model chrome plating electrolytes, mol/L

Вещество	Номер раствора электролита						
	1	2	3	4	5	6	7
$\text{KCr}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	0,25	0,25-0,3	0,25-0,5	—	—	—	—
$\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$	0,5	0,5-0,6	0,5-0,1	—	—	—	—
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	0,25	0,5-0,75	—	—	—	—	—
HCOONa	0,5	0,5-0,66	0,5-1	—	—	—	—
Na_2SO_3	0,25-0,35	—	—	—	—	—	—
H_3BO_3	—	0,8-0,9	0,8-0,9	0,9-1	—	—	—
$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	—	—	0,1-0,15	—	—	—	—
$\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	—	—	0,02-0,03	—	—	—	—
CHOOH	—	—	—	0,56-0,78	—	—	—
KCl	—	—	—	2,7-4,1	—	—	—
KBr	—	—	—	0,04-0,25	—	—	—
$\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3$	—	—	—	—	—	—	0,255-0,383
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	—	—	—	—	—	—	0,292
Na_2SO_4	—	—	—	—	—	—	0,56
$\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$	—	—	—	—	—	—	0,15-0,22
CrO_3	—	—	—	—	3,4-3,5	2,5-3	—
H_2SO_4	—	—	—	—	0,026-0,028	0,08-0,1	—
$\text{Cr}(\text{NO}_3)_3$	—	—	—	—	0,042-0,063	0,084-0,092	—
CrCl_3	—	—	—	0,3-0,6	—	—	—
NaOH	—	—	—	—	1-1,5	—	—

Полученные результаты и их обсуждение

Выполнено экспериментальное исследование электрохимического поведения металлических электродов из никеля, титана и углеродистой стали У8 в модельных растворах электрохимического хромирования – в растворе сульфата хрома $\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3$ и растворе тетрахромата калия $\text{K}_2\text{Cr}_4\text{O}_{13}$ с концентрацией 0,25 моль/л. Потенциал рабочего электрода измеряли по отношению к потенциалу насыщенного хлорсеребряного электрода (+0,200 В относительно стандартного водородного электрода).

Предварительно были выполнены тестовые эксперименты для проверки работоспособности электрохимической ячейки в условиях 0,05 М раствора гексацианоферратов (II, III) калия с никелевым рабочим электродом. Циклическая вольтамперограмма (ЦВА) для скорости развертки потенциала 50 мВ/с приведена на **рис. 2**.

В растворе гексацианоферратов реализуется электрохимическое взаимодействие между двух- и

трехвалентными формами ионов железа (+0,77 В относительно с.в.э.). На ЦВА наблюдается один соответствующий пик на анодной и катодной ветках поляризационных кривых. Полученные результаты соответствуют известным литературным данным других исследований [18-20].

Далее были использованы две группы электролитов хромирования: на основе солей трехвалентного хрома (электролиты № 1-4, 7) и хромовых кислот, образующихся в результате растворения хромового ангидрида (электролиты № 5 и 6).

Результаты электрохимических испытаний в виде линий ЦВА для опытных растворов и металлических электродов приведены на **рис. 3 и 4**. Из-за сложности расшифровки пиков по отношению к нескольким одновременно протекающим электрохимическим процессам точных расчетов коэффициентов уравнения Таффеля выполнить не удалось, однако можно сделать качественные выводы об особенностях электрохимического поведения.

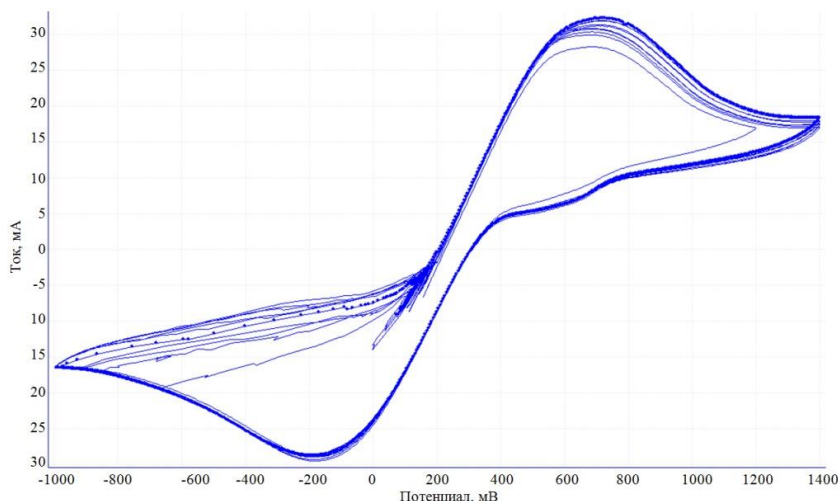


Рис. 2. Циклическая вольтамперограмма, никелевый электрод в растворе гексацианоферратов (II, III) калия, скорость развертки потенциала 50 мВ/с

Fig. 2. Cyclic voltammogram, nickel electrode in potassium hexacyanoferrates (II, III) solution, potential sweep rate – 50 mV/s

В растворах трехвалентного хрома (электролит № 7) на никелевом электроде (рис. 3, а) при циклической поляризации в анодную и катодную стороны наблюдаем следующие явления: при анодной поляризации в интервале от -200 до +200 мВ стабильно наблюдаются пики тока, отвечающие окислению трехвалентного хрома до шестивалентного $\text{Cr(III)} \rightarrow \text{Cr(VI)}$. При обратном ходе в сторону катодной поляризации отсутствуют самостоятельные пики восстановления шестивалентного хрома до трехвалентного $\text{Cr(VI)} \rightarrow \text{Cr(III)}$, что оказалось несколько неожиданным. При потенциалах менее -400 мВ начинается интенсивное увеличение тока, что может быть связано с одновременной реализацией процессов восстановления хрома и начала выделения водорода. Катодный ток имеет значительную величину – от 10 до 40 мА, что говорит о высокой каталитической активности никеля для восстановления хрома. Это свойство никеля широко используется в промышленности для нанесения хромо-вых покрытий на никелевый подслои.

В качестве иллюстрации поведения титанового электрода в растворах трехвалентного хрома приведены циклические вольтамперограммы в катодной области (рис. 3, б). При потенциалах менее -400 мВ появляются признаки пиков восстановления шестивалентного хрома до трехвалентного $\text{Cr(VI)} \rightarrow \text{Cr(III)}$, интенсивное восстановление хрома наблюдается с потенциалов менее -1000 мВ. Следует отметить, что в этом случае катодный ток имеет гораздо более низкие значения (от -0,5 до -3,5 мА), чем для никелевого электрода, что говорит о низкой активности не-

активированной поверхности титана по отношению к осаждению хрома.

В растворах шестивалентного хрома (электролит № 5) на никелевом электроде (рис. 4, а) при циклической поляризации наблюдаются следующие эффекты. При поляризации в катодную сторону присутствует классический ярко выраженный пик восстановления шестивалентного хрома до трехвалентного в интервале потенциалов от +1000 до +200 мВ. При дальнейшем снижении потенциала менее -400 мВ будет происходить восстановление до металлического хрома и выделение водорода, подобное восстановлению в растворах трехвалентного хрома. При поляризации в анодную сторону присутствует пик тока, соответствующий окислению трехвалентного хрома до шестивалентного в интервале потенциалов от +1000 до +1400 мВ. Высота пика незначительная, что, возможно, связано с малыми концентрациями трехвалентного хрома в растворе. Дальнейшее увеличение потенциала сопровождается резким увеличением тока, что связано с началом анодного выделения кислорода при окислении воды.

В растворах шестивалентного хрома на железном электроде (рис. 4, б) при циклической поляризации наблюдаются эффекты, аналогичные никелевому электроду. Отличительной особенностью являются более низкие значения тока. Например, максимуму пика восстановления шестивалентного хрома до трехвалентного соответствует 1,7 мА на железном электроде против 18 мА на никелевом электроде. Данный факт свидетельствует о более высокой электрохимической активности никелевого электрода по сравнению с железным.

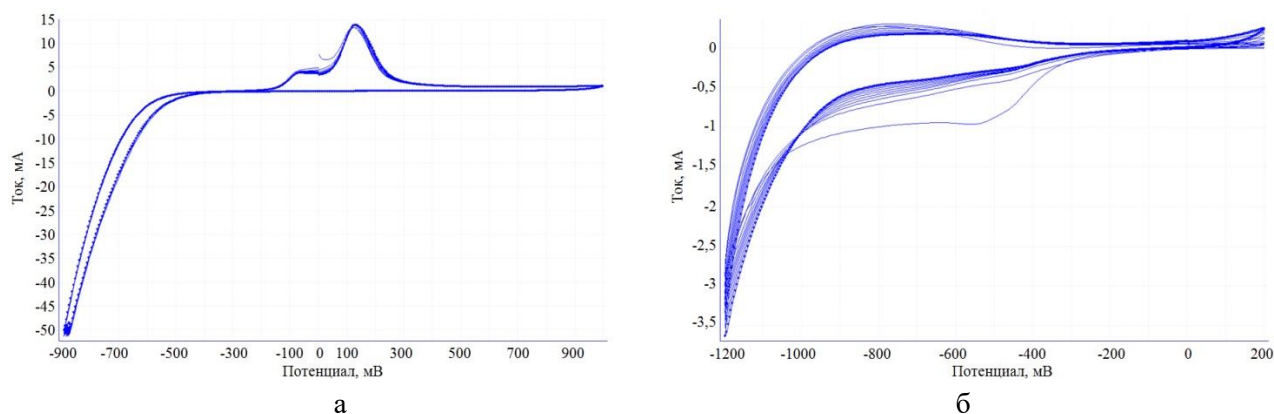


Рис. 3. Циклическая вольтамперограмма опытных электрохимических систем в растворе электролита №7, скорость развертки потенциала 10 мВ/с, 10 циклов: а – никель; б – титан

Fig. 3. Cyclic voltammogram of experimental electrochemical systems in electrolyte solution No.7, potential sweep rate – 10 mV/s, 10 cycles: a is nickel; б is titanium

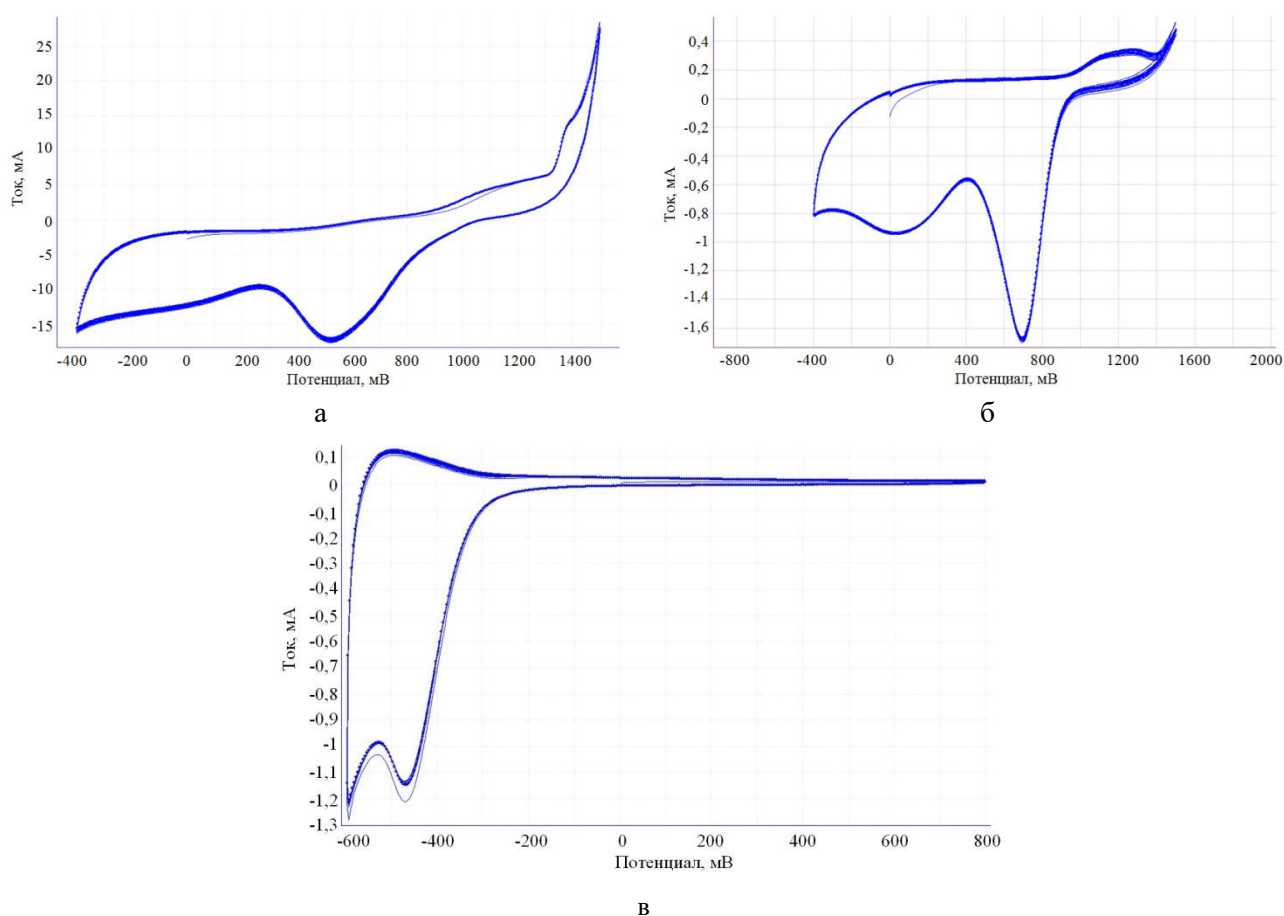


Рис. 4. Циклическая вольтамперограмма опытных электрохимических систем в растворе электролита №5, скорость развертки потенциала 10 мВ/с, 10 циклов: а – никель, б – углеродистая сталь, в – титан

Fig. 4. Cyclic voltammogram of experimental electrochemical systems in electrolyte solution No.5, potential sweep rate – 10 mV/s, 10 cycles: a is nickel; б is carbon steel; в is titanium

Для титанового электрода в растворах шестивалентного хрома приведена вольтамперограмма в катодной области (рис. 4, в). Характерной особенностью является отсутствие самостоятельного пика восстановления шестивалентного хрома до

трехвалентного в интервале потенциалов от +1000 до +200 мВ. Интенсивные процессы восстановления на титановом электроде начинаются при уменьшении потенциала менее -300 мВ. Наличие характерной формы пика восстано-

ния шестивалентного хрома до трехвалентного наблюдается на нисходящей ветви катодного тока в интервале потенциалов от -300 до -500 мВ. Данный факт позволяет предположить, что процесс восстановления $\text{Cr(VI)} \rightarrow \text{Cr(III)}$ совмещен с процессами восстановления до хрома и выделения водорода. Наблюдается резкое увеличение катодного перенапряжения начала восстановления шестивалентного хрома до трехвалентного на титановом электроде (начало с -300 мВ, против +1000 мВ на никелевом и железном электродах). Значение силы тока на максимуме пика составляет 1,2 мА. Оба перечисленных факта подтверждают низкую электрохимическую активность титанового электрода.

Обобщая, можно отметить, что уменьшение величины катодных токов при переходе от никелевого к железному и титановому электродам характеризует снижение электрохимической активности металлических электродов в ряду никель-железо-титан по отношению к процессам восстановления хрома. Пассивность катода связана с появлением на поверхности электрода пленки сложного состава из продуктов электролиза (чаще всего из продуктов восстановления хромовой кислоты и активного аниона), которая лимитирует протекание одних реакций и способствует протеканию других: осаждения хрома, выделения водорода, восстановления шестивалентного хрома до трехвалентного. Общий состав и структура катодной пленки зависят от состава и структуры покрываемой основы. На железе и никеле она особенно выражена ввиду усиленной пассивации этих металлов хромовой кислотой. От свойств пленки зависит структура и, следовательно, свойства формируемого покрытия. Дальнейшее развитие исследования видится в изучении структуры образующейся пленки при различных плотностях тока в процессах нанесения хромового покрытия.

Заключение

1. Таким образом, электролиты хромирования группы на основе сульфата хрома, содержащей трехвалентный хром, показали обнадеживающие результаты в процессе электрохимического осаждения хрома на титане по сравнению с растворами второй группы, содержащими хром в шестивалентном состоянии.

2. Обнаружено снижение электрохимической активности металлических электродов в ряду никель-железо-титан по отношению к процессам восстановления хрома, о чем свидетельствует

экспериментально подтвержденное уменьшение величины катодных токов при переходе от никелевого к железному и титановому электродам.

3. Для повышения «укрываемости» титана рекомендуется проводить предварительную активирующую подготовку поверхности электрода.

4. Требуется провести дополнительные исследования структуры образующейся катодной пленки, определяющей качество покрытия, при различных плотностях тока.

Список источников

1. Электроаналитические методы. Теория и практика / под ред. Ф. Шольца. М.: Лаборатория знаний, 2010. 326 с.
2. Плэмбек Дж. Электрохимические методы анализа. Основы теории и применение. М.: Мир, 1985. 496 с.
3. Жебентяев А.И., Жерносек А.К., Талуть И.Е. Электрохимические методы анализа. Витебск, 2015. 106 с.
4. Хенце Г. Полярография и вольтамперометрия: теоретические основы и аналитическая практика. М.: Лаборатория знаний, 2008. 284 с.
5. Носков А.В., Гришина Е.П. Кинетика анодного окисления металлов в сернокислых электролитных средах в условиях нестабильности продуктов электрохимической реакции // Химия растворов и технология жидкофазных материалов. Достижения и перспективы. 2006. Вып. 8. №6. С. 64-71.
6. Новосельский И.М., Менглишева Н.Р. Метод вольтамперометрии в исследовании многостадийного процесса пассивации металлов // Электрохимия. 1981. Т. 17. № 11. С. 1621-1627.
7. Шлугер М.А. Гальванические покрытия в машиностроении. М.: Машиностроение, 1985. 240 с.
8. Богорад Л.Я. Хромирование. Л.: Машиностроение, 1984. 97 с.
9. Гальванотехника / Ажогин Ф.Ф., Беленький М.А., Галь И.Е. и др. М.: Металлургия, 1987. 736 с.
10. 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 SSP, pp. 1173-1177.
11. Лайнер В.И. Защитные покрытия металлов. М.: Металлургия, 1974. 557 с.
12. Солодкова Л.Н., Кудрявцев В.Н. Электролитическое хромирование. М.: Глобус, 2007. 191 с.
13. Electrically Mediated Process for Functional and Decorative Trivalent Chromium Electroplating: An Alternative to Hexavalent Chromium/ A. Lozano-Morales, R.P. Renz, J.J. Fortman, E.J. Taylor // ECS Transactions, 2007, vol. 6 (9), pp. 52-61.
14. Electrochemical formation of Cr(III)-based films on Au electrodes / V. Smulders, N. Simic, A.S.O. Gomes, B. Mei, G. Mul // Electrochimica Acta, 2019, vol. 296, pp. 2115-2121.
15. Influence of carboxylic acids on the performance of trivalent chromium electrolytes for the deposition of functional coatings / L. Bükler, R. Bottcher, M. Leimbach,

- T. Hahne, R. Dickbreder, A. Bund. // *Electrochimica Acta*, 2022, vol. 41. Number 140054.
16. Соловьева Н.Д. Структурные превращения в объеме раствора и их влияние на процессы, протекающие на межфазной границе: автореф. ... дис. д-ра хим. наук. Саратов, 2003. 39 с.
 17. Москвичева Е.В. Ресурсосберегающие процессы как основа экологически чистых технологий гальванического хромирования из водных и неводных сред: автореф. ... дис. д-ра техн. наук / Волгоград. гос. архитектурно-строительная акад. Москва, 1998. 52 с.
 18. Красикова В.Л., Красиков А.В. Механизм электроосаждения хрома – частный случай механизма индуцированного соосаждения металлов // *Электрохимия*. 2020. Т. 56. № 6. С. 494-499.
 19. Данилов Ф.И., Проценко В.С., Гордиенко В.О. Электродные процессы при электроосаждении покрытий хром-углерод из растворов солей Cr(III) с добавками карбамида и муравьиной кислоты // *Электрохимия*. 2013. Т. 49. № 5. С. 536-545.
 20. О взаимосвязи поляризационных характеристик и свойств фазовых пленок при хромировании во фторидсодержащем электролите / О.И. Невский, С.В. Ратников, В.Л. Котов, А.В. Балмасов // *Химия и химическая технология*. 2007. Т. 50. Вып. 2. С. 45-47.
- ### References
1. Scholz F. (Ed) *Elektroanaliticheskie metody. Teoriya i praktika* [Electroanalytical methods. Theory and Practice]. Moscow: Laboratoriya znaniy, 2010, 326 p. (In Russ.)
 2. Plambek J. *Elektrokhimicheskie metody analiza. Osnovy teorii i primeneniye* [Electrochemical analysis. Basic theory and application]. Moscow: Mir, 1985, 496 p. (In Russ.)
 3. Zhebentyaev A.I., Zhernosek A.K., Talut I.Ye. *Elektrokhimicheskie metody analiza* [Electrochemical analysis]. Vitebsk, 2015, 106 p. (In Russ.)
 4. Henze G. *Polyarografiya i vol'tamperometriya: teoreticheskiye osnovy i analiticheskaya praktika* [Polarography and voltammetry: Theoretical foundations and analytical practice]. Moscow: Laboratoriya znaniy, 2008, 284 p. (In Russ.)
 5. Noskov A.V., Grishina E.P. Kinetics of Anodic Oxidation of Metals in Sulfuric Acid Electrolyte Media in the Conditions of Instability of Electrochemical Reaction Products. *Khimiya rastvorov i tekhnologiya zhidkofaznykh materialov. Dostizheniya i perspektivy* [Chemistry of solutions and technology of liquid-phase materials. Achievements and prospects], 2006, vol. 8, no. 6, pp. 64-71. (In Russ.)
 6. Novoselsky I.M., Menglisheva N.R. Voltammetry technique for understanding the multi-stage metal passivation process. *Elektrokhimiya* [Electrochemistry], 1981, vol. 17, no. 11, pp. 1621-1627. (In Russ.)
 7. Shluger M.A. *Gal'vanicheskie pokrytiya v mashinostroenii* [Galvanic coatings in mechanical engineering]. Moscow: Mashinostroenie, 1985, 204 p. (In Russ.)
 8. Bogorad L.Ya. *Khromirovaniye* [Chrome plating]. Leningrad: Mashinostroenie, 1984, 97 p. (In Russ.)
 9. Azhogin F.F., Belenkiy M.A., Gal I.Ye. et al. *Galvanotekhnika* [Electroplating]. Moscow: Metallurgiya, 1987, 736 p. (In Russ.)
 10. 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 SSP, pp. 1173-1177.
 11. Layner V.I. *Zashchitnye pokrytiya metallov* [Protective coatings of metals]. Moscow: Metallurgiya, 1974, 557 p. (In Russ.)
 12. Solodkova L.N., Kudryavtsev V.N. *Elektroliticheskoe khromirovaniye* [Electrolytic chrome plating]. Moscow: Globus, 2007, 191 p. (In Russ.)
 13. Lozano-Morales A., Renz R.P., Fortman J.J., Taylor E.J. Electrically Mediated Process for Functional and Decorative Trivalent Chromium Electroplating: An Alternative to Hexavalent Chromium. *ECS Transactions*, 2007, vol. 6 (9), pp. 52-61.
 14. Smulders V., Simic N., Gomes A.S.O., Mei B., Mul G. Electrochemical formation of Cr(III)-based films on Au electrodes. *Electrochimica Acta*, 2019, vol. 296, pp. 2115-2121.
 15. L. Bükér, R. Bottcher, M. Leimbach, T. Hahne, R. Dickbreder, A. Bund. Influence of carboxylic acids on the performance of trivalent chromium electrolytes for the deposition of functional coatings. *Electrochimica Acta*, 2022, vol. 411, number 140054.
 16. Solovieva N.D. *Strukturnye prevrashcheniya v obyeme rastvora i ikh vliyanie na protsessy, protekayushchie na mezhfaznoy granitse: avtoreferat dis. ... doktora khimicheskikh nauk* [Structural transformations in the bulk solution and their effect on interfacial processes: Extended abstract of doctoral dissertation]. Saratov, 2003, 39 p.
 17. Moskvicheva E.V. *Resursosberegayushchie protsessy kak osnova ekologicheskikh chistykh tekhnologiy galvanicheskogo khromirovaniya iz vodnykh i nevodnykh sred: avtoreferat dis. ... doktora tekhnicheskikh nauk* [Resource-saving processes as a basis for environmentally friendly technologies of chrome electroplating based on the use of aqueous and non-aqueous media: Extended abstract of doctoral dissertation]. Volgograd State Academy for Architecture and Civil Engineering. Moscow, 1998, 52 p.
 18. Krasikova V.L., Krasikov A.V. The mechanism of chromium electrodeposition as an instance of the mechanism of induced codeposition of metals. *Elektrokhimiya* [Electrochemistry], 2020, vol. 56, no. 6, pp. 494-499. (In Russ.)
 19. Danilov F.I., Protsenko V.S., Gordienko V.O. Electrode processes during electrodeposition of chromium-carbon coatings from solutions of Cr(III) salts with additions of carbamide and formic acid. *El-*

- ektrokhimiya* [Electrochemistry], 2013, vol. 49, no. 5, pp. 536-545. (In Russ.)
20. Nevsky O.I., Ratnikov S.V., Kotov V.L., Balmasov A.V. The relationship between the polarization characteristics and properties of phase films during chrome plating in fluoride electrolyte. *Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [Chemistry and chemical technology], 2007 vol. 50, iss. 2, pp. 45-47. (In Russ.)

Поступила 26.08.2022; принята к публикации 05.09.2022; опубликована 26.09.2022
Submitted 26/08/2022; revised 05/09/2022; published 26/09/2022

Груба Оксана Николаевна – кандидат химических наук, доцент,
Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.
Email: grubaon@susu.ru. ORCID 0000-0003-4038-3766

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

Oksana N. Gruba – PhD (Chemistry), Associate Professor,
South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: grubaon@susu.ru. ORCID 0000-0003-4038-3766

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

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 537.531
DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-3-141-146



АВТОСТАБИЛИЗИРОВАННЫЙ РОТАТОР

Попов И.П.

Курганский государственный университет, Курган, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Целью работы является установление возможности создания ротатора с фиксированной частотой свободного вращения. **Используемые методы.** Для стабилизации угловой скорости необходимо, чтобы с изменением момента количества движения соответствующим образом изменялся момент инерции. Для решения этой задачи осуществляется синтез устройства, которое уместно назвать стабилизированным ротатором. Для установления характера поведения стабилизированного ротатора в различных режимах (кинематика, динамика) осуществляется его анализ. Синтез и анализ стабилизированного ротатора выполняются с использованием соотношений теоретической механики и формально-тождественных преобразований. **Новизна.** Собственная частота вращения стабилизированного ротатора строго фиксирована (не зависит ни от момента инерции, ни от момента импульса) и замечательным образом совпадает с собственной частотой колебаний маятника с идентичными параметрами. При изменении момента импульса изменяется радиус и тангенциальная скорость (частота вращения при этом не меняется и равна собственной). **Результат.** При нулевом вращающем моменте в стационарном режиме частота вращения стабилизированного ротатора не может быть произвольной и принимает единственное значение. Подобно тому как при вынужденных колебаниях маятника частота не совпадает с собственной частотой, частота вращения стабилизированного ротатора при нагружении не совпадает с собственной частотой вращения. **Практическая значимость.** Стабилизированный ротатор может использоваться для управления собственной частотой колебаний радиального осциллятора, хотя в этом качестве он может иметь сильную конкуренцию со стороны мехатронных систем. Напротив, в качестве стабилизатора вращений его конкурентные возможности неоспоримы и определяются предельной простотой конструкции.

Ключевые слова: ротатор, маятник, частота, стабилизация, выбег, энергия, момент импульса, циклотронное движение

© Попов И.П., 2022

Для цитирования

Попов И.П. Автостабилизированный ротатор // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №3. С. 141-146. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-3-141-146>



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

AUTOMATIC STABILIZED ROTATOR

Popov I.P.

Kurgan State University, Kurgan, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The aim of the research is to identify the possibility of designing a rotator with the fixed rate of free rotation. **Methods Applied.** To stabilize angular velocity, it is required that changes in angular momentum result in relevant changes in moment of inertia. To settle this issue, a device was synthesized. Such device is reasonably called a stabilized rotator. To identify the nature of behavior of the stabilized rotator in various modes (kinematics, dynamics), it is analyzed. Synthesis and analysis of the stabilized rotator are performed using the balance between theoretical mechanics and formal and identical transformations. **Originality.** The natural rotation frequency of a stabilized rotator is strictly fixed (it does not depend on either moment of inertia or angular momentum) and remarkably coincides with the natural oscillation frequency of the pendulum with identical parameters. When the angular momentum changes, the radius and tangential velocity change (the rotation frequency does not change and is equal to its own). **Result.** At zero torque in the stationary mode, the rotation frequency of the stabilized rotator cannot be arbitrary and takes on a single value. Just as the frequency does not coincide with the natural frequency during forced oscillations of the pendulum, the rotation frequency of a stabilized rotator under loading does not coincide with the natural rotation frequency. **Practical Relevance.** A stabilized rotator can be used to control the natural frequency of a radial oscillator, although in this function it may have strong competition with mechatronic systems. On the contrary, as a rotation stabilizer, its competitive capabilities are undeniable and determined by the extreme simplicity of the design.

Keywords: rotator, pendulum, frequency, stabilization, run-out, energy, angular momentum, cyclotron motion

For citation

Popov I.P. Automatic Stabilized Rotator. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 3, pp. 141-146. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-3-141-146>

Введение

Для нормальной работы многих технических систем требуется стабилизированная частота вращения [1]. К таким системам относятся генераторные установки переменного тока [2, 3], насосные станции [4, 5], конвейерные линии [6], обрабатывающие станки [7], ветрогенераторы [8, 9] и многие другие.

Существующие ротаторы могут свободно вращаться с любой скоростью, поэтому для их стабилизации используют специальные устройства, как правило, следящего типа, что приводит к усложнению и удорожанию конструкций. В этой связи представляет интерес возможность создания ротатора с фиксированной частотой свободного вращения, что и является целью настоящей работы.

Материалы и методы исследования

Для стабилизации угловой скорости необходимо, чтобы с изменением момента количества движения соответствующим образом изменялся момент инерции:

$$L = J\omega,$$

где L – момент количества движения; J – момент инерции; ω – угловая скорость.

Для решения этой задачи осуществляется синтез устройства, которое уместно назвать стабилизированным ротатором.

Для установления характера поведения стабилизированного ротатора в различных режимах (кинематика, динамика) осуществляется его анализ.

Синтез и анализ стабилизированного ротатора выполняются с использованием соотношений теоретической механики и формально-тождественных преобразований.

Полученные результаты и их обсуждение

Синтез стабилизированного ротатора. Угловая и тангенциальная скорости связаны следующим образом:

$$v = \omega r,$$

где r – радиус циклотронного движения.

Формально-тождественные преобразования

$$\omega^2 = \frac{v^2}{r^2} = \frac{mv^2/2}{kr^2/2} \frac{k}{m}$$

показывают, что для обеспечения постоянства угловой скорости необходима взаимная компенсация переменных v и r . Это возможно, если выполнить условие

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{kr^2}{2},$$

где m – масса груза; k – коэффициент упругости.

Правая часть равенства представляет собой потенциальную энергию пружины, абсолютная деформация которой равна радиусу вращения груза.

Установленные обстоятельства определяют принципиальную схему стабилизированного ротора, которая представлена на рисунке.

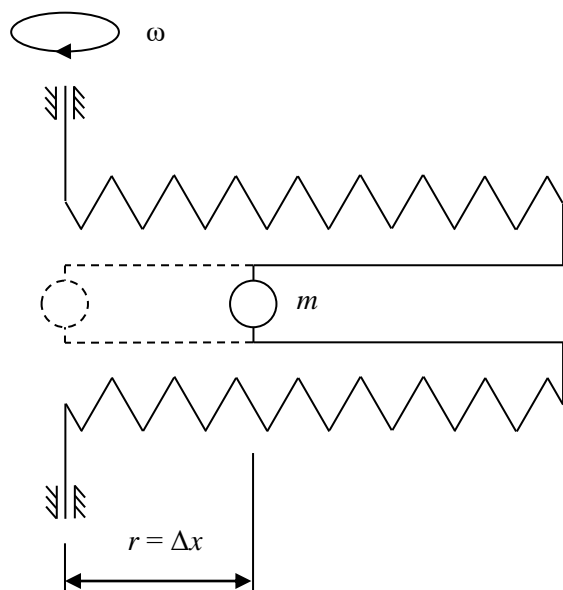


Рис. Стабилизированный ротор
Fig. A stabilized rotator

Собственная частота вращения стабилизированного ротора

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1)$$

строго фиксирована (не зависит ни от момента инерции, ни от момента импульса) и замечательным образом совпадает с собственной частотой колебаний маятника с идентичными параметрами.

Кинематика стабилизированного ротора. Момент импульса стабилизированного ротора равен

$$L = J\omega_0 = mr^2\omega_0 = mr^2\sqrt{\frac{k}{m}} = r^2\sqrt{mk}.$$

Здесь J – момент инерции, $x_\omega = \sqrt{mk}$ – волновой реактанс [10].

$$r = \frac{v}{\omega_0}.$$

$$L = r^2x_\omega = \frac{v^2}{\omega_0^2}x_\omega = v^2\frac{m}{k}\sqrt{mk} = \frac{m}{\omega_0}v^2.$$

При изменении момента импульса изменяется радиус и тангенциальная скорость (частота вращения при этом не меняется и равна собственной).

Положению груза, при котором его центр масс совпадает с осью вращения, соответствует состояние неопределенного равновесия. При вращении груз равновероятно может отклониться в любую из двух сторон и, соответственно, может развиваться как сжатие, так и растяжение пружины.

Состояние неопределенного равновесия можно исключить, обеспечив начальное (статическое) смещение груза r_0 и равную ему начальную деформацию пружины.

Динамика стабилизированного ротора. При раскручивании преднатяженного ротора до частоты ω_0 центробежная сила $m\omega^2r$ меньше силы начальной деформации пружины kr_0 , поэтому радиус r_0 не изменяется. Это участок линейной динамики $[0, \omega_0]$.

$$r = r_0, \quad \omega = \frac{M}{mr_0^2}t.$$

За время t_0 при постоянном вращающем моменте M ротор достигнет частоты вращения ω_0 .

$$t_0 = \frac{\omega_0 mr_0^2}{M} = \frac{\sqrt{mk}r_0^2}{M} = \frac{L_0}{M}.$$

При дальнейшем нагружении стабилизированного ротора вращающим моментом его динамика (нелинейный участок) описывается системой двух дифференциальных уравнений – вращательного и поступательного (радиального):

$$\begin{cases} \frac{d\omega}{dt} = \frac{M}{J} = \frac{M}{mr^2}, \\ m\frac{d^2r}{dt^2} = \frac{mv^2}{r} - kr = \frac{m\omega^2r^2}{r} - kr = (m\omega^2 - k)r. \end{cases}$$

Трение здесь не учитывается.

Начальные условия:

$$\omega|_{t=t_0} = \omega_0, \quad r|_{t=t_0} = r_0, \quad \frac{dr}{dt}\bigg|_{t=t_0} = 0.$$

Из системы уравнений и начальных условий получаем следующее:

$$\begin{aligned}
 \left. \frac{d\omega}{dt} \right|_{t=t_0} &= \frac{M}{mr_0^2}. \\
 \frac{d^2\omega}{dt^2} &= -2\frac{M}{mr^3} \frac{dr}{dt}, \quad \left. \frac{d^2\omega}{dt^2} \right|_{t=t_0} = 0. \\
 \frac{d^2r}{dt^2} &= (\omega^2 - \omega_0^2)r, \quad \left. \frac{d^2r}{dt^2} \right|_{t=t_0} = 0. \\
 \frac{d^3r}{dt^3} &= 2\omega \frac{d\omega}{dt} r + (\omega^2 - \omega_0^2) \frac{dr}{dt}, \\
 \left. \frac{d^3r}{dt^3} \right|_{t=t_0} &= 2\omega_0 \frac{M}{mr_0^2} r_0 = 2\omega_0 \frac{M}{mr_0}. \\
 \frac{d^3\omega}{dt^3} &= 6\frac{M}{mr^4} \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 - 2\frac{M}{mr^3} \frac{d^2r}{dt^2}, \quad \left. \frac{d^3\omega}{dt^3} \right|_{t=t_0} = 0. \\
 \frac{d^4\omega}{dt^4} &= -24\frac{M}{mr^5} \left(\frac{dr}{dt} \right)^3 + 6\frac{M}{mr^4} 2\frac{dr}{dt} \frac{d^2r}{dt^2} + \\
 &+ 6\frac{M}{mr^4} \frac{dr}{dt} \frac{d^2r}{dt^2} - 2\frac{M}{mr^3} \frac{d^3r}{dt^3}, \\
 \left. \frac{d^4\omega}{dt^4} \right|_{t=t_0} &= -2\frac{M}{mr_0^3} 2\omega_0 \frac{M}{mr_0} = -4\omega_0 \frac{M^2}{m^2 r_0^4}. \\
 \frac{d^4r}{dt^4} &= 2\left(\frac{d\omega}{dt} \right)^2 r + 2\omega \frac{d^2\omega}{dt^2} r + 2\omega \frac{d\omega}{dt} \frac{dr}{dt} + \\
 &+ 2\omega \frac{d\omega}{dt} \frac{dr}{dt} + (\omega^2 - \omega_0^2) \frac{d^2r}{dt^2}, \\
 \left. \frac{d^4r}{dt^4} \right|_{t=t_0} &= 2\left(\frac{M}{mr_0^2} \right)^2 r = \frac{2M^2}{m^2 r_0^3}.
 \end{aligned}$$

Таким образом, частота вращения стабилизированного ротатора и радиус представимы в виде

$$\begin{aligned}
 \omega &\approx \frac{1}{0!} \omega(0)t^0 + \frac{1}{1!} \frac{d\omega}{dt}(0)t^1 + \frac{1}{2!} \frac{d^2\omega}{dt^2}(0)t^2 + \\
 &+ \frac{1}{3!} \frac{d^3\omega}{dt^3}(0)t^3 + \frac{1}{4!} \frac{d^4\omega}{dt^4}(0)t^4 + \dots = \\
 &= \omega_0 + \frac{M}{mr_0^2} t + \frac{1}{2!} 0t^2 + \frac{1}{3!} 0t^3 - \\
 &- \frac{1}{4!} 4\omega_0 \frac{M^2}{m^2 r_0^4} t^4 + \dots = \omega_0 + \frac{M}{mr_0^2} t - \frac{\omega_0 M^2}{6m^2 r_0^4} t^4 + \dots
 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned}
 r &\approx \frac{1}{0!} r(0)t^0 + \frac{1}{1!} \frac{dr}{dt}(0)t^1 + \frac{1}{2!} \frac{d^2r}{dt^2}(0)t^2 + \\
 &+ \frac{1}{3!} \frac{d^3r}{dt^3}(0)t^3 + \frac{1}{4!} \frac{d^4r}{dt^4}(0)t^4 + \dots = \\
 &= r_0 + 0t + \frac{1}{2!} 0t^2 + \frac{1}{3!} 2\omega_0 \frac{M}{mr_0} t^3 + \frac{1}{4!} \frac{2M^2}{m^2 r_0^3} t^4 + \dots = \\
 &= r_0 + \frac{\omega_0 M}{3mr_0} t^3 + \frac{M^2}{12m^2 r_0^3} t^4 + \dots
 \end{aligned} \quad (3)$$

Вопрос о сходимости рядов здесь не рассматривается.

Смысл последних двух уравнений состоит в иллюстрации нелинейности динамики стабилизированного ротатора при нагружении его постоянным вращающим (тормозящим) моментом.

Подобно тому как при вынужденных колебаниях маятника частота не совпадает с собственной частотой, частота вращения стабилизированного ротатора при нагружении не совпадает с собственной частотой вращения.

Из (2) следует, что чем меньше момент M и больше m и r_0 , тем меньше отклонение частоты вращения ω от собственной ω_0 .

Второе замечательное свойство стабилизированного ротатора. (Первым является фиксированная собственная частота вращения (1) и ее совпадение с собственной частотой колебаний маятника).

При вынужденном вращении стабилизированного ротатора с постоянной частотой

$\omega = a\omega_0$ (a – безразмерный коэффициент) его радиальная динамика определяется уравнением

$$\frac{d^2r}{dt^2} = \left(\omega^2 - \frac{k}{m} \right) r = (a^2\omega_0^2 - \omega_0^2)r = -(1 - a^2)\omega_0^2 r.$$

В зависимости от значения a возможны три варианта:

1. При $a < 1$ имеет место дифференциальное уравнение свободных гармонических незатухающих колебаний с собственной частотой:

$$\omega_a = \omega_0 \sqrt{1 - a^2}.$$

Таким образом, стабилизированный ротатор доставляет возможность управлять собственной частотой колебаний радиального осциллятора.

2. При $a = 1$

$$\frac{d^2r}{dt^2} = 0, \quad \frac{dr}{dt} = V = \text{const}, \quad r = r_{01} + Vt.$$

Колебания не происходят.

3. При $a > 1$

$$\frac{d^2 r}{dt^2} = (a^2 - 1)\omega_0^2 r, \quad r = r_0 e^{(\omega_0 \sqrt{a^2 - 1})t}.$$

Колебания не происходят.

Затухание колебаний в стабилизированном ротаторе принципиально не отличается от затухания в обычном маятнике.

Выбег ротатора в стабилизированном режиме. Минимальная полная энергия стабилизированного ротатора в стабилизированном режиме соответствует статическому смещению груза r_0 :

$$W_0 = K_0 + U_0 = 2K_0 = 2U_0 = kr_0^2.$$

Максимальная полная энергия теоретически не ограничена, а практически определяется конструктивно установленным максимальным радиусом r_m :

$$W_m = kr_m^2.$$

Пусть средняя за выбег мощность диссипативных потерь равна P .

Тогда время выбега составит

$$\tau = \frac{W_m - W_0}{P} = k \frac{r_m^2 - r_0^2}{P}.$$

Очевидно, что чем меньше P , тем меньше отклонение частоты вращения ω от собственной ω_0 .

Заключение

Предложена схема стабилизированного ротатора, обладающего фиксированной частотой вращения, не зависящая от момента импульса и момента инерции.

Это означает, что при нулевом вращающем моменте в стационарном режиме частота вращения стабилизированного ротатора не может быть произвольной и принимает единственное значение.

Другими особенностями стабилизированного ротатора являются идентичность формулы частоты вращения формуле частоты пружинного маятника, равенство кинетической и потенциальной энергий и вытекающее из этого равенство радиуса вращения груза величине деформации пружины.

Стабилизированный ротатор может использоваться для управления собственной частотой колебаний радиального осциллятора, хотя в этом качестве он может иметь сильную конкуренцию со стороны мехатронных систем.

Напротив, в качестве стабилизатора вращений его конкурентные возможности неоспоримы и определяются предельной простотой конструкции.

Список источников

1. Саяпин С.Н. О прецизионной угловой ориентации и стабилизации вращающейся антенны РЛС аэростатного базирования // Инженерный журнал: наука и инновации. 2021. № 3 (111). С. 58-63.
2. Садомцев Ю.В., Гривенев Д.А. Синтез цифрового регулятора для системы стабилизации скорости вращения вала генератора // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 9. С. 31-36.
3. Сейтбатталов Ш.Б., Есенбаев С.Х. Системы контроля турбины и генератора ТЭЦ // Автоматика. Информатика. 2020. № 1. С. 134-139.
4. Штейнмиллер О.А. Анализ практики применения модульных автоматических насосных станций в системах водоснабжения // Сантехника. 2020. № 1. С. 44-49.
5. Савушкин С.С., Муравьев А.В. Оценка технико-эксплуатационных характеристик опытного образца модульной насосной станции // Вестник мелиоративной науки. 2021. № 3. С. 105-110.
6. Смирнов В.Н. Пути совершенствования конструкций подвесных конвейеров автоматизированных производств // Научно-технические ведомости СПбГТУ. 2006. № 2 (44). С. 160-172.
7. Когут А.Т. Параметрическая идентификация и оценивание адекватности динамических моделей обрабатывающего станка // Омский научный вестник. 2006. № 2 (35). С. 103-106.
8. Мошонкин Н.Ю. Разработка ветрогенератора в воздуховод с искусственным и постоянным потоком воздуха // Энергетические системы. 2019. № 1. С. 408-414.
9. Бурков А.И., Матрунчик А.С. Опыт использования ветрогенератора для интегрированной энергетической установки // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. 2014. № 1. С. 33-39.
10. Popov I.P. Application of the Symbolic (Complex) Method to Study Near-Resonance Phenomena // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2020. Vol. 49. No. 12. P. 1053-1063. DOI: 10.3103/S1052618820120122

References

1. Sayapin S.N. On precision angular orientation and stabilization of a rotating antenna of a balloon radar. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovations], 2021, no. 3 (111), pp. 58-63. (In Russ.)
2. Sadomtsev Yu.V., Grivenov D.A. Synthesis of a digital controller for a system for stabilizing the speed of rotation of the generator shaft. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2011, no. 9, pp. 31-36. (In Russ.)

3. Seitbattalov Sh.B., Esenbaev S.Kh. Turbine and generator control systems at combined heat and power plants. *Avtomatika. Informatika* [Automation. Informatics], 2020, no. 1, pp. 134-139. (In Russ.)
4. Steinmiller O.A. Analysis of the practice of using modular automatic pumping stations in water supply systems. *Santekhnika* [Sanitary Engineering], 2020, no. 1, pp. 44-49. (In Russ.)
5. Savushkin S.S., Muravev A.V. Assessment of the technical and operational characteristics of a prototype of a modular pumping station. *Vestnik meliorativnoy nauki* [Bulletin of Amelioration], 2021, no. 3, pp. 105-110. (In Russ.)
6. Smirnov V.N. Ways to improve the design of suspended conveyors for automated production. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGTU* [St. Petersburg Polytechnic University Journal], 2006, no. 2 (44), pp. 160-172. (In Russ.)
7. Kogut A.T. Parametric identification and assessment of adequacy of dynamic models of a processing machine. *Omskiy nauchnyy vestnik* [Omsk Scientific Bulletin], 2006, no. 2 (35), pp. 103-106. (In Russ.)
8. Moshonkin N.Yu. Development of a wind generator in an air duct with artificial and constant air flow. *Energeticheskie sistemy* [Energy Systems], 2019, no. 1, pp. 408-414. (In Russ.)
9. Burkov A.I., Matrunchik A.S. Experience in using a wind generator for an integrated power plant. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura* [Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Construction and Architecture], 2014, no. 1, pp. 33-39. (In Russ.)
10. Popov I.P. Application of the symbolic (complex) method to study near-resonance phenomena. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2020, vol. 49, no. 12, pp. 1053-1063. DOI: 10.3103/S1052618820120122

Поступила 06.06.2022; принята к публикации 01.07.2022; опубликована 26.09.2022
Submitted 06/06/2022; revised 01/07/2022; published 26/09/2022

Попов Игорь Павлович – кандидат технических наук, доцент,
Курганский государственный университет, Курган, Россия.
Email: ip.popov@yandex.ru. ORCID 0000-0001-8683-0387

Igor P. Popov – PhD (Eng.), Associate Professor,
Kurgan State University, Kurgan, Russia.
Email: ip.popov@yandex.ru. ORCID 0000-0001-8683-0387

ЭНЕРГЕТИКА МЕТАЛЛУРГИИ, ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ

METALLURGICAL POWER ENGINEERING, ENERGY SAVING AND ELECTRICAL SYSTEMS

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

УДК 621.311.1

DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-3-147-154



ВКЛАД ПИТАЮЩЕЙ СЕТИ И ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ В КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ТОЧКЕ ПОСТАВКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Дзюба М.А., Сафонов В.И.

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Актуальность и цель исследования. Определение фактического вклада потребителя в ухудшение качества электрической энергии важно для определения мест установки и параметров оборудования для улучшения качества электроэнергии в конкретной точке общего присоединения. Для определения наиболее целесообразного места установки фильтров высших гармоник проведено экспериментальное исследование взаимного влияния электрической сети 220 кВ и дуговых сталеплавильных печей металлургического предприятия на качество электроэнергии на одной из понизительных подстанций и на ее шинах 35 кВ. **Используемые методы.** В эксперименте приборами «Ресурс UF2М» и «Энерготестер ПКЭ-А» регистрировались фазные токи, напряжения и мощности, а также коэффициенты гармоник на низком и высоком напряжении трансформатора ТДЦНМ-100000/160000/220-У. **Результаты.** На основании исследования оценен вклад питающей сети и электроприемников предприятия в несинусоидальность напряжения и восстановлена схема замещения рассматриваемой системы для k -й гармоники. Обосновано, что проведение исследований качества электроэнергии в широком диапазоне нагрузок предприятия является очень важным при принятии любого решения по установке оборудования для улучшения качества электроэнергии. Показано, что в рассмотренном случае установка фильтров высших гармоник на секциях шин 35 кВ недостаточно эффективна для улучшения качества электроэнергии на секциях шин 220 кВ. **Практическая значимость.** Сделанный вывод противоречит существующим рекомендациям в «Правилах технической эксплуатации электроустановок потребителей» пункт 3.2.17 об обязательной установке фильтрокомпенсирующих устройств и запрете работы дуговых сталеплавильных печей без них. Обсуждаются причины возникших противоречий и необходимость корректировки нормативной базы для предотвращения неэффективного использования ресурсов.

Ключевые слова: качество электроэнергии, несинусоидальность напряжения, сети высокого напряжения, дуговые сталеплавильные печи, фильтрокомпенсирующие устройства

© Дзюба М.А., Сафонов В.И., 2022

Для цитирования

Дзюба М.А., Сафонов В.И. Вклад питающей сети и промышленного предприятия в качество электроэнергии в точке поставки электроэнергии // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №3. С. 147-154. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-3-147-154>



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

CONTRIBUTION OF A SUPPLY NETWORK AND AN INDUSTRIAL SITE TO THE ELECTRIC POWER QUALITY AT THE POINT OF DELIVERY

Dziuba M.A., Safonov V.I.

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. Relevance and Objectives. It is important to determine how consumers actually affect the quality of electric power in order to decide where equipment should be installed for power quality optimization, as well as the parameters of such equipment. To determine the most appropriate place for installing higher harmonic filters, an experimental study was carried out to understand the mutual effect of a 220 kV power grid and electric arc furnaces of a steel plant on the electric power quality at one of the step-down stations and on its 35 kV buses. **Methods Applied.** The experiment relied on *Resurs UF2M* and *Energotester ПКЭ-А* meters that registered phase currents, voltages and powers, as well as low and high voltage harmonic factors at the transformer *ТДЦНМ-100000/160000/220-У*. **Findings.** The results of the study helped analyze how much the supply mains and the plant consumers contributed to the voltage non-sinusoidality. They also helped restore the equivalent circuit of the considered system for k harmonic. The authors reason why it is crucial to conduct studies on power quality within a wide range of loads before deciding on the installation of optimization equipment. It is showed that in the considered case the higher harmonic filters installed on the 35 kV buses failed to deliver the required optimization of the 220 kV bus power quality. **Practical Relevance.** The conclusion drawn contradicts Item 3.2.17 of the Code for Consumer Electrical Installations that stipulates that filter compensating devices must be used and that electric arc furnaces cannot be operated without them. The paper discusses why the above discrepancy occurred and the fact that it would be necessary to review the applicable regulations in order to optimize the utilization of resources.

Keywords: electric power quality, voltage non-sinusoidality, high-voltage grids, electric arc furnaces, filter compensating devices

For citation

Dziuba M.A., Safonov V.I. Contribution of a Supply Network and an Industrial Site to the Electric Power Quality at the Point of Delivery. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 3, pp. 147-154. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-3-147-154>

Введение

Улучшение качества электрической энергии – это один из ключевых вопросов энерго- и ресурсосбережения на промышленных предприятиях [1]. Этому вопросу посвящено большое количество исследований по методике определения параметров качества и проведению необходимых измерений [2-5]. Несмотря на наличие нормативных документов по качеству электроэнергии [6], вопрос продолжает активно обсуждаться.

Один из наиболее дискуссионных вопросов, связанных с качеством электроэнергии, – это определение фактического вклада каждого источника (потребителя) в качество электроэнергии в конкретной точке общего подключения. Метод отключения потребителя [7] несомненно дает точный результат, но достаточно трудоемок и не всегда реализуем особенно для предприятий металлургии, имеющих непрерывный график производства. Метод баланса вторичных мощностей [8] позволяет не отключать потребителей,

но, как показали дальнейшие исследования [9], дает хорошую точность только когда вклад одного из потребителей существенно больше остальных. Наибольшую популярность получил метод оценки влияния потребителей на качество электроэнергии по мощности потребителей [10-12]. Эти исследования легли в основу рекомендаций [13], применяемых в РФ для анализа причин ухудшения качества электроэнергии в точке общего присоединения.

Вклад потребителей и электрической сети в ухудшение качества электроэнергии в точке присоединения к сети является предметом давнего спора между энергетиками предприятий и представителями электросетевых компаний. В п. 3.2.17 «Правил технической эксплуатации электроустановок потребителей» [14] сказано, что «работа дуговых печей без фильтрокомпенсирующих устройств не допускается». Таким образом, всю вину за ухудшение качества возлагают на предприятие, имеющее характерные электроприемники, без проведения исследова-

ний реальной ситуации с качеством электроэнергии. Результатом этого является требование установки фильтров высших гармоник на шинах 35 (10) кВ таких предприятий.

Однако данное достаточно дорогостоящее мероприятие может не дать эффекта, если существенный вклад в ухудшение качества электроэнергии в точке разграничения балансовой принадлежности вносит питающая сеть. Поэтому перед установкой такого оборудования должен проводиться детальный анализ источников высших гармоник напряжения. В данной работе обсуждается методика и результаты такого исследования на примере металлургического предприятия.

Материалы и методы исследования

Схема исследуемого участка электрической сети, состоящая из трансформатора ТДЦНМ-100000/160000/220-У, секций шин 35 кВ и подключенных к ним дуговых сталеплавильных печей, показана на рис. 1.

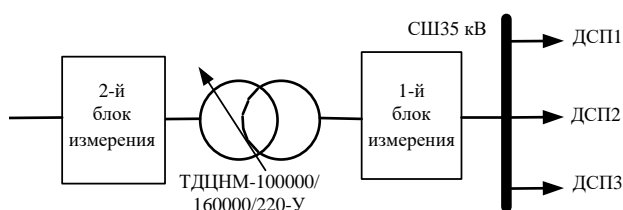


Рис. 1. Схема участка электрической сети
Fig. 1. Diagram of a power grid section

На схеме показаны места установки измерительных приборов «Ресурс UF2М» и «Энерготестер ПКЭ-А». Приборы позволяли измерять стандартные величины (фазное и линейное напряжение, фазный ток, активную и реактивную мощность каждой фазы и т.д.) и основные показатели качества электрической энергии (коэффициенты гармоник, коэффициенты несимметрии и т.д.). Измерения проводились с интервалом 1 мин в течение суток на разных стадиях производственного процесса на металлургическом предприятии.

Полученные результаты и их обсуждение

Для экспериментального определения параметров электрической сети был проведен анализ нагрузочных характеристик на шинах 220 кВ. Зависимости напряжения нагрузки от тока нагрузки показаны на рис. 2 после усреднения по фазам.

Из графика на рис. 2 видно, что во время наблюдения состояние системы изменялось, и все экспериментальные точки можно объединить в три группы (режим 1 – черные точки, режим 2 – серые точки, режим 3 – бледно-серые точки). Анализ временных зависимостей подтверждает, что изменения параметров сети происходят в определенные моменты времени, а не хаотичным образом и, следовательно, эти изменения связаны с переключениями в сети.

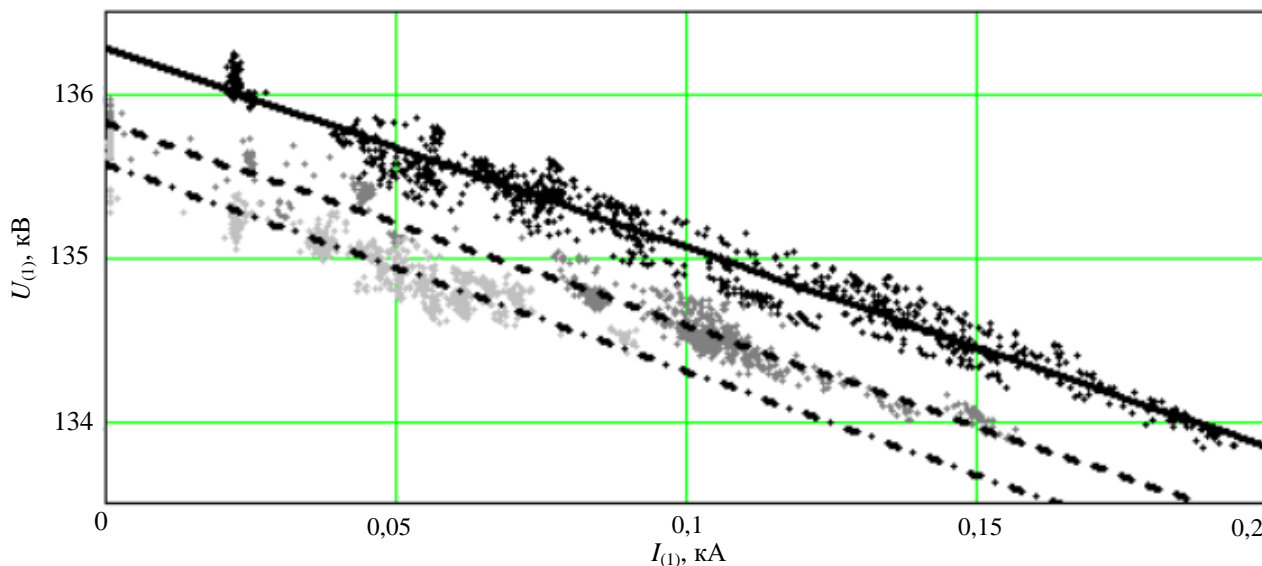


Рис. 2. Зависимость напряжения от тока 1-й гармоники на шинах 220 кВ: экспериментальные данные (точки) и аппроксимационные зависимости (линии)
Fig. 2. Voltage versus 1st harmonic current on 220 kV buses: Experimental data (points) and approximation dependences (lines)

Аппроксимация данных для каждого из состояний сети была выполнена в виде

$$U_{(1)} = E_{(1)} - X_{(1)} I_{(1)},$$

где $U_{(1)}$, $I_{(1)}$ – напряжение и ток в точке измерения; $E_{(1)}$, $X_{(1)}$ – ЭДС и внутреннее индуктивное сопротивление сети (индекс в скобках обозначает номер гармоники).

Параметры $E_{(1)}$ и $X_{(1)}$ были определены методом наименьших квадратов для каждого из состояний сети для шин 220 кВ (прибор 1 на **рис. 1**) и 35 кВ (прибор 2 на **рис. 1**) и приведены в **табл. 1**. Для удобства сравнения параметры для шин 220 кВ приведены к напряжению 35 кВ. Аппроксимационные зависимости для 220 кВ показаны на **рис. 1** (сплошная линия – режим 1, пунктир – режим 2, штрих-пунктир – режим 3).

Таблица 1. Параметры электрической сети
Table 1. Power grid parameters

Шины, кВ	Режим сети	$E_{(1)}$, кВ	$X_{(1)}$, Ом
220	1	22,213	0,325
220	2	22,139	0,329
220	3	22,097	0,336
35	1	22,342	1,8
35	2	22,244	1,81
35	3	22,183	1,653

Из **табл. 1** видно, что при переходе от шин 220 кВ трансформатора к шинам 35 кВ относительное сопротивление сети увеличилось в 5,5 раза, что соответствует добавлению сопротивления трансформатора.

Целью эксперимента было определение источников высших гармоник в рассматриваемой системе и оценка степени влияния каждого из источников: дуговых сталеплавильных печей и электрической сети. Анализ экспериментальных данных показал, что на шинах 35 и 220 кВ наибольшие значения имеют токи и напряжения 2, 3, 4 и 5-й гармоник. Поскольку для всех гармоник результаты качественно совпадают, то далее приведены результаты только для 5-й гармоники, вносящей наибольший вклад в несинусоидальность напряжения.

Зависимости напряжения 5-й гармоники от тока для шин 220 и 35 кВ показаны на **рис. 3** для 3-х режимов работы сети. Для шин 220 кВ результаты сразу приведены к напряжению 35 кВ для удобства дальнейшего анализа.

Кроме экспериментальных точек для трех состояний сети (аналогично **рис. 2** режим 1 – черные точки, режим 2 – серые точки, режим 3 – бледно-серые точки) на **рис. 3** показаны значения ЭДС сети (аналогично **рис. 2** сплошная линия – режим 1, пунктир – режим 2, штрих-пунктир – режим 3) и напряжение (точечная линия), создаваемое дуго-

выми сталеплавильными печами. ЭДС сети для 5-й гармоники было рассчитано как среднее значение для малых (менее 1 А) токов гармоник.

Для рассматриваемого случая схема замещения участка сети (см. **рис. 1**) для 220 кВ (при $X_{T(5)}=0$) и для 35 кВ для 5-й гармоники имеет вид, показанный на **рис. 4**. В нее входят: ЭДС сети $E_{c(5)}$; индуктивные сопротивления сети $X_{c(5)}$ и трансформатора $X_{T(5)}$; источник тока $J_{п(5)}$, моделирующий дуговые сталеплавильные печи. По схеме можно определить напряжения $U_{1(5)}$ в месте установки измерительного блока 1 и приведенное к 35 кВ напряжение $U_{2(5)}$ в месте установки измерительного блока 2.

Параметры $E_{c(5)}$, $X_{c(5)}$ или $X_{c(5)}+X_{T(5)}$ были определены для каждого из состояний сети для шин 220 и 35 кВ и приведены в **табл. 2**. Для удобства сравнения параметры для шин 220 кВ также приведены к напряжению 35 кВ.

От стандартной ситуации, рассматриваемой во многих учебниках [3], схема на **рис. 4** отличается наличием ЭДС сети. При этом из расчетов и **рис. 3** видно, что ЭДС сети не является малой поправкой по сравнению с остальными напряжениями. Из **рис. 3, а** видно, что на шинах 220 кВ основным источником 5-й гармоники является питающая сеть. На шинах 35 кВ вклад сети и нагрузки становится сравнимым при токах 5-й гармоники печей в 10-15 А, что соответствует мощности нагрузки около 10 МВт на фазу. Только при мощности нагрузки более 15 МВт на фазу можно говорить, что дуговые сталеплавильные печи формируют несинусоидальность напряжения на шинах 35 кВ. Однако такие состояния составляют только 4,7% от времени наблюдения. Измерения показали, что электрическая сеть и дуговые сталеплавильные печи могут ослаблять (черные точки на **рис. 3** для режима 1) или усиливать (серые точки на **рис. 3** для режима 2) действие друг друга.

Схемы с эквивалентными генераторами, заменяющими сеть и нагрузку, активно используются при анализе качества электроэнергии методом баланса вторичных мощностей [8, 9]. В рассматриваемом случае считалось, что нагрузку можно заменить идеальным источником тока. Измерения проводились на кабеле, соединяющем вторичные обмотки трансформатора и секции шин 35 кВ, поэтому влиянием линейной нагрузки предприятия (а следовательно, и ее проводимостью) можно пренебречь. Примерную ошибку, получаемую при пренебрежении проводимостью эквивалентного источника для нагрузки (см. **рис. 4**), можно оценить по изменению ЭДС сети для 35 и 220 кВ (приведенной к напряжению 35 кВ). Из **табл. 2** видно, что отличие этих величин составляет около 10%.

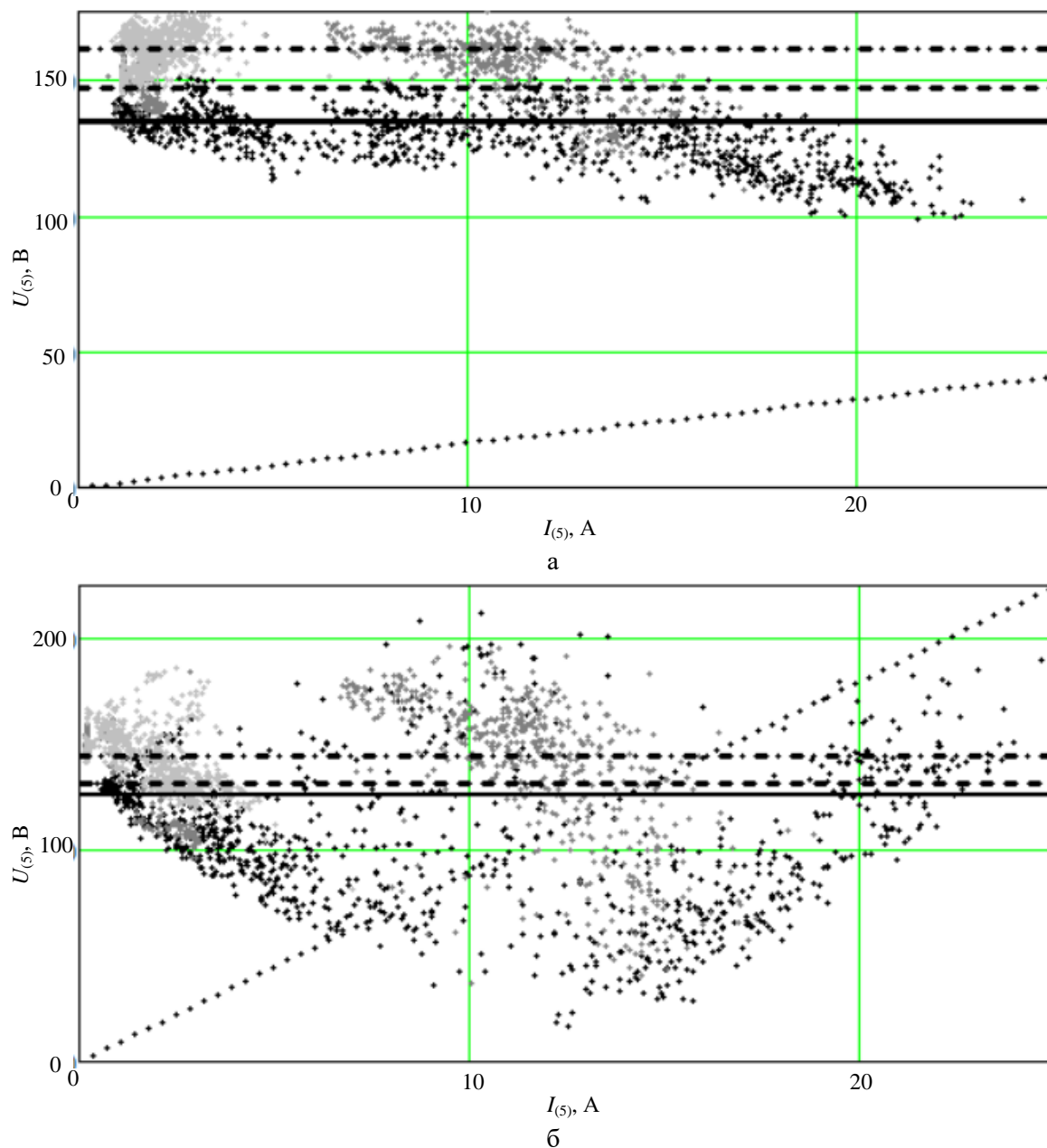


Рис. 3. Зависимость напряжения 5-й гармоники от тока для шин 220 кВ (а) и 35 кВ (б): экспериментальные данные (точки), ЭДС сети (линии) и вклад дуговых сталеплавильных печей (точечная линия)

Fig. 3. 5th harmonic voltage versus current for 220 kV (a) and 35 kV (b) buses: Experimental data (points), EMF of the grid (lines) and contribution of electric arc furnaces (dotted line)

Таблица 2. Параметры схемы замещения для 5-й гармоники

Table 2. 5th harmonic equivalent circuit parameters

Шины, кВ	Режим сети	$E_{c(5)}$, В	$X_{c(5)}$ или $X_{c(5)} + X_{T(5)}$, Ом
220	1	134,4	1,625
220	2	147,0	1,645
220	3	161,4	1,68
35	1	125,7	9,0
35	2	131,9	9,05
35	3	144,6	8,265

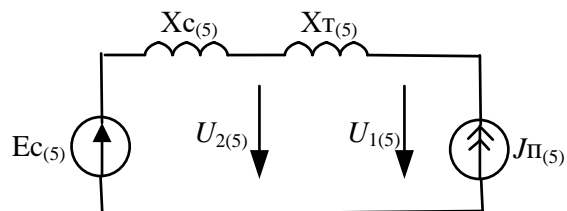


Рис. 4. Схема замещения системы электроснабжения для 5-й гармоники

Fig. 4. Power supply equivalent circuit for the 5th harmonic

Проведенные измерения показали, что требования п. 3.2.17 ПТЭЭП [14] не всегда оправданы и ситуация требует дополнительного исследования. Из рассмотренных экспериментальных данных следует, что установка фильтров высших гармоник на шинах 35 кВ несущественно изменила бы ситуацию с несинусоидальностью напряжения на шинах 35 кВ и совсем не изменила ее на шинах 220 кВ. Коэффициент 5-й гармоники на шинах 35 кВ, конечно, снизился бы при установке фильтров. Но шины 35 кВ – это собственность предприятия и решение об их установке должно быть продиктовано необходимостью улучшения качества электроэнергии для других нагрузок металлургического предприятия, а не внешними требованиями.

Причинами появления в сети 220 кВ высших гармоник могут быть полупроводниковые преобразователи. В случае, если их конструкция одинакова (например, популярные 6-пульсные выпрямители с мостовой схемой), то преобразователи неизбежно усиливают действие друг друга [15]. Также эмиссия высших гармоник тока других металлургических производств энергорайона могла создать такие условия в рассматриваемой точке электрической сети. Этот фактор никак не учитывался при формировании нормативных требований [14].

Рассмотренный участок электрической сети имеет номинальное высокое напряжение 220 кВ и, следовательно, большую мощность короткого замыкания относительно мощности нагрузки. Поэтому вклад предприятия в ухудшение качества электроэнергии в такой сети существенно уменьшается по сравнению с электрическими сетями напряжением 110 кВ. В то же время совокупное количество других потребителей в сети 220 кВ больше, чем в сети 110 кВ, и они оказывают «синергетическое» воздействие на несинусоидальность напряжения. Как показали проведенные экспериментальные исследования, нельзя рассматривать отдельно взятую подстанцию, питающую дуговые электропечи потребителя, как безусловный источник высших гармоник, что утверждается в источнике [14]. Анализ необходимо проводить во всем энергорайоне для определения истинных источников помех и наиболее рациональных мест установки фильтрокомпенсирующих устройств.

Заключение

В статье рассмотрена методика исследования несинусоидальности напряжения на шинах 35 и 220 кВ для металлургического предприятия с большой долей дуговых сталеплавильных печей в электрической нагрузке. Методика представляет

собой комбинацию метода отключения потребителя и метода анализа качества электроэнергии по мощности потребителя и заключается в проведении измерений в широком диапазоне нагрузок.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что в случае питания нагрузки по схеме глубокого ввода электрическая сеть также может быть существенным источником высших гармоник. Поэтому перед принятием любых решений об установке оборудования для улучшения качества электроэнергии необходим комплексный анализ взаимного влияния сети и электрической нагрузки предприятия. Существующие нормативные требования в условиях увеличения доли нелинейной нагрузки уже не могут быть безусловными.

Список источников

1. Чэпмэн Д. Цена низкого качества электроэнергии // Энергосбережение. 2004. №1. С. 66-69.
2. Управление качеством электроэнергии / Карташев И.И., Тульский В.Н., Шамонов Р.Г., Шаров Ю.В., Воробьев А.Ю. М.: Издат. дом МЭИ, 2017. 347 с.
3. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. М.: Энергоатомиздат, 1984. 160 с.
4. Моргунов Д.Н., Добрынин Е.В. Влияние нагрузки с импульсными источниками питания на несинусоидальность в сетях электроснабжения нетяговых железнодорожных потребителей // Вестник транспорта Поволжья. 2021. № 5. С. 13-18.
5. Chattopadhyay S., Madhuhanda M., Sengupta S. Electric Power Quality: Springer Science + Business Media B.V. Netherlands: Springer, 2011. 182 p.
6. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. <https://docs.cntd.ru/document/1200104301> (дата обращения 01.06.22).
7. Железко Ю.С., Кордюков Е.И., Курбацкий В.Г. Правила применения скидок и надбавок к тарифам за качество электроэнергии // Промышленная энергетика. 1990. №11. С. 52-55.
8. Майер В.Я. Методика определения долевых вкладов потребителя и энергоснабжающей организации в ухудшении качества электроэнергии // Электричество. 1994. № 49. С. 19-24.
9. Гамазин С.И., Петрович В.А. Определение фактического вклада потребителя в искажение параметров качества электрической энергии // Промышленная энергетика. 2003. №1. С. 32-38.
10. Оценка вклада нелинейной нагрузки в высшие гармоники напряжения сети при наличии в питающем напряжении высших гармоник / В.И. Сысун, О.В. Олещук, Н.В. Соболев и др. // Международный научно-исследовательский журнал. 2019. № 2. С. 20-23.

11. Шклярский, Я.Э., Растворова Ю.В., Петров И.С. Оценка вклада потребителей в ухудшение показателей качества электроэнергии // Вопросы электротехнологии. 2019. № 1. С. 56-63.
12. Карагодин В.В., Рыбаков Д.В., Смирнов С.В. Оценка влияния потребителей на уровень электромагнитной совместимости в точке подключения к системе электроснабжения специальных комплексов // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2022. № 681. С. 97-103.
13. ГОСТ IEC/TR 61000-3-6-2020. Электромагнитная совместимость (ЭМС). Часть 3-6. Нормы. Оценка норм электромагнитной эмиссии для подключения установок, создающих помехи, к системам электроснабжения среднего, высокого и сверхвысокого напряжения. <https://protect.gost.ru/v.aspx?control=7&id=237332> (дата обращения 21.06.22).
14. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. Утв. Минэнерго и Минюстом РФ № 6 от 13.01.03 № 4145 от 22.01.03. http://pue7.ru/pte/pte_ep.php (дата обращения 01.06.22).
15. Розанов Ю.К., Рябчицкий М.В., Кваснюк А.А. Силовая электроника: учебник для вузов. М.: Изд. дом МЭИ, 2017. 632 с.
7. Zhelezko Yu.S., Kordyukov E.I., Kurbatsky V.G. Rules for applying discounts and surcharges to tariffs for the electricity quality. *Promyshlennaya energetika* [Industrial Energy], 1990, no. 11, pp. 52-55. (In Russ.)
8. Mayer V.Ya. A procedure for determining the contribution of the energy consumer and that of the energy supplier to the deterioration of electric power quality. *Elektrichestvo* [Electricity], 1994, no. 49, pp. 19-24. (In Russ.)
9. Gamazin S.I., Petrovich V.A. Determining the actual contribution of the consumer to the distortion of electric power quality parameters. *Promyshlennaya energetika* [Industrial Energy], 2003, no. 1, pp. 32-38. (In Russ.)
10. Sysun V.I., Oleshchuk O.V., Sobolev N.V. et al. Evaluating the contribution of a non-linear load to the higher harmonics of the network voltage when they are present in the supply voltage. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International research journal], 2019, no. 2, pp. 20-23. (In Russ.)
11. Shklyarsky Ya.E., Rastvorova Yu.V., Petrov I.S. Evaluating the contribution of consumers to the deterioration of electric power quality indicators. *Voprosy elektrotekhnologii* [Problems of electrical engineering], 2019, no. 1, pp. 56-63. (In Russ.)
12. Karagodin V.V., Rybakov D.V., Smirnov S.V. Assessing the impact of consumers on the level of electromagnetic compatibility at the point of connection to the power supply system feeding specialized complexes. *Trudy Voennno-kosmicheskoy akademii imeni A.F. Mozhayskogo* [Proceedings of the A.F. Mozhaysky Military Space Academy], 2022, no. 681, pp. 97-103. (In Russ.)
13. ГОСТ IEC/TR 61000-3-6-2020. *Elektromagnitnaya sovmestimost (EMS). Chast 3-6. Normy. Otsenka norm elektromagnitnoy emissii dlya podklyucheniya ustanovok, sozdayushchikh pomekhi, k sistemam elektrosnabzheniya srednego, vysokogo i sverhvyssokogo napryazheniya*. [Electromagnetic compatibility (EMC). Part 3-6. Limits. Assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems]. <https://protect.gost.ru/v.aspx?control=7&id=237332> (Accessed: 21.06.22) (In Russ.)
14. *Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii elektroustanovok potrebitelej. Uverzhdeno Minenergo i Minyustom RF № 6 ot 13.01.03 № 4145 ot 22.01.03* [Code for Consumer Electrical Installations. Approved by the Ministry of Energy and the Ministry of Justice of the Russian Federation No. 6 dated January 13, 2003 No. 4145 dated January 22, 2003]. http://pue7.ru/pte/pte_ep.php (accessed 01.06.22). (In Russ.)
15. Rozanov Yu.K., Ryabchitsky M.V., Kvasnyuk A.A. *Silovaya elektronika: uchebnik dlya vuzov* [Power electronics: Textbook for university students]. Moscow: Publishing House of MPEI, 2017, 632 p. (In Russ.)

References

1. Chapman D. The price of low quality electricity. *Energoberezhenie* [Energy saving], 2004, no. 1, pp. 66-69. (In Russ.)
2. Kartashev I.I., Tulskey V.N., Shamonov R.G., Sharov Yu.V., Vorobyov A.Yu. *Upravlenie kachestvom elektroenergii* [Power quality management]. Moscow: Publishing house of MPEI, 2017, 347 p. (In Russ.)
3. Zhezhelenko I.V. Vysshie garmoniki v sistemakh elektrosnabzheniya prompredpriyatij [Higher harmonics in power supply systems of production companies]. Moscow: Energoatomizdat, 1984, 160 p. (In Russ.)
4. Morgunov D.N., Dobrynin E.V. Relationship between the load with switch-mode power supply and non-sinusoidality in power supply networks of non-traction railway consumers. *Vestnik transporta Povolzhya* [Transport bulletin of the Volga region], 2021, no. 5, pp. 13-18. (In Russ.)
5. Chattopadhyay S., Madhuhanda M., Sengupta S. *Electric Power Quality*: Springer Science + Business Media B.V. Netherlands: Springer, 2011. 182 p.
6. ГОСТ 32144-2013. *Elektricheskaya energiya. Sovmestimost tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya* [Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems]. <https://docs.cntd.ru/document/1200104301>. (Accessed: 01.06.22). (In Russ.)

Поступила 12.07.2022; принята к публикации 12.09.2022; опубликована 26.09.2022
Submitted 12/07/2022; revised 12/09/2022; published 26/09/2022

Дзюба Михаил Александрович – кандидат технических наук, доцент, заместитель начальника управления научной и инновационной деятельности ЮУрГУ, доцент кафедры «Электрические станции сети и системы электроснабжения» ПИ ЮУрГУ, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.
Email: dziubama@susu.ru. ORCID 0000-0003-3270-6190

Сафонов Валерий Иванович – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедр «Электрические станции сети и системы электроснабжения» ПИ ЮУрГУ и «Техника, технологии и строительство» ИОДО ЮУрГУ, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.
Email: safonovvi@susu.ru. ORCID 0000-0001-6452-9286

Mikhail A. Dziuba – PhD (Eng.), Associate Professor, Deputy Head of the SUSU Research & Innovation Services, Associate Professor at the Department of Electric Power Plants and Power Supply Systems, Institute of Engineering and Technology South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: dziubama@susu.ru. ORCID 0000-0003-3270-6190

Valery I. Safonov – PhD (Physics & Mathematics), Associate Professor, Associate Professor at the Department of Electric Power Plants and Power Supply Systems, Institute of Engineering and Technology, and at the Department of Engineering, Technology and Civil Engineering, Institute of Open and E-Learning South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: safonovvi@susu.ru. ORCID 0000-0001-6452-9286