

ВЕСТНИК

Магнитогорского государственного технического
университета им. Г.И. Носова

2019. Т.17, №4

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, РИНЦ, ВИНТИ и др. Электронные версии журнала размещаются на сетевом ресурсе Научной Электронной Библиотеки в сети Интернет.

Издается с марта 2003 года

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Председатель редакционной коллегии
В.М. Колокольцев (Россия)

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

РЕДАКЦИЯ

Главный редактор О.Н. Тулупов
Первый заместитель главного редактора
М.А. Полякова
Заместители главного редактора:
А.Г. Корчунов, О.С. Логунова,
Н.Н. Орехова, В.Р. Храмин
Выпускающий редактор Г.С. Гун
Ответственный секретарь М.В. Шубина
Редактор Н.В. Кутекина
Технический редактор И.В. Ключникова
Перевод на английский:
В.И. Елесина, О.Е. Сухих

© ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2019

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 связей, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Учредитель – Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова.

(455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, д. 38).

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

Адрес редакции:

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

Адрес издателя:

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

Адрес типографии:

455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», участок оперативной полиграфии

Выход в свет 25.12.2019. Заказ 391. Тираж 500 экз. Цена свободная.

VESTNIK

of Nosov Magnitogorsk State Technical University

2019. Vol. 17, no. 4

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. Information about the journals can be found in international and Russian databases: Ulrich's Periodicals Directory, Crossref, Google Scholar, RSCI (Russian Science Citation Index), VINITI (the All-Russian Institute of Scientific and Technical Information of the Russian Academy of Sciences), and others. The digital version of the Journal is available at eLIBRARY.RU.

PUBLISHED SINCE MARCH, 2003

EDITORIAL BOARD MEMBERS

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

M. Dabala (Italy), R.O. Dusane (India),
H. Dyja (Poland), Ye Feng (China),
V.E. Gromov (Russia), J. Grum (Slovenia),
V.N. Kalmykov (Russia), D.R. Kaplunov (Russia),
R. Kawalla (Germany), V.R. Khamshin (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. Khamshin, N.N. Orekhova

Executive Editor G.S. Gun

Executive Secretary M.V. Shubina

Editor N.V. Kutekina

Technical Editor I.V. Klyunnikova

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

© Federal State Budgetary Institution of Higher Education
Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2019

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

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

16+ in accordance with Federal Law #436-FZ dated 29.12.10

Editorial office:

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

Editorial office:

45/2 Karla Marksa prospekt, Magnitogorsk, Chelyabinsk region, 455000, Russia
Nosov Magnitogorsk State Technical University

Printing office:

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

Publication date: 25.12.2019. Order 391. Circulation: 500. Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

Разработка полезных ископаемых.....	4
<i>Ратникова Н.С., Панкратьев П.В.</i>	
Повышение эффективности извлечения золота и серебра из пиритовых концентратов методом СВЧ-технологий	4
Технологии переработки и утилизации техногенных образований и отходов	10
<i>Медяник Н.Л., Мишурина О.А., Муллина Э.Р., Смирнова А.В., Зайцева Е.В.</i>	
Технология комплексной переработки гидротехногенных образований горных предприятий медноколчеданного профиля	10
Обработка металлов давлением.....	18
<i>Конов С.В., Миянов А.Г., Файнштейн А.С., Харченко М.В.</i>	
Анализ влияния внецентренной упруго-пластической деформации на серповидность углеродистой ленты	18
Технологии обработки материалов	25
<i>Троценко И.Г., Герасименко Т.Е., Мешков Е.И.</i>	
Совершенствование технологии переработки отходов твердых сплавов. Часть I. Анализ современного состояния технологий	25
Материаловедение и термическая обработка металлов.....	34
<i>Ганиев И.Н., Шарипова Х.Я., Одиназода Х.О., Иброхимов Н.Ф., Ганиева Н.И.</i>	
Теплофизические свойства и термодинамические функции алюминий-магниевого сплава АМг2 с индием	34
Стандартизация, сертификация и управление качеством	44
<i>Полякова М.А., Янсаятова М.И.</i>	
Методика определения свойств вакуумных ионно-плазменных покрытий на основе установления системных связей.....	44
Надежность и долговечность металлургического оборудования	52
<i>Попов И.П.</i>	
Инертные реактансы вибрационных машин	52
Строительные материалы и строительные технологии в металлургии.....	56
<i>Лепидус А.А., Топчий Д.В., Ефремова В.Е., Кузин Е.А.</i>	
Реконструкция промышленных территорий	56
Экономика, управление и рынок продукции	62
<i>Николаева А.Г.</i>	
Разработка показателей оценки эффективности закупочной деятельности промышленных предприятий России	62
<i>Зайцева Е.В.</i>	
Обоснование организационно-управленческого механизма выбора стратегии развития цементных производств на базе интегральных функционалов.....	71
Сведения об авторах.....	78

CONTENTS

Mining and Mineral Processing	4
<i>Ratnikova N.S., Pankratiev P.V.</i>	
Improving the Efficiency of Gold and Silver Recovery from Pyrite Concentrates by Applying Microwave Technologies	4
Recycling of Man-Made Mineral Formations and Waste	10
<i>Medyanik N.L., Mishurina O.A., Mullina E.R., Smirnova A.V., Zaitseva E.V.</i>	
The Comprehensive Processing Technology of Hydro-Technogenic Formations of Yellow Copper ore Mining Plants	10
Metal Forming.....	18
<i>Konev S.V., Miyanov A.G., Fainshtein A.S., Kharchenko M.V.</i>	
Analysis of the Effect of Off-Center Elastic-Plastic Deformation on the Carbon Strap Camber	18
Material Process Engineering	25
<i>Trotsenko I.G., Gerasimenko T.E., Meshkov E.I.</i>	
Improvement of the Cemented Carbide Material Waste Processing Technology. Part I. Analysis of the Current State of Technologies	25
Materials Science and Heat Treatment of Metals	34
<i>Ganiev I.N., Sharipova Kh.Ya., Odinzoda Kh.O., Ibrokhimov N.F., Ganieva N.I.</i>	
Thermophysical Properties and Thermodynamic Functions of Aluminum-Magnesium Alloy AMg2 with Indium.....	34
Standardization, Certification and Quality Management.....	44
<i>Polyakova M.A., Yansaitova M.I.</i>	
Method for Determining the Properties of Vacuum Ion-Plasma Coatings by Establishing System Relationships.....	44
Reliability and Durability of Metallurgical Equipment	52
<i>Popov I.P.</i>	
Inert Reactance of Vibrating Machines.....	52
Construction Materials and Construction Engineering in Metallurgy	56
<i>Lapidus A.A., Topchiy D.V., Efremova V.E., Kuzin E.A.</i>	
Redevelopment of Industrial Areas	56
Economics, Management and Product Market	62
<i>Nikolaeva A.G.</i>	
Development of Procurement Performance Indicators of Industrial Enterprises of the Russian Federation.....	62
<i>Zaitseva E.V.</i>	
Rationale for the Organizational and Management Mechanism to Select the Cement Plant Development Strategy Using Integral-Type Functionals	71
Information about Authors	78

РАЗРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 622.34

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-4-4-9>ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИЗВЛЕЧЕНИЯ
ЗОЛОТА И СЕРЕБРА ИЗ ПИРИТОВЫХ КОНЦЕНТРАТОВ
МЕТОДОМ СВЧ-ТЕХНОЛОГИЙ

Ратникова Н.С., Панкратьев П.В.

Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы): в статье описаны особенности и потенциальные преимущества процесса извлечения золота из пиритовых концентратов с помощью СВЧ технологий. На примере Гайского месторождения были произведены расчеты и получены теоретические результаты. **Цель работы:** повысить эффективность извлечения золота из пиритовых отвалов, увеличить минерально-сырьевую базу Урала. **Используемые методы:** применялся метод СВЧ-технологий, при котором минералы пустой породы нагреваются, происходит растрескивание оболочки, и частицы золота становятся доступными для извлечения. **Новизна:** к элементам новизны относятся усовершенствование методов расчетов, показывающих повышение извлекаемости золота и серебра. **Результат:** в статье приведено сравнение методик и использование методов использования СВЧ-технологий применительно к месторождениям Южного Урала, в частности Гайского. Проведены расчеты, показывающие повышение эффективности извлечения благородных металлов при помощи СВЧ-технологий. **Практическая значимость:** Данные расчеты помогут осуществить комплексную переработку упорных золотосодержащих руд, что позволит улучшить экологическую обстановку Южного Урала.

Ключевые слова: золото, серебро, пирит, медно-колчеданные руды, СВЧ-технологии, извлечение золота, благородные металлы, пиритовые концентраты, добыча золота и серебра.

Введение

В Оренбургской части Южного Урала широко развиты колчеданные промышленные месторождения медно-цинковых руд, основными продуктами которых кроме меди, цинка, реже свинца, являются сопутствующие редкие и благородные элементы. Среди последних особую значимость имеет золото, составляющее более 90% всей добычи золота в области [1].

Материалы и методы исследования

Определенная часть золота связана с пиритом (сульфидом железа), оно остается в очень больших количествах в технологически сложных для переработки пиритовых отвалах.

Для развития минерально-сырьевой базы страны важно не только открытие новых месторождений полезных ископаемых, но и рациональное использование уже имеющихся. Это можно добиться только при более полном извлечении из руд полезных компонентов.

После обогащения руд образуются отвальные «хвосты», содержащие пирит, халькопирит, пирротин и др. Пиритные «хвосты» являются очень ценными минеральными ресурсами, находящимися на горно-обогатительных фабриках при обогащении сульфидного медно- и свинцово-цинкового сырья. Содержание пирита в рудах – 60–80%, в хвостах – 90–95%. Отвалы меднорудных ГОКов содержат в меньших концентрациях те же полезные элементы, что и исходная руда. В образцах отвалов и хвостохранилищ Гайского, Бурибаевского и Учалинского ГОКов установлено содержание Cu на уровне 0,05–0,17%, Zn – 0,05–0,37% [3].

Для серноколчеданных руд наиболее характерно повышенное содержание золота – от 0,5-I (43,5% случаев) до 0,5 г/т (30,4% случаев). Содержание золота класса I–I,5 г/т отмечается значительно реже (15%) и лишь в единичных случаях может достигать до 3 г/т (**рис. 1**). Исходя из многочисленных данных, можно сделать вывод, что в серноколчеданных рудах увеличение содержания серы сопровождается увеличением концентрации золота [4].

© Ратникова Н.С., Панкратьев П.В., 2019

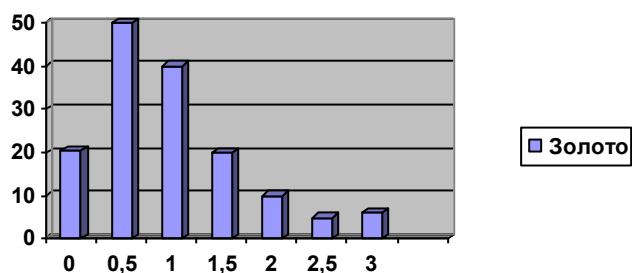


Рис. 1. Гистограмма распределения золота

Геохимическое изучение месторождений показывает, что золотоносность колчеданных руд определяется, в основном, в минералах-концентраторах, и особенно в пиритах, где стабильно низкое содержание тонкодисперсного золота [5].

Основными технологиями, применяемыми при обогащении колчеданных руд, являются: цианирование, гравитация-цианирование флотационного концентрата, гравитация-флотация-цианирование объединенного гравитационно-флотационного концентрата, позволяющие повысить степень извлекаемости золота из пирита. Однако этими методами не достигается полного извлечения. Перспективным методом при решении этой актуальной проблемы может быть СВЧ-технология [6].

К категории упорных относятся руды и концентраты, переработка которых в «стандартных» условиях цианирования не обеспечивает полного извлечения золота или же связана с повышенными затратами на отдельные технологические операции (измельчение, выщелачивание, обезвоживание, выделение золота из растворов и т.д.) [7,8].

Анализ исследований большинства месторождений Урала, касающихся вопросов нахождения и распределения благородных металлов в рудах, показывает, что золото и серебро в колчеданных рудах концентрируется как в виде самостоятельных (самородных) обособлений, так и в виде тонкодисперсированной вкрапленности в сульфидах.

Пирит является основным концентратом золота в колчеданных рудах, хотя его большая часть идет в отвалы. Значительная часть золота содержится в кристаллической решетке сульфидных минералов, обычно в пирите, пирротине и арсенопирите. Золото может быть как химически связанным, так и в виде зерен нано-размера [9].

Как известно, большинство медноколчеданных месторождений являются комплексными по наличию в них полезных компонентов. Поэтому нет сомнений в важности работ, направленных

на полную изученность месторождений. Только глубокая и разносторонняя информация о месторождениях позволит добиться максимальной экономической эффективности последующих эксплуатационных работ [10].

Рудные тела сложены медными, медно-цинковыми и серно-колчеданными рудами, причем роль последних с глубиной возрастает. По структурно-текстурным особенностям и составу среди них выделяются сплошные и прожилково-вкрапленные халькопирит-пиритовые, сфалерит-халькопирит-пиритовые и пиритовые руды [11].

Наиболее высокие концентрации золота и серебра отмечаются в приконтактных частях рудных тел с вмещающими породами, а также на выклинках и периферии рудных тел и участках их резких пережимов, где часто наблюдаются полосчатые и плейчатые текстуры руд, обусловленные проявлением пострудной тектоники и метаморфическим преобразованием руд [12]. В таких тектонно-метаморфогенных зонах отмечено повышенное количество борнита, теннанита, галенита, барита [13].

На месторождении золото концентрируется не только в промышленных рудах, но и в зонах не промышленной вкрапленной сульфидной минерализации, а также в метасоматитах и рудовмещающих породах, в различной степени подвергавшихся гидротермальным изменениям [14].

Важным экономическим фактором является потенциальная возможность вовлечения в переработку забалансовых вкрапленных руд и редковкрапленной сульфидной минерализации метасоматитов рудовмещающих толщ с целью извлечения из них полезных компонентов, в том числе золота и серебра [15].

Современная минеральная база России определяет тонковкрапленные и труднообогатимые руды, которые находятся в отвалах, из-за сложной структуры и вещественного состава. Для их переработки необходимы современные технологии, которые могут позволить качественно, эффективно и безопасно извлекать необходимые ценные компоненты.

В практике обогащения и извлечения золота из колчеданных руд применяются следующие методы: бесцианидное выщелачивание, окислительный обжиг, гидрохлорирование и др. [16].

Предлагается применение СВЧ-технологий для извлечения золота из колчеданных руд Оренбургской области:

Под СВЧ-технологиями понимают совокупность процессов преобразования, связанных с воздействием электромагнитного поля, которые направлены на разрушение золотосодержащих

минералов в диапазоне частиц от 1 кГц до 300 ГГц. Электромагнитное поле СВЧ диапазона избирательно взаимодействует с различными химическими элементами и соединениями, в результате чего кристаллическая решетка минерала разрушается [17].

Примерное время обработки руды составляет 13–16 мин при температуре 420°C вместо обычного обжига с временем 2,5 ч и температурой 550°C с выходом золота 98%. При облучении СВЧ минералов пирита и арсенопирита выделяются пары SO_2 и As_2O_3 [17].

При обработке СВЧ-импульсом минералы пустой породы нагреваются, происходит растрескивание оболочки, и частицы золота становятся доступными для извлечения.

Разработки исследовательской фирмы EME Microwave Technology Corp подтверждают снижение расходов на подготовку упорных пород к цианированию при использовании СВЧ-технологий. Так, при обработке 200 т концентрата в день СВЧ-полем расходы составляют 3,84 млн долл., при обычном обжиге – 6,9 млн долл., при окислении под высоким давлением 26,5 млн долл., бактериальном окислении – 3,0–3,7 млн долл. Если из необработанных карбонатных руд методом цианирования извлекается 5% металла, то из обработанных СВЧ-полями выход повышается до 83% [18].

Специалистами компании EME Microwave Technology Corp создана опытная установка, в состав которой входят два СВЧ-реактора и один СВЧ-генератор мощностью 75 кВт, который используется для окисления пиритовых и арсенопиритовых концентратов. Производительность установки составляет 5–10 т/сут. Расход электроэнергии – около 3 кВт · ч/т [19].

Установка для СВЧ-разупрочнения горных пород включает: генератор СВЧ, линию передачи, рабочую камеру, системы загрузки, а также необходимые согласующие и подстроечные элементы СВЧ-тракта, элементы защиты СВЧ-деталей от разрушающего и загрязняющего воздействия горной породы, элементы защиты персонала от паразитного излучения. Экранирование СВЧ-поля в местах загрузки и выгрузки породы осуществляется ее прохождением через заградительные волноводы или специальные окна с металлической спиралью, введением в загрузочные патрубки пазов глубиной в четверть длины волны и т.д. В волноводной рабочей камере ставят дополнительные элементы, улучшающие согласование СВЧ-генератора с нагрузкой и концентрирующие СВЧ-поле на обрабатываемом материале. При необходимости облучение

породы сочетают с ее механической обработкой в дробилках, мельницах, а также бурами и резцами [20].

Использование СВЧ-генераторов мощностью 100–1000 кВт в непрерывном режиме и до гига watt в импульсном улучшает эффективность обработки горных пород и уменьшает затраты на их обработку.

При увеличении мощности Р температура Т уменьшается, что обозначает – нонообменные преобразования могут осуществляться в широком интервале температур 250–850°C. Изменением температуры или мощности можно достигать одинаковых результатов при разных энергетических затратах. То есть фазовые переходы могут быть получены при высокой температуре, но при низкой мощности или при высокой мощности, но при низкой температуре.

Применение способа СВЧ-воздействия не только позволяет увеличить добычу золота из богатых (до 300 г/т) россыпей, но и открывает новые возможности по освоению руд, в которых содержание драгоценных металлов очень мало (5–15 г/т); позволяет перерабатывать промежуточные продукты свинцово-цинковых, колчеданных и других руд с содержанием 0,5–3 г/т, вторично перерабатывать хвосты старых разработок, содержащих 1–3 г/т и более золота. Сложность переработки данного вида сырья состоит в том, что частицы золота в нем имеют размер от сотых до десятых долей микрометра и находятся в связанном с другими минералами (пирит, арсенопириты) состоянии [20].

Заключение

На основании приведенных данных был произведен расчет возможной извлекаемости золота и серебра из пиритовых отходов при помощи СВЧ-технологий.

В температурных режимах 350–400°C возможны переходы немагнитных пирита и арсенопирита в магнитный пирротин. Время выдержки определяет степень намагничивания и объем образующихся ферритов. Магнитную фракцию выделяли магнитной сепарацией в постоянном магнитном поле. Оптимальное время – примерно 20 мин при температуре 350–400°C. Исследована извлекаемость золота и серебра в результате облучения в магнитной фракции «хвостов» Гайского месторождения с глубины 695 м. Их содержание возрастает от 0,24 и 2,88 г/т соответственно до 2,7 г/т золота и 32,2 г/т серебра (см. таблицу) [20].

**Повышение извлекаемости золота и серебра
из «хвостов» Гайского месторождения
после применения СВЧ-облучения**

Номер об- разца	«Хвосты» без гравитационного обогащения	Концен- трация золота, г/т	Концен- трация серебра, г/т
1	Исходная проба	0,24	2,88
2	Магнитная фракция из исходной пробы	0,72	5,96
3	Магнитная фракция после СВЧ обработки	2,7	32,2

Такое распределение золота при магнитной сепарации можно объяснить намагничиванием золотосодержащих составляющих пробы – пирита и арсенопирита. Извлекаемость золота из магнитной и немагнитной фракции составила около 80%. Извлекаемость до облучения составляла в аналогичных режимах не более 36%. Таким образом, применение СВЧ-технологий способствует повышению извлекаемости золота и серебра [20].

Внедрение СВЧ-технологий позволит осуществить комплексную переработку упорных золотосодержащих руд, другого техногенного сырья, тем самым улучшить экологическую обстановку в районах недропользования.

Список литературы

1. Седельникова Г.В., Романчук А.И.. Эффективные технологии извлечения золота из руд и концентратов // Прогрессивные технологии комплексной переработки минерального сырья. М.: Изд. дом «Руда и металлы», 2008. С. 120–133.
2. К вопросу об использовании и переработке отходов горно-обогатительных комбинатов Южного Урала / Гильмутдинов Р.А., Мичурин С.В., Ковтуненко С.В., Елизарьева Е.Н. // Успехи современного естествознания. 2017. № 2. С. 68–73.
3. Башлыкова Т.В. Сертификация минерального сырья по его свойствам // Научные основы и практика разведки и переработки руд и техногенного сырья с извлечением благородных металлов // Труды международной научно-технической конференции (12–15 ноября 2002 г.). Екатеринбург: Уральская государственная горно-геологическая академия, 2002. Ч. 2. С. 3–6.
4. Чантурия В.А. и др. Вскрытие упорных золотосодержащих руд при воздействии мощных электромагнитных импульсов // Доклады РАН. 1999. 366. №5. С. 680–683.
5. Нормуратов Р.И., Стрижко Л.С., Холикулов Д.Б. Исследования по извлечению золота из золотосодержащей магнитной фракции // Металлургия. 2009. № 4. С. 35–38.
6. Мелекесцева И.Ю. Зайков В.В. Минералогия руд Южно-Юлукского колчеданного месторождения, Южный Урал // Минералогия Урала-2007. Миасс: ИМин УрО РАН, 2007. С. 77–79.
7. Hutchison R.W. Volcanogenic sulfide deposits and their metallogenic significance // Econ. Geol., 1973. V. 68. № 8. P. 1223–1246.
8. Hutchison R.W. Massive base metal deposits as guides to tectonic evolution. The continental crust and its deposits // Geol. Assoc. Can. Spec. Pap., 1980. V. 20. P. 660–684.
9. Hutchison R.W. Precious metals in the massive base metal sulfide deposits // Geologische Rundschau., 1990. 79/2. P. 241–263.
10. Sawkins F.I. Massive sulfide deposits in relation to geotectonics // Geol. Assoc. Can. Spec. Pap., 1976. № 14. P. 221–240.
11. Благородные металлы в рудах и древних золотых изделиях Южного Урала / Зайков В.В., Таиров А.Д., Зайкова Е.В. и др. Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2012. 232 с.
12. Масленников В.В. Литогенез и колчеданообразование. Миасс: ИМин УрО РАН, 2006. 384 с.
13. Масленникова С.П., Масленников В.В. Сульфидные трубы палеозойских черных курильщиков. Екатеринбург; Миасс: УрО РАН, 2007. 312 с.
14. Holland N.G. The formation of an ancient gold-rich volcanogenic massive sulfide deposit: a study of the Baltat Tau deposit in the Southern Urals of Russia // PhD thesis. University of Southampton, 2002. 250 p.
15. Контарь Е.С. Геолого-промышленные типы месторождений меди, цинка, свинца на Урале (геологические условия размещения, история формирования, перспективы). Екатеринбург: Изд-во УГТУ, 2013. 199 с.
16. Лещиков В.И. Обеспеченность минерально-сырьевыми ресурсами горнодобывающих предприятий // Изв. вузов. Горный журнал. 1993. Вып. 6. С. 10–19.
17. Haque K.E. Microwave irradiation pretreatment of a refractory gold concentrate. Proc. Of the Internet/Symposium on gold metallurgy. Winnipeg, Canada, 1987. P.327.
18. А.с. №1592958 СССР, H05B6/64. Устройство для СВЧ обработки сыпучих материалов / Москалев А.Н. и др. 1998.
19. Исследование возможности применения СВЧ поля для процессов рудоподготовки при получении золота / Хван А.Б., Колесник В.Г., Саттаров Г.С., Латышев В.Е., Урусова Е.В. // Горный вестник Узбекистана. 2002. №2 (9). С. 56–60.
20. Влияние СВЧ-обработки на извлечение золота из минерального сырья / Колесник В.Г., Урусова Е.В., Павлий К.В., Козлов В.В., Панкратьев П.В., Смирнова С.К. // Цветные металлы. 2000. №8. С. 72–75.

Поступила 19.07.19

Принята в печать 26.08.19

IMPROVING THE EFFICIENCY OF GOLD AND SILVER RECOVERY FROM PYRITE CONCENTRATES BY APPLYING MICROWAVE TECHNOLOGIES

Nataliya S. Ratnikova – Postgraduate Student

Orenburg State University, Orenburg, Russia. E-mail: nata.ratnikova.96@mail.ru

Petr V. Pankratiev – DrSc (Geol.-Min.), Professor

Orenburg State University, Orenburg, Russia.

Abstract. Problem Statement (Relevance): The paper describes the features and potential benefits of gold recovery from pyrite concentrates using microwave technologies. We made calculations and obtained the theoretical results using the example of the Gaiskoye deposit.

Objective: The objective is to improve the efficiency of recovering gold from pyrite heaps, and to increase the mineral resource base of the Urals. **Methods Used:** The microwave technology was used to heat minerals of waste rock and crack the shell, and then gold particles may be recovered. **Novelty:** The elements of novelty include the improvement of calculation methods, showing an increase in the recoverability of gold and silver. **Findings:** The paper presents a comparison of methods and the use of microwave technologies in relation to the deposits in the Southern Urals, in particular, the Gaiskoye deposit. We made the calculations showing an increase in the efficiency of noble metal recovery using microwave technologies. **Practical relevance:** These calculations will contribute to a comprehensive processing of refractory gold-bearing ores, thereby improving the environmental situation in the Southern Urals.

Keywords: gold, silver, pyrite, copper pyrite ores, microwave technologies, gold recovery, noble metals, pyrite concentrates, gold and silver mining.

References

1. Sedelnikova G.V., Romanchuk A.I. Efficient technologies of gold recovery from ores and concentrates. *Progressivnyye tekhnologii kompleksnoy pererabotki mineralnogo syr'ya* [Advanced technologies for the integrated processing of mineral raw materials]. Moscow: Ore and Metals, 2008, pp.120–133. (In Russ.)
2. Gilmudinova R.A., Michurin S.V., Kovtunenkov S.V., Elizariyeva E.N. On the issue of the use and processing of wastes from mining and processing plants of the Southern Urals. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* [Advances in current natural sciences], 2017, no. 2, pp. 68–73. (In Russ.)
3. Bashlykova T.V. Certification of mineral raw materials by its properties. *Nauchnye osnovy i praktika razvedki i pererabotki rud i tekhnogennogo syr'ya s izvlecheniem blagorodnykh metallov. Trudy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii (12–15 noyabrya 2002 g.)* [Scientific bases and practice of exploration and processing of ores and technology-related raw materials with the recovery of noble metals. Proceedings of the International Scientific and Technical Conference (November 12–15, 2002)]. Yekaterinburg: Ural State Academy of Mining and Geology, 2002, part 2, pp.3–6. (In Russ.)
4. Chanturiya V.A. et al. Opening of refractory gold-bearing ores under the influence of powerful electromagnetic pulses. *Doklady RAN* [Reports of the Russian Academy of Sciences], 1999, 366, no. 5, pp. 680–683. (In Russ.)
5. Normurotov R.I., Strizhko L.S., Kholikulov D.B. Studies on gold recovery from a gold-bearing magnetic fraction. *Metal-lurgiya* [Metallurgy], 2009, no. 4, pp. 35–38. (In Russ.)
6. Melekestseva I.Yu., Zaikov V.V. *Mineralogiya rud Yuzhno-Yuluxskogo kolchedannogo mestorozhdeniya, Yuzhnyi Ural. Mineralogiya Urala-2007* [Mineralogy of ores of the Yuzhno-Yuluxsk pyrite deposit, the Southern Urals. Mineralogy of the Urals-2007]. Miass: Institute of Mineralogy, the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2007, pp. 77–79. (In Russ.)
7. Hutchison R.W. Volcanogenic sulfide deposits and their metallogenic significance. *Econ. Geol.*, 1973, vol. 68, no. 8, pp. 1223–1246.
8. Hutchison R.W. Massive base metal deposits as guides to tectonic evolution. The continental crust and deposits. *Geol. Assoc. Can. Spec. Pap.*, 1980, vol. 20, pp. 660–684.
9. Hutchison R.W. Precious metals in the massive metal sulfide deposits. *Geologische Rundschau*, 1990, 79/2, pp. 241–263.
10. Sawkins F.I. Massive sulfide deposits in geotectonics. *Geol. Assoc. Can. Spec. Pap.*, 1976, no. 14, pp. 221–240.
11. Zaikov V.V., Tairov A.D., Zaikova E.V. et al. *Blagorodnyye metally v rudakh i drevnikh zolotykh izdeliyakh Yuzhnogo Urala* [Noble metals in ores and ancient gold products in the Southern Urals]. Yekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2012, 232 p. (In Russ.)
12. Maslennikov V.V. *Litogenez i kolchedanoobrazovanie* [Lithogenesis and pyrite formation]. Miass: Institute of Mineralogy, the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2006, 384 p. (In Russ.)
13. Maslennikova S.P., Maslennikov V.V. *Sulfidnye truby paleozoyskikh chernykh kurilshchikov* [Sulphide pipes of paleozoic black smokers]. Yekaterinburg-Miass: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2007, 312 p. (In Russ.)
14. Holland N.G. The formation of an ancient gold-rich volcanogenic massive sulfide deposit: a study of the Baltat-Tau deposit in the Southern Urals of Russia. PhD thesis. University of Southampton, 2002, 250 p.
15. Kontar E.S. *Geologo-promyshlennyye tipy mestorozhdeniy medi, tsinka, svintsa na Urale (geologicheskie usloviya razmeshcheniya, istoriya formirovaniya, perspektivy)* [Geological and industrial types of copper, zinc, and lead deposits in the Urals (geological conditions of their location, history of the formation, and prospects)]. Yekaterinburg: Ural State Mining University, 2013, 199 p. (In Russ.)
16. Leshchikov V.I. Provision of mineral resources to mining enterprises. *Izv. vuzov. Gornyy zhurnal* [News of the Higher Institutions. Mining Journal], 1993, vol. 6, pp. 10–19. (In Russ.)

17. Haque K.E. Microwave irradiation pretreatment of a refractory gold concentrate. Proceedings of the International Symposium on Gold Metallurgy. Winnipeg, Canada, 1987, p. 327.
18. Moskalev A.N. et al. *Ustroystvo dlya SVCh obrabotki syvuchikh materialov* [A device for the microwave processing of bulk materials]. Author's certificate USSR no. 1592958, cl. H05B6/64, 1998.
19. Khvan A.B., Kolesnik V.G., Sattarov G.S., Latyshev V.E., Urusova E.V. Studies on a potential application of a microwave field for ore preparation processes, when producing gold. *Gornyi vestnik Uzbekistana* [Mining bulletin of Uzbekistan], 2002, no. 2 (9), pp. 56–60. (In Russ.)
20. Kolesnik V.G., Urusova E.V., Pavliy K.V., Kozlov V.V., Pankratiev P.V., Smimova S.K. The influence of microwave processing on gold recovery from mineral raw materials. *Tsvetnye metally* [Non-ferrous metals], 2000, no. 8, pp.72–75. (In Russ.)

Received 19/07/19

Accepted 26/08/19

Образец для цитирования

Ратникова Н.С., Панкратьев П.В. Повышение эффективности извлечения золота и серебра из пиритовых концентратов методом СВЧ-технологий // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т.17. №4. С. 4–9. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-4-4-9>

For citation

Ratnikova N.S., Pankratiev P.V. Improving the Efficiency of Gold and Silver Recovery from Pyrite Concentrates by Applying Microwave Technologies. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2019, vol. 17, no. 4, pp. 4–9. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-4-4-9>

ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ И УТИЛИЗАЦИИ ТЕХНОГЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ И ОТХОДОВ

УДК 669.743.27: 669.054.83

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-4-10-17>

ТЕХНОЛОГИЯ КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ГИДРОТЕХНОГЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ МЕДНОКОЛЧЕДАННОГО ПРОФИЛЯ

Медяник Н.Л.¹, Мишурина О.А.¹, Муллина Э.Р.¹, Смирнова А.В.¹, Зайцева Е.В.²¹Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия²Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы): в статье приведены результаты экспериментальных исследований по разработке комплексной технологии переработки кислых техногенных образований горных предприятий медноколчеданного профиля. Рассмотрены основные закономерности процессов селективного извлечения ионов меди, железа и марганца из кислых рудничных вод. Представлены результаты экспериментального исследования параметров процесса извлечения марганца путем электрохимического осаждения ионов Mn^{2+} под действием «активного хлора» и последующим извлечением образующейся дисперсной фазы методом электрофлотации. Проанализировано влияние основных параметров технологических процессов электроосаждения и электрофлотации: pH растворов, плотности тока на электродах, времени обработки растворов и фонового состава электролитов. Представлен анализ влияния параметров процесса цементации на селективность и полноту извлечения ионов меди: диапазон pH; время обработки и соотношение компонентов загрузки цементатора – ионов меди и железа. Рассмотрены факторы, влияющие на эффективность осаждения ионов железа методом кислотного основного осаждения. **Цель работы** заключалась в разработке экологически безопасной технологии комплексной переработки кислых техногенных вод горных предприятий медноколчеданного комплекса, позволяющей в комплексе с основными металлами (медь и железо) селективно извлекать марганец в виде кондиционного сырья при одновременном снижении его концентрации в стоках до норм ПДК. **Используемые методы:** лабораторные и опытно-промышленные эксперименты на бездиафрагменном двухкамерном электрофлотаторе для растворов и извлекаемых технологических продуктов, химический анализ которых проводили по методикам фотометрического определения – для катионов металлов и атомно-адсорбционного определения – для получаемых по технологии продуктов. Фазовый состав образующихся в процессе осадков исследовали рентгенофазным методом на дифрактометре общего назначения с медным анодом ДРОН-1. **Новизна:** разработанная принципиальная технологическая схема переработки и очистки кислых сточных вод в условиях горно-обогатительных предприятий медноколчеданного комплекса позволяет эффективно и селективно извлекать ионы металлов: меди до 96%, железа до 84% и марганца до 99%. **Результаты:** теоретически обоснован процесс селективного извлечения марганца из кислых подотвалных вод медноколчеданных месторождений в составе их комплексной переработки, основанный на сочетании процессов электрокоагуляции $Mn(II)$ «активным хлором» и последующего электрофлотационного извлечения из растворов образующейся дисперсной фазы марганца. Определены зависимости влияния pH, плотности тока, времени и фонового состава электролитов на процесс электрокоагуляционного извлечения ионов Mn^{2+} из водных растворов в виде дисперсной фазы. Установлен фазовый состав образующейся дисперсной фазы – соединения типа $MnO(OH)_2$ и $MnO(OH)$ (86%), а также $Mn(OH)SO_4$, $Mn(OH)CO_3$, $Mn(OH)SO_4(H_2O)_2$ (14%). Предложен механизм электрофлотационного извлечения дисперсной фазы $MnO(OH)$ и $MnO(OH)_2$ из водных растворов, заключающийся в электростатическом формировании флотокомплекса «дисперсная фаза (+) – пузырек (H_2^-)». **Практическая значимость:** результаты исследований могут быть полезными для промышленных предприятий, осуществляющих переработку дисперсных водных систем с целью извлечения и концентрирования ценных компонентов.

Ключевые слова: технология, параметры процесса, извлечение, технологические продукты, медь, железо, марганец.

Введение

Нерациональное использование имеющихся в стране природных ресурсов приводит к тому, что

только лишь незначительная их часть превращается в товарный продукт, а остальное в виде систематических выбросов, стоков и других отходов поступает в окружающую среду [1, 2].

Технологические процессы горных предприятий протекают с образованием большого объема

© Медяник Н.Л., Мишурина О.А.,
Муллина Э.Р., Смирнова А.В., Зайцева Е.В., 2019

рудничных вод: шахтных, карьерных и подотвальных вод, которые проникают на значительную глубину, способствуя изменению водного режима прилегающих территорий и, как следствие, значительному ухудшению экологической ситуации на данных территориях [1–5].

Формирующиеся на территории горнорудных предприятий медноколчеданного комплекса Уральского региона кислые рудничные воды характеризуются высоким содержанием тяжелых и цветных металлов, некоторые из них относятся к категории редких и дорогостоящих. Следовательно, селективное выделение ценных металлов в виде технологических продуктов представляет собой самостоятельный экономический интерес при дальнейшей их переработке и вторичном использовании. К числу таких металлов можно отнести ионы меди (CCu^{2+} до 648 мг/дм³), цинка (CZn^{2+} до 970 мг/дм³), железа ($CFe_{общ}$ до 1140 мг/дм³) и марганца, концентрации которого в кислых стоках варьируются от 78 до 264 мг/дм³, что также позволяет рассматривать данные воды как техногенные источники марганецсодержащего сырья [5, 6].

Таким образом, разработка экологически безопасной ресурсосберегающей технологии, позволяющей селективно извлекать ценные металлы, и в частности марганец, из кислых рудничных вод горных предприятий в виде товарных продуктов с одновременным снижением их концентраций в

стоке до норм ПДК, в настоящее время является одной из актуальных научно-практических задач. Это даст возможность, с одной стороны, более полно использовать природные минеральные ресурсы, а с другой стороны, позволит существенно снизить экологическую нагрузку в регионе.

Методы экспериментальных исследований

Основными методами исследования были выбраны: лабораторные и опытно-промышленные эксперименты на бездиафрагменном двухкамерном электрофлотаторе; для растворов и извлекаемых технологических продуктов – химический анализ, который проводили по методикам фотометрического определения – для катионов металлов и атомно-адсорбционного определения – для получаемых по технологии продуктов. Фазовый состав образующихся в процессе осадков исследовали рентгенофазным методом на дифрактометре общего назначения с медным анодом ДРОН-1.

Результаты

По результатам проведенных предварительных экспериментальных исследований [7–10] в работе была предложена технологическая схема комплексной селективной переработки кислых рудничных вод, с высоким содержанием ионов меди, железа и марганца (рис. 1).

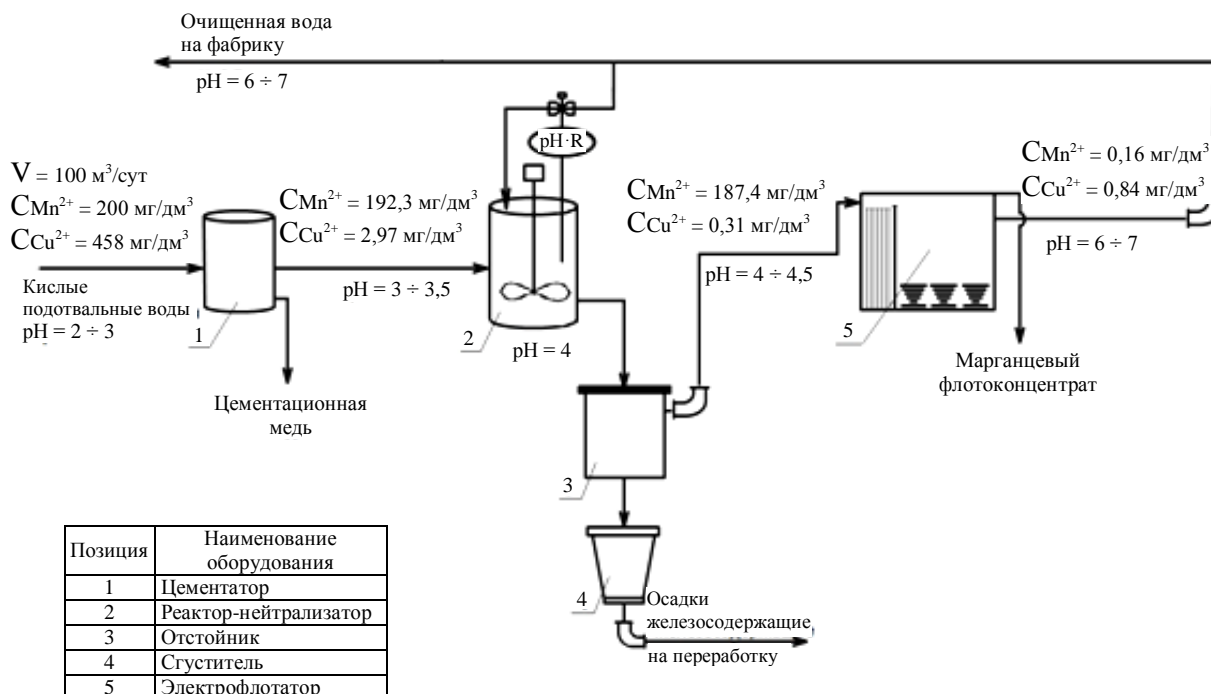


Рис. 1. Технологическая схема комплексной переработки кислых рудничных вод

Согласно разработанной технологической схеме, на первой стадии процесса кислые рудничные воды (рН 2 ÷ 3) подаются в цементатор (поз. 1), заполненный железной стружкой, где протекает процесс осаждения ионов меди. Затем рудничные воды поступают в реактор-нейтрализатор (поз. 2), где протекает процесс нейтрализации (при рН до 4,0), в результате которого ионы железа (II и III) осаждаются в виде дисперсной фазы $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Окисление ионов железа (II) до железа (III) и последующее его осаждение в виде дисперсной фазы $\text{Fe}(\text{OH})_3$ происходят в результате поступления в реактор-смеситель оборотной воды (рН = 6 ÷ 7), обогащенной растворенным кислородом, образующейся после стадии электрофлотации (поз. 5).

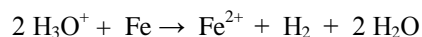
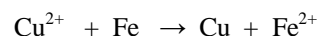
Осадок ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) поступает в отстойник (поз. 3), где происходит выделение его из водного раствора. Далее гидратированная дисперсная фаза подается в сгуститель (поз. 4) для последующего накопления и уплотнения. Затем железосодержащий осадок направляется на переработку с целью получения товарного продукта.

Из верхней части отстойника (поз. 3) осветленный кислый раствор (рН 4,0 ÷ 4,5) с помощью насосной системы подается на стадию электрофлотации. На данном этапе осуществляется процесс селективного извлечения ионов марганца путем сочетания процессов электроокисления ионов Mn^{2+} соединениями «активного хлора», образующимися в процессе электрообработки хлоридсодержащих растворов (в первой камере электрофлотатора) и последующего извлечения образующейся дисперсной фазы марганца методом электрофлотации (во второй камере электрофлотатора) (поз. 5). Образующийся в процессе электрофлотации марганцевый флотоконцентрат с помощью скребка удаляется в емкость сборника-накопителя, расположенного в торце верхней части флотационного аппарата. Осветленный раствор из верхней части электрофлотатора через патрубок направляется в систему оборотного водоснабжения и частично в реактор-нейтрализатор (поз. 2). Значения рН очищенной воды варьируются в интервале от 6 до 7.

Разработанная технология была апробирована на кислых подотвальных водах ЗАО «Бурибаевский ГОК». Результаты проведенных исследований позволили установить оптимальные параметры осуществления процессов селективного извлечения ионов меди, железа и марганца из кислых подотвальных вод ГОКа.

Технологические параметры процесса цементации ионов меди. В общем виде суммарный процесс контактного способа цементации ионов

меди железом отображается следующими реакциями [9–11]:



Кинетика и показатели выхода цементационной меди в реальных условиях зависит от таких технологических факторов, как: рН среды раствора, расход осадителя, концентрация ионов меди, время протекания процесса. В качестве осадителя (цементатора) в работе использовали железо. Опытные испытания проводила на водных растворах следующего состава: рН – 2,67; С (Cu^{2+}) – 284,1 мг/дм³; С (Fe^{3+}) – 434,7 мг/дм³. В ходе лабораторных испытаний кислый раствор объемом 0,5 дм³ пропускали через желоб, загруженный железной стружкой (при температуре 20⁰С) с интервалом времени от 1 до 15 мин.

На основании данных экспериментальных исследований установлено, что максимальные показатели извлечения меди на железной стружке достигаются в интервале рН от 1 до 3.

Полученные результаты эксперимента по подбору рациональных параметров соотношения ионов меди и железа в процессе цементации ионов меди из кислых рудничных вод ЗАО «Бурибаевский ГОК» представлены на **рис. 2**.

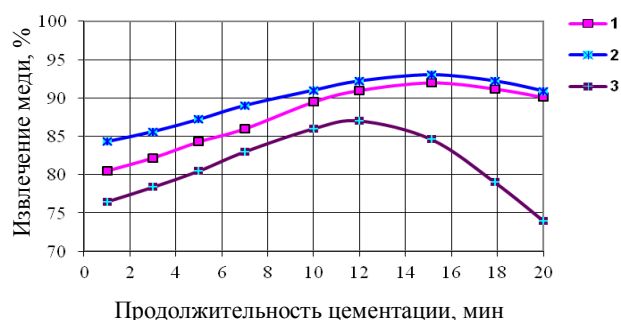


Рис. 2. Кинетика процесса цементации ионов меди из кислых рудничных вод ЗАО «Бурибаевский ГОК» при различных сочетаниях ионов меди и железа-осадителя: 1 – соотношение Cu^{2+} и Fe 1 : 2,5; 2 – соотношение Cu^{2+} и Fe 1 : 2; 3 – соотношение Cu^{2+} и Fe 1 : 1,5

Представленные кинетические зависимости (см. **рис. 2**) показали, что процесс цементации экономически и технологически эффективно проводить при соотношении меди и железа 1:2. Максимальные показатели извлечения меди в данном случае наблюдаются после 15 мин с момента поступления обрабатываемого раствора в цементатор – до 94,3%.

В процессе исследований установлено, что при соотношении ионов меди и железа 1:2 обра-

ботку одной и той же железной загрузкой можно проводить 10–12 раз. После чего требуется удаление из цементационной установки отработанного железа и выгрузка осевшей на дно цементной меди.

Проведенный гранулометрический анализ извлеченного осадка цементной меди показал, что около 85% цементной меди извлекается в тонкий класс 0,071+0 мм, из них более половины – 57,5% в класс – 0,044 мм.

Химический состав образующийся цементной меди представлен следующим образом: Cu (66,5%), Fe (12,25%), CaO (0,5%), MgO (0,2%), Al_2O_3 (0,03%).

В итоге технологические параметры процесса цементации ионов меди в цепи представленной технологической схемы составили: интервал pH 2–3; время обработки 15 мин; соотношение ионов меди и железа 1:2.

Технологические параметры процесса осаждения ионов железа. Процесс осаждения железа исследовали на кислых растворах с различной исходной концентрацией ионов железа (смоделированной согласно количественному составу кислых рудничных вод Бурибаевского ГОКа). Процесс нейтрализации исследуемых растворов проводили путем дозированного введения 1% раствора водной суспензии гидроксида кальция, контролируя значения pH обрабатываемого раствора до и после введения осадителя [9]. Эксперимент проводили при перемешивании в течение 20 мин и далее, после отделения дисперсной фазы, определяли остаточное содержание ионов железа в водных растворах. Результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 3.

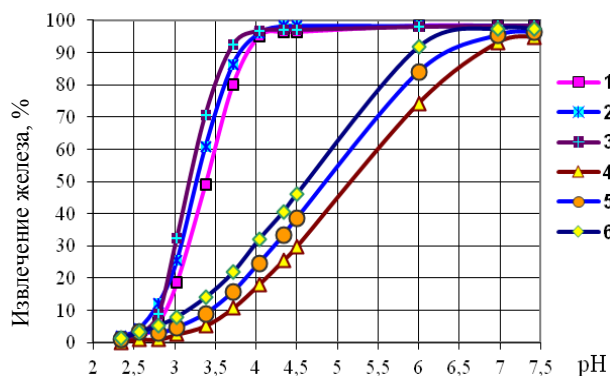


Рис. 3. Влияние pH раствора на извлечение ионов Fe^{2+} и Fe^{3+} методом нейтрализации:

- 1 – концентрация ионов Fe^{3+} = 305 мг/дм³;
- 2 – концентрация ионов Fe^{3+} = 520 мг/дм³;
- 3 – концентрация ионов Fe^{3+} = 750 мг/дм³;
- 4 – концентрация ионов Fe^{2+} = 285 мг/дм³;
- 5 – концентрация ионов Fe^{2+} = 400 мг/дм³;
- 6 – концентрация ионов Fe^{2+} = 640 мг/дм³.

Представленные результаты (см. рис. 3) показали, что максимальные значения извлечения железа наблюдаются после pH 2,5 и при pH 4,1, извлечение железа в виде гидроксида $Fe(OH)_3$ достигает 96%. Уменьшение исходной концентрации ионов Fe^{3+} в растворах приводит к возрастанию диапазона pH начала процесса кислотно-основного осаждения ионов железа (III). Данная закономерность может объясняться тем, что поверхность образующегося гидроксида железа (III) характеризуется высокими сорбционными свойствами, вследствие чего хлопья дисперсной фазы улавливают более мелкие коллоидные частицы из раствора, агрегируют их на своей поверхности, усиливая тем самым процесс осаждения образующихся коллоидных взвесей.

Анализ кинетических зависимостей процесса осаждения ионов железа (II) показал, что максимальные значения извлечения (до 97 %) в зависимости от $C_{исх. Fe^{2+}}$ в растворах наблюдаются в интервале pH от 7,1 до 7,5. При этом отмечено, что при возрастании исходной концентрации ионов Fe^{2+} в исследуемых растворах наблюдается снижение значений диапазона pH, при котором протекает процесс кислотно-основного осаждения ионов железа (II).

Сопоставляя интервал значений pH, при котором протекает процесс электрофлотационного извлечения ионов Mn (II), следует отметить, что селективность разделения поликатионных растворов, содержащих ионы Fe^{2+} и Mn^{2+} , возможно только в условиях предварительного окисления ионов Fe^{2+} до Fe^{3+} с последующим осаждением его в виде нерастворимого гидроксида $Fe(OH)_3$.

Результаты исследования процесса кислотно-основного осаждения ионов железа (III) из кислых рудничных вод приведены на рис. 4.

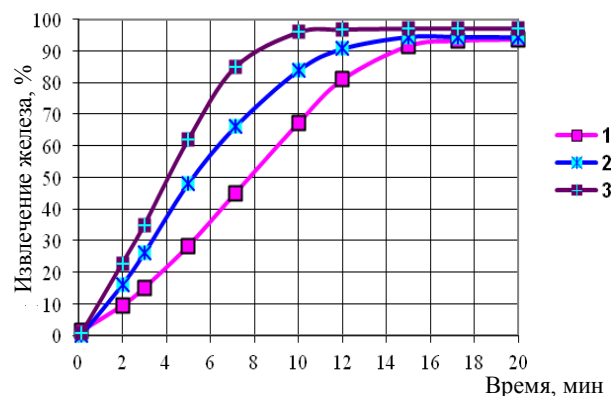


Рис. 4. Кинетика процесса кислотно-основного извлечения Fe (II,III) из кислых подотвалных вод ЗАО «Бурибаевский ГОК» (pH 3,1) при введении реагента-осадителя (pH 6,7):
1 – исходная концентрация $Fe_{общ}$ 305 мг/дм³;
2 – исходная концентрация $Fe_{общ}$ 520 мг/дм³;
3 – исходная концентрация $Fe_{общ}$ 750 мг/дм³.

Анализ полученных кинетических кривых показал: максимальные значения извлечения железа достигаются при проведении процесса нейтрализации в интервале pH от 3,7 до 4,1 при продолжительности обработки в течение 10–15 мин.

Технологические параметры процесса электрофлотационного извлечения марганца. При проведении укрупненных лабораторных испытаний использовался электрофлотационный модуль, представляющий собой емкость прямоугольной формы, внутренний объем которого разделен на две камеры. Высота уровня жидкости в обеих камерах 0,9 м, высота перегородки, разделяющей камеры, составляет 0,84 м. Соотношение рабочих объемов камер друг к другу 1:10. Материал катода и анода в двух камерах одинаков: катоды – сталь (ГОСТ 4986-90) толщиной 1 мм; аноды листовой титан марки ВТ-1-0 толщиной 2 мм с покрытием оксида рутения толщиной 5 мкм (рис. 5).

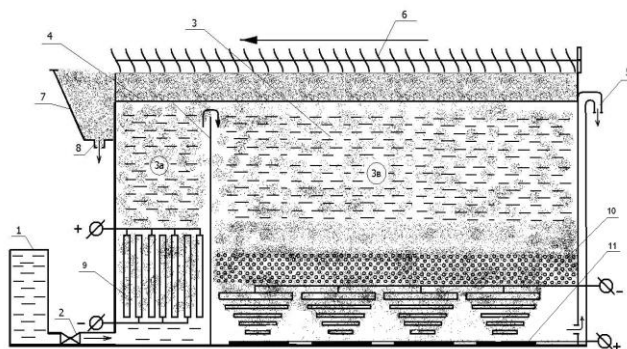


Рис. 5. Конструкция электрофлотационной установки: 1 – емкость для исходных обрабатываемых растворов; 2 – насос; 3 – электрофлотатор; 3а, 3в – первая и вторая камеры аппарата; 4 – перегородка, разделяющая первую и вторую камеры; 5 – патрубок для стока отработанного раствора; 6 – скребок-транспортёр; 7 – пеносорбник; 8 – патрубок для удаления флотошлама; 9 – электроды камеры электрокоагуляции; 10, 11 – электроды (катоды, аноды) электрофлотационной камеры аппарата

Исходя из электростатического механизма формирования флотокомплекса «частица (+) – пузырек (–)», в работе была модернизирована электродная часть флотационной камеры аппарата [11]. Выбор конструкции электродов обоснован стремлением максимально развить рабочую поверхность катода с целью повышения эффективности и экономической целесообразности электрофлотационного процесса (рис. 6).

Увеличение поверхности катода способствует насыщению электролизной системы преимущественно мелкодисперсными, отрицательно заряженными пузырьками водорода, в результате чего пузырьки водорода, приобретая избыточный отрицательный заряд, интенсивно оттал-

киваются от одноименно заряженной катодной поверхности. Это в итоге приводит к ускорению кинетики роста и отрыва пузырьков водорода с поверхности катода [11].

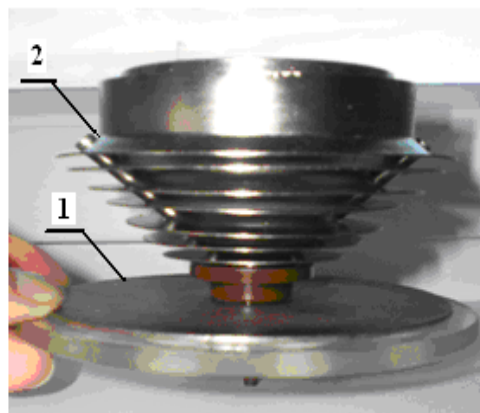


Рис. 6. Конструкция электродов флотационной камеры аппарата: 1 – анод; 2 – катод

Исследования фазового состава продуктов электрокоагуляции в присутствии фоновых электролитов (ионов SO_4^{2-} и CO_3^{2-} концентрацией 2 и 0,5 г/дм³ соответственно) показали, что основными фазами образующегося марганецсодержащего осадка (в первой камере электрофлотационной установки) являются соединения типа $\text{MnO}(\text{OH})$ и $\text{MnO}(\text{OH})_2$ (86%), а также $\text{Mn}(\text{OH})\text{SO}_4$, $\text{Mn}(\text{OH})\text{CO}_3$, $\text{Mn}(\text{OH})\text{SO}_4(\text{H}_2\text{O})_2$ (14%).

Технологический процесс извлечения марганца из кислых рудничных вод осуществлялся при следующих параметрах работы электрофлотационной установки:

- *первая камера аппарата*: диапазон pH от 4,5 до 6,2, время обработки в течение 1 мин, плотность тока на анодах ($I_{\text{сА}}$) 300 А/м², концентрация хлорид-ионов не менее 350 мг/дм³;
- *вторая камера аппарата*: диапазон pH от 6,2 до 7,4; время обработки в течение 10 мин; плотность тока на катодах ($I_{\text{сК}}$) 100 А/м².

Качественный состав полученного марганце-

вого флотоконцентрата: Mn – 50,7%, Fe – 2,2%, Cu – 0,02%, Zn – 0,015%.

Выводы

1. Разработанная принципиальная технологическая схема переработки и очистки кислых сточных вод в условиях горно-обогатительных предприятий медноколчеданного комплекса позволяет эффективно и селективно извлекать ионы металлов: меди до 96%, железа до 84% и марганца до 99%. Данные металлы получают в виде кондиционного сырья, используемого в металлургической и строительной областях промышленности [12–14].

2. Разработанные технологические рекомендации по электрофлотационному извлечению марганца из кислых рудничных вод позволяют селективно извлекать Mn в виде флотоконцентрата с содержанием марганца до 50,1%. Образующийся марганцевый концентрат может быть использован как исходное сырье при осуществлении различных металлургических операций.

3. Внедрение ресурсосберегающей технологии переработки и очистки кислых рудничных вод медно-колчеданных месторождений позволяет:

- рассматривать кислые рудничные воды не как отходы предприятия, а как дополнительный источник для получения цветных металлов в виде кондиционного сырья;

- уменьшить безвозвратные потери марганца, меди и железа в сбросных водах, что существенно повысит эффективность использования природных ресурсов и работу горнорудных предприятий;

- получать марганец, медь и железо в виде товарных продуктов;

- значительно улучшить качество сточных вод, сбрасываемых в поверхностные водоемы;

- существенно снизить экологический ущерб от нерегулируемого сброса кислых рудничных вод (шахтных, подотвальных и др. вод), отказавшись от строительства новых хвосто- и шламохранилищ [15–16].

Список литературы

1. Абдрахманов В.Ф., Попов В.Г. Геохимические особенности подземных вод Южного Урала // Геологический сборник. 2008, № 7. С. 219–232.
2. Белан Л.Н. Эколого-геохимическое состояние горнорудных районов Башкирского Зауралья // Вестник ОГУ. 2005, № 6. С. 113–117.
3. Воробьев А.Е., Щелкин А.А., Тушев О.В. Переработка марганцевого сырья отходами сернокислого производства // ГИАБ. 1998. №3. С. 10.
4. Воропанова Л.А. Теория, методы и практика извлечения цветных металлов из слабоконцентрированных растворов при комплексной переработке руд: дис. ... д-ра техн. наук, Владикавказ, 2003. 365 с.
5. Зайнуллин Х.Н., Галимова Е.Ж. Оценка влияния отходов и сточных вод Бурибаевского рудоуправления на загрязнение реки Таналык // Экологические проблемы промышленных зон Урала: сб. науч. тр. Междунар. науч.-техн. конф. Магнитогорск, 1998. Т.1. С. 137–142.
6. О влиянии техногенеза на химический состав гидротехногенных образований на территории ГОКов медноколчеданных месторождений / Медяник Н.Л., Мишурина О.А., Муллина Э.Р., Ершова О.В., Чупрова Л.В. // Успехи современного естествознания. 2016. № 1-0. С. 137–141.
7. Мишурина О.А., Муллина Э.Р. Химические закономерности процесса селективного извлечения марганца из техногенных вод // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2012. № 3. С. 58–62.
8. Рогов В.М. Применение электрокоагуляции-флотации для очистки сточных вод, содержащих высокодисперсные загрязнения: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Новочеркасск, 1973. 19 с.
9. Удаление металлов из сточных вод. Нейтрализация и осаждение: пер с англ./ под ред. Кушни Дж.К. М.: Металлургия, 1987. 176 с.
10. Исследование извлечения меди в барабанном цементаторе / Халезов Б.Д., Ватолин Н.А., Макурин Ю.Н., Быков Н.А. // Горный информационно-аналитический бюллетень. М.: МГГУ, 2005. №5. С. 302–311.
11. Технология электрофлотационного извлечения марганца из техногенного гидроминерального сырья медноколчеданных месторождений Южного Урала / Чантурия В.А., Шадрюнова И.В., Медяник Н.Л., Мишурина О.А. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2010. №3. С. 92–99.
12. Makarov D.V., Svetlov A.V., Goryachev A.A., Masloboev V.A., Minenko V.G., Samusev A.L., Krasavtseva E.A. Mine waters of the mining enterprises of the mumansk region: main pollutants, perspective treatment technologies In the collection: Mine Water: Technological and Ecological Challenges Proceedings of International Mine Water Association Conference. 2019. P. 206–211.
13. Medyanik N.L., Leontieva E.V., Mishurina O.A., Shadrinova I.V. International Journal of Applied Engineering Research. 2018. Vol. 13. №8. P. 6353–6357. Resource potential of stale flotation tails of copper-oxygen ores with and possible gold and silver extraction.
14. Medyanik N.L., Shevelin I.Y., Kakushkin S.N. Mathematical modeling of mineralized industrial wastewater treatment by pressure flotation Journal of Mining Science. 2018. Vol. 54. №2. P. 292–299.
15. Chanturiya E.L., Chanturiya V.A., Ryazantseva M.V., Khabarova I.A., Koporulina E.V. The modification of the physicochemical, adsorption, and flotation properties of tantalite, columbite, zircon, and feldspar under the action of anolyte, an acidic product of water electrolysis in the book: Innovative technologies are key to successful mineral processing Book of Abstracts. 2018. P. 75.

16. Chanturiya V.A., Minenko V.G., Suvorova O.V., Pletneva V.E., Makarov D.V. Electrochemical modification

of saponite for manufacture of ceramic building materials Applied Clay Science. 2017. Vol. 135. P. 199–205.

Поступила 17.09.19

Принята в печать 21.10.19

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-4-10-17>

THE COMPREHENSIVE PROCESSING TECHNOLOGY OF HYDRO-TECHNOGENIC FORMATIONS OF YELLOW COPPER ORE MINING PLANTS

Nadezhda L. Medyanik – DrSc (Eng.), Professor of the Chemistry Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Olga A. Mishurina – PhD (Eng.), Associate Professor of the Chemistry Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Elvira R. Mullina – PhD (Eng.), Associate Professor of the Chemistry Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Anastasiya V. Smirnova – Senior Lecturer of the Chemistry Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Elena V. Zaitseva – PhD (Eng.),

National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russia. E-mail: msmu-prpm@yandex.ru

Abstract. Problem Statement (Relevance): The paper contains the results of the experimental studies on the developed comprehensive processing technology of acid technogenic formations of yellow copper ore mining plants. The authors considered main regularities of the selective extraction of copper, iron and manganese ions from acid mine waters. The paper presents the results of the experimental study on manganese extraction process parameters by the electrochemical deposition of Mn^{2+} ions under the influence of “active chlorine” and subsequent extraction of a forming dispersed phase by an electroflotation method. The authors analyzed the influence of key parameters of the electric deposition and electroflotation processes: pH of solutions, electrode current density, processing time of solutions and a background composition of electrolytes. They also analyzed how cementation process parameters influenced the selectivity and completeness of extraction of copper ions: the pH range; processing time and a ratio of components (copper and iron ions) charged to the cementation unit. The paper considers the factors influencing deposition efficiency of iron ions by an acid-base deposition method. **Objective:** To develop the environment-friendly comprehensive processing technology for acid waste waters of yellow copper ore mining plants to selectively extract manganese in the form of standard raw materials and basic metals (copper and iron), while reducing the manganese concentration in discharges to the maximum allowable concentration norms. **Methods Applied:** Laboratory and field experiments performed on a diaphragmless double-chamber electroflotation unit for solutions and extracted technological products, whose chemical composition was analyzed by photometric determination techniques applied for metal cations and atomic absorption techniques for the products obtained by the technology. The phase composition of the precipitate formed during the process was studied by an X-ray phase analysis on the general-purpose diffractometer with a copper anode DRON-1.

Originality: The developed process flow diagram of acid waste water processing and treatment at yellow copper ore mining plants is used to extract metal ions efficiently and selectively: copper up to 96%, iron up to 84% and manganese up to 99%. **Findings:** We provided a theoretical justification of the manganese selective extraction from acid underspoil waters of yellow copper ore deposits based on a combination of electrocoagulation of Mn (II) by “active chlorine” and subsequent electroflotation extraction of the formed manganese dispersed phase from solutions. We determined the dependences between pH, current density, time and a background composition of electrolytes and the electrocoagulation extraction of Mn^{2+} ions from aqueous solutions in the form of a dispersed phase. The phase composition of the formed dispersed phase was established: compounds of $MnO(OH)_2$ and $MnO(OH)$ types (86%), and $Mn(OH)SO_4$, $Mn(OH)CO_3$, $Mn(OH)SO_4(H_2O)_2$ (14%). We proposed the mechanism of electroflotation extraction of the dispersed phase $MnO(OH)$ and $MnO(OH)_2$ from aqueous solutions. It consists in the electrostatic formation of the flotation complex: “dispersed phase (+) – bubble (H_2)”. **Practical Relevance:** The results of the research can be useful for industrial plants processing dispersed water systems to extract and concentrate valuable components.

Keywords: technology, process parameters, extraction, technological products, copper, iron, manganese.

References

1. Abdrakhmanov V.F., Popov V.G. Geochemical features of underground waters of the Southern Urals. *Geologicheskii sbornik* [Geological collection], 2008, no. 7, pp. 219–232. (In Russ.)
2. Belan L.N. The ecological and geochemical condition of the mining districts of the Bashkir Trans-Urals region. *Vestnik OGU* [Vestnik of Orenburg State University], 2005, no. 6, pp. 113–117. (In Russ.)
3. Vorobyev A.E., Shchelkin A.A., Tushev O.V. Processing of manganese raw materials by sulfate production wastes.

- GIAB [Mining informational and analytical bulletin], 1998, no.3, p. 10. (In Russ.)
4. Voropanova L.A. *Teoriya, metody i praktika izvlecheniya tsvetnykh metallov iz slabokontsentrirrovannykh rastvorov pri kompleksnoy pererabotke rud*. Diss. dokt. tekhn. nauk [The theory, methods and practice of extraction of non-ferrous metals from low-concentrated solutions during comprehensive ore processing. Thesis of DrSc (Eng.)]. Vladikavkaz, 2003, 365 p.
 5. Zainullin Kh.N., Galimova E.Zh. Assessment of the impact of wastes and water waters of the Buribay mine administration on pollution of the Tanalyk River. *Ekologicheskie problemy promyshlennykh zon Urala: sb. nauch. tr. Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Environmental problems of industrial zones of the Urals: collection of scientific papers of the International Scientific and Technical Conference]. Magnitogorsk, 1998, vol. 1, pp. 137–142. (In Russ.)
 6. Medyanik N.L., Mishurina O.A., Mullina E.R., Ershova O.V., Chuprova L.V. On the influence of technogenesis on the chemical composition of hydrotechnogenic formations on the territory of ore mining and processing plants on yellow copper ore deposits. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* [Achievements of modern natural sciences], 2016, no. 10, pp. 137–141. (In Russ.)
 7. Mishurina O.A., Mullina E.R. Chemical laws of process of the manganese selective extraction from technogenic water. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2012, no. 3, pp. 58–62. (In Russ.)
 8. Rogov V.M. *Primenenie elektrokoagulyatsii-flotatsii dlya ochkistki stochnykh vod, soderzhashchikh vysokodispersnye zagryazneniya: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Application of electrocoagulation and flotation for the treatment of wastewater containing highly dispersive contamination. Abstract of the thesis of Cand. Sci. (Eng.)]. Novocherkassk, 1973, 19 p.
 9. Cushnie G.C. Removal of metals from wastewater: neutralization and precipitation. Moscow: Metallurgy, 1987, 176 p. (In Russ.)
 10. Khalezov B.D., Vatolin N.A., Makurin Yu.N., Bykov N.A. Research of the copper extraction in a drum cementation unit. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy bulletin* [Mining informational and analytical bulletin]. Moscow: MGGU, 2005, no. 5, pp. 302–311. (In Russ.)
 11. Chanturiya V.A., Shadrunkova I.V., Medyanik N.L., Mishurina O.A. Technology of the manganese electroflotation extraction from technogenic hydromineral raw materials of yellow copper ore deposits of the Southern Urals. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh* [Physical and technical difficulties of mining], 2010, no. 3, pp. 92–99. (In Russ.)
 12. Makarov D.V., Svetlov A.V., Goryachev A.A., Masloboev V.A., Minenko V.G., Samusev A.L., Krasavtseva E.A. Mine waters of the mining enterprises of the Murmansk region: main pollutants, perspective treatment technologies. Mine Water: Technological and Ecological Challenges, Proceedings of the International Mine Water Association Conference, 2019, pp. 206–211.
 13. Medyanik N.L., Leontieva E.V., Mishurina O.A., Shadrunkova I.V. Resource potential of stale flotation tails of copper-oxygen ores with and possible gold and silver extraction. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2018, vol. 13, no. 8, pp. 6353–6357.
 14. Medyanik N.L., Shevelin I.Y., Kakushkin S.N. Mathematical modeling of mineralized industrial wastewater treatment by pressure flotation. *Journal of Mining Science*, 2018, vol. 54, no. 2, pp. 292–299.
 15. Chanturiya E.L., Chanturiya V.A., Ryazantseva M.V., Khabarova I.A., Koporulina E.V. The modification of the physicochemical, adsorption, and flotation properties of tantalite, columbite, zircon, and feldspar under the action of anolyte, an acidic product of water electrolysis. Innovative technologies are key to successful mineral processing. Book of Abstracts, 2018, p. 75.
 16. Chanturiya V.A., Minenko V.G., Suvorova O.V., Pletneva V.E., Makarov D.V. Electrochemical modification of saponite for manufacture of ceramic building materials. *Applied Clay Science*, 2017, vol. 135, pp. 199–205.

Received 17/09/19

Accepted 21/10/19

Образец для цитирования

Технология комплексной переработки гидротехногенных образований горных предприятий медноколчеданного профиля / Медяник Н.Л., Мишурина О.А., Мулина Э.Р., Смирнова А.В., Зайцева Е.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т.17. №4. С. 10–17. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-4-10-17>

For citation

Medyanik N.L., Mishurina O.A., Mullina E.R., Smirnova A.V., Zaitseva E.V. The Comprehensive Processing Technology of Hydro-Technogenic Formations of Yellow Copper ore Mining Plants. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2019, vol. 17, no. 4, pp. 10–17. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-4-10-17>

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.9.01:539.3

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-4-18-24>

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ВНЕЦЕНТРЕННОЙ УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА СЕРПОВИДНОСТЬ УГЛЕРОДИСТОЙ ЛЕНТЫ

Конев С.В.¹, Миянов А.Г.², Файнштейн А.С.¹, Харченко М.В.¹¹Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия²Уральская металлообрабатывающая компания, Магнитогорск, Россия

Аннотация. Постановка задачи. В процессе изготовления высокопрочной упаковочной ленты может быть получен дефект «серповидная лента». Известно, что дефект серповидности обусловлен различием в натяжении параллельно идущих полос ленты в выполняемых технологических операциях. **Используемые методы.** На участках между валковым натяжителем и печью (до термообработки) и после ванны водяного охлаждения (после термообработки) производственной линии ООО «Уральская металлообрабатывающая компания» проведены замеры величины серповидности ленты, выявившие повышенную величину дефекта. Статистическим анализом величины дефекта, при большой (≥ 100) выборке замеров серповидности ленты двух типоразмеров, подтверждено, что дополнительной причиной возникновения серповидной ленты является термическая обработка ленты путем патентования в свинцовой ванне. Предположено, что механизмом образования серповидности при термообработке ленты является внеосевое упруго-пластическое растяжение ленты. Внеосевое растяжение образуется при действии на кромки ленты сил трения при взаимодействии кромок ленты со стенками направляющего калибра ролика, погруженного в свинцовую ванну. В результате появляется дополнительный силовой фактор – изгибающий момент. Анализом напряженно-деформированного состояния ленты при внеосевом растяжении определена схема силовых параметров, влияющих на серповидность ленты при термообработке. Рассчитано напряженно-деформированное состояние ленты в упругой зоне, что позволило установить границы зон пластической деформации. Выявлены зависимости критической кривизны ленты от нескольких параметров – ширины и толщины ленты, натяжения и температуры ленты. Установлены критерии, определяющие начало пластической деформации по кромкам ленты. Установлено, что при увеличении натяжения кривизна ленты может быть уменьшена на 13–30%. **Результаты.** Статистическим анализом установлено влияние на серповидность ленты операции патентования. Определена схема силовых параметров и рассчитано напряженно-деформированное состояние ленты. Определены критерии, определяющие начало пластической деформации и показана возможность существенного снижения кривизны.

Ключевые слова: высокоуглеродистая лента, серповидность, кривизна, упругие и пластические зоны деформации, трение на кромках ленты.

Введение

В процессе изготовления высокопрочной упаковочной ленты (ВУЛ) шириной 12–32 мм и толщиной 0,5–1,0 мм на технологической линии предприятия ООО «Уральская металлообрабатывающая компания» (рис. 1–2) наблюдается появление дефекта «серповидность».

По ТУ 24.32.10–011–94835001–2017 и EN 13246:2001 серповидность ленты должна составлять не более 10 мм на 2 м длины. По ASTM D3959–15 серповидность ленты не должна превышать 12 мм на любом участке длиной 2,4 м.

Считается [1,2], что появление серповидности

обусловлено тем, что разрезаемая исходная рулонная лента имеет некоторую разнотолщинность по ширине, в результате чего отличается длина порезанных наматываемых полос. Это приводит к различию в натяжении параллельно идущих полос ленты в последующих технологических операциях.

Разница в натяжении смежных полос ленты при резке приводит к подвижности менее натянутых полос, трению кромок ленты о направляющие и, как следствие, искривлению ленты. Для предотвращения серповидности ленты на этом этапе установлен валковый натяжитель, состоящий из 16 отдельных роликов с отдельными нажимными роликами.

© Конев С.В., Миянов А.Г., Файнштейн А.С., Харченко М.В., 2019

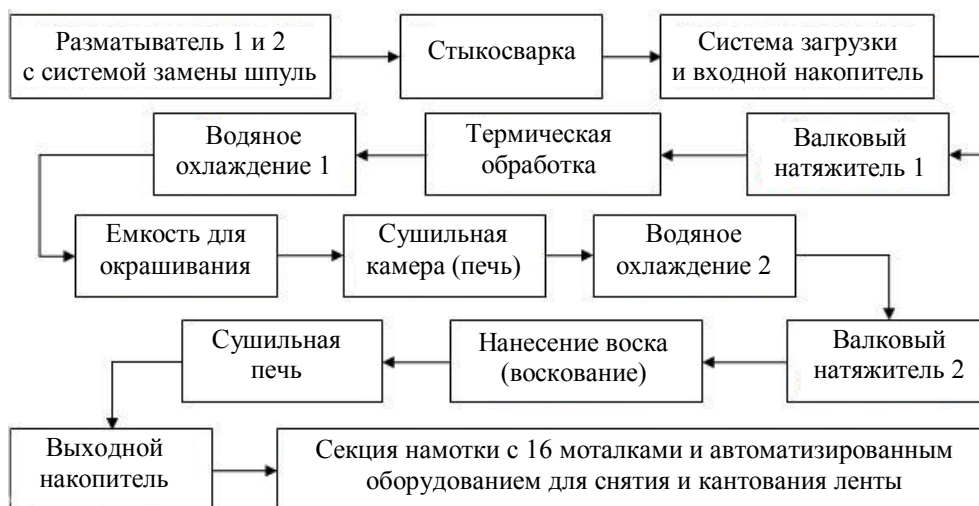


Рис. 1. Технология изготовления ВУЛ

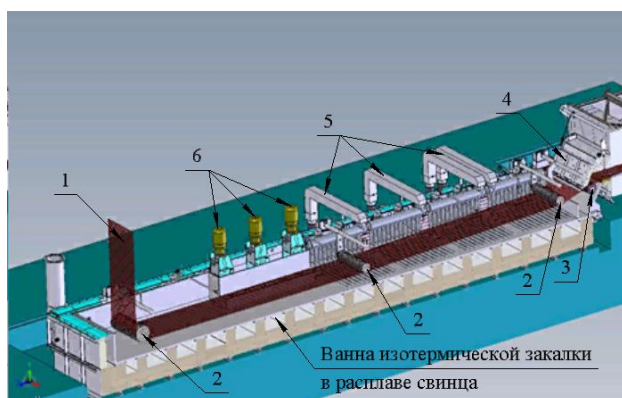


Рис. 2. Часть линии изготовления ВУЛ:

1 – лента; 2 – погружные опорные ролики, направляющие ленту в расплаве свинца; 3 – отклоняющий ролик между печью и ванной изотермической закалки; 4 – заслонка кожуха между печью и ванной изотермической закалки; 5 – система воздушного охлаждения свинца; 6 – погружные насосы для перемешивания расплава свинца

В упомянутых источниках также отмечается, что, помимо разнотолщинности заготовки, дополнительными факторами, влияющими на появление дефекта «серповидность ленты», является состояние и настройка инструмента продольной резки исходной рулонной ленты. Вместе с тем авторами отмечено появление новых очагов серповидности, а также увеличение серповидности ленты после ее термической обработки (ванна изотермической закалки в расплаве свинца и погружной ролик, направляющий ленту, показаны на **рис. 3**). Поскольку увеличенная серповидность может привести к замечаниям потребителей, необходимо проанализировать и изучить процесс деформирования ленты при ее термообработке.

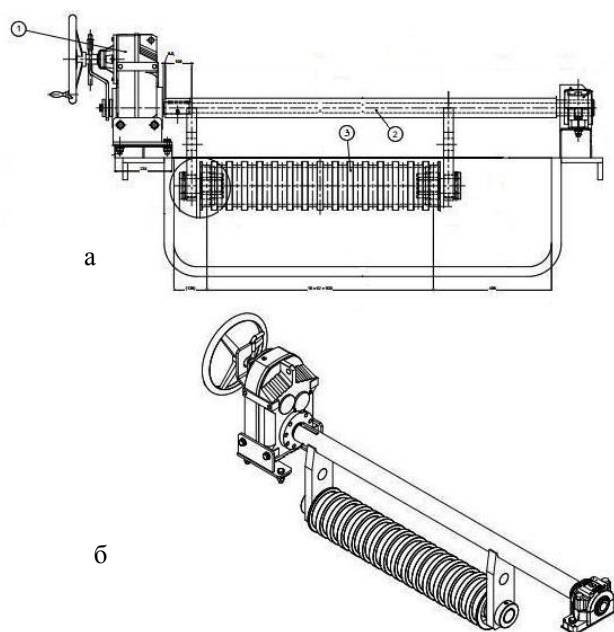


Рис. 3. Ванна изотермической выдержки (а) и направляющий ролик (б): 1 – механизм управления роликом; 2 – несущая ось; 3 – ролик

Основная часть

Авторами произведен статистический анализ величины дефекта или его усиления в процессе термической обработки по методике [3–7]. Была проведена большая (≥ 100) выборка замеров серповидности ленты двух типоразмеров по ГОСТ 26877. Для измерения серповидности на ленте намечали участки длиной 2 м. Серповидность ленты определяли как наибольшее отклонение между поверхностью кромки ленты и приложенной прецизионно плоской поверхности без скруток и перегибов. Замеры отклонения (зазора)

производили щупами без удаления отмеченного участка ленты в процессе остановок линии на участках между валковым натяжителем 1 и печью (до термообработки) и после ванны водяного охлаждения 1 (после термообработки).

Определено, что при уровне значимости 0.05 данные наблюдения не противоречат гипотезе о нормальном распределении приращений серповидности. Были построены гистограммы частот (рис. 4). Как видно из гистограмм, наличие появления и усиление дефекта. Максимально частое усиление дефекта составляло 0,8–1,1 и 0,9–1,5 мм (для лент с сечением 15,9×0,5 и 19,1×0,5 мм соответственно), что могло в совокупности с ранее полученной серповидностью привести (и приводило) к превышению допустимых по ТУ или договору с потребителем значений.

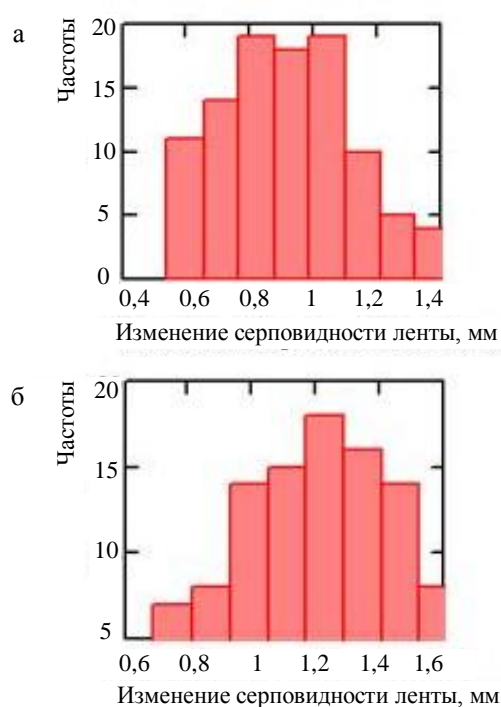


Рис. 4. Гистограммы изменений серповидности ленты: сечением 15,9×0,5 мм (а); сечением 19,1×0,5 мм (б)

Полученные опытные данные выявили необходимость анализа напряженно-деформированного состояния ленты. Схема граничных условий нагружения ленты, как равномерно движущегося призматического стержня, представлена на рис. 5.

На рис. 5,а представлена технологически схема правильного движения стержня. На рис. 5,б показано появление сил трения f ленты о боковые грани калибра погружного направляющего ролика (см. рис. 3), вызванное, в том числе, невиди-

мыми оператору наростами, образующимися за счет свинца и тетраоксида трисвинца [8] в ванне изотермической закалки.

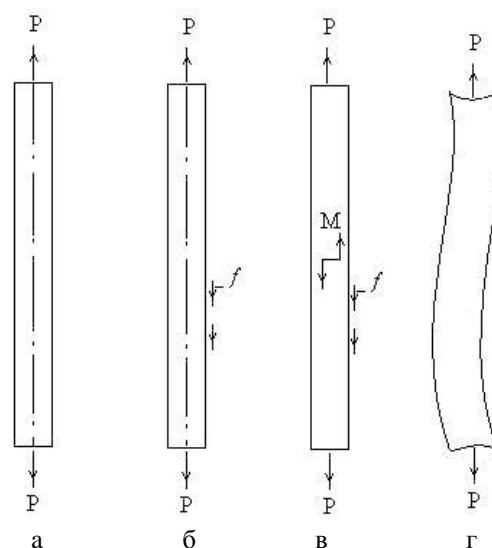


Рис. 5. Схемы нагружения ленты как стержня: а – осевое нагружение; б – нагружение с трением по кромке; в – уравновешенная схема; г – схема деформации ленты

Поскольку схема по рис. 5,б не уравновешена, то, исходя из условия равновесия ленты, к ней необходимо добавить уравновешивающий момент M (рис. 5,в). Этот дополнительный момент образуется внутренними усилиями в ленте. Такой случай нагружения твердого тела, сочетающий напряжения осевой и изгибной деформаций, называется внецентренным нагружением [9–12]. Изгибающий момент, действующий в плоскости ленты, приводит к появлению серповидности (рис. 5,г).

При расчете стержня на внецентренное упругое сжатие определяют предельно допускаемые нагрузки, исключаяющие поломку стержня от совместного действия осевых и изгибных деформаций, а также положение ядра поперечного сечения. На внецентренное растяжение стержня, как правило, не рассчитываются, поскольку в подавляющем большинстве случаев они являются элементами строительных конструкций, подвергаемых сжатию вплоть до потери устойчивости. При обработке металлов давлением можно отметить случаи продольного сжатия стержневой части формируемого изделия, находящегося в пластическом состоянии, например, при прокатке или волочении с подпором [13,14].

При внецентренном растяжении ленты пластическая деформация, в первую очередь, затро-

нет части поперечного сечения в точках вблизи кромок ленты [15,16].

Для численного анализа образующегося дефекта рассмотрим схему нагружения ленты с размерами поперечного сечения $b \times h$ (b – ширина ленты, h – толщина ленты) силами, приложенными к ленте, как на **рис. 6**. В поперечных сечениях ленты будет действовать изгибающий момент M , определяемый из условия равновесия ленты:

$$M = \frac{fNb}{2}, \quad (1)$$

где f – коэффициент трения трущихся поверхностей ленты и покрытого отложениями свинца ручья направляющего ролика, по некоторым данным, имеющий значение до 0,43 [17]; N – сила прижима ленты к поверхности ручья ролика (сила N определяется по натяжению P , создаваемому намоточным устройством и расстоянию между осью намоточного устройства и осью погружного ролика).

Напряжения в крайних волокнах ленты от изгибающего момента будут равны

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{12M}{hb^3}, \quad (2)$$

где W – момент сопротивления сечения ленты.

Как отмечалось выше, эти напряжения в растянутой зоне ленты суммируются с напряжениями от натяжения P . Чтобы материал ленты оставался в зоне упругих деформаций, суммарное напряжение не должно превышать предела текучести σ_T материала ленты:

$$\sigma_{\Sigma} = \frac{12M}{hb^3} + \frac{P}{bh} \leq \sigma_T. \quad (3)$$

Найдем расстояние e (см. **рис. 6**) от края ленты, вдоль которого действует сила трения $F_{тр}=fN$, до линии, параллельной оси ленты, вдоль которой суммарное напряжение будет равно нулю (до нейтрального слоя ленты). Это расстояние равно [18] половине ширины ленты плюс отрезок

$$e_0 = \frac{2i^2}{b}, \quad \text{то есть}$$

$$e = \frac{b}{2} + \frac{2i^2}{b}, \quad (4)$$

где i – радиус инерции сечения ленты, $i = \sqrt{\frac{I}{A}}$ (I – момент инерции сечения ленты, A – площадь поперечного сечения ленты).

По мере роста деформаций, появляющееся в крайних волокнах пластическое состояние охватывает все большее количество материала. Граница между упругой и пластической зонами постепенно приближается к нейтральному слою, который меняет свое положение.

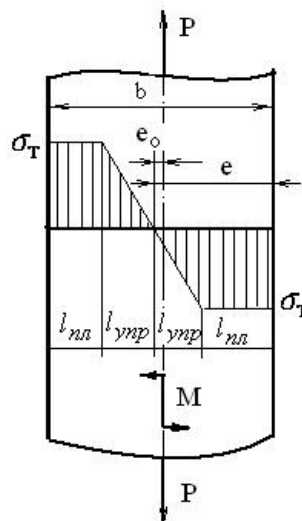


Рис. 6. Упругие и пластические зоны деформации ленты

Определим теперь геометрические характеристики изогнутой ленты (критическую кривизну ленты, величину стрелы изгиба), которые при рассматриваемой схеме деформации приведут к пластической деформации кромок.

Радиус кривизны найдем из выражения

$$\sigma_{\max} = E\varepsilon_{\max} + \frac{P}{bh} = E \frac{y_{\max}}{\rho} + \frac{P}{bh} = E \frac{b}{2\rho} + \frac{P}{bh} + \sigma_T,$$

получив

$$\rho = \frac{Eb}{2(\sigma_T - \frac{P}{bh})}. \quad (5)$$

Для определения предельной стрелы изгиба ленты (локальной серповидности ленты на длине l , в общем случае не совпадающей с базовой длиной для замера серповидности) воспользуемся стандартными таблицами [19], считая, что оба края изогнутого участка ленты жестко заделаны в саму ленту:

$$f_{\max} = \frac{Ml^2}{216EI}, \quad (6)$$

где l – длина изогнутого участка ленты; E – модуль упругости стали; $I = \frac{hb^3}{12}$ – момент инерции сечения ленты при изгибе в плоскости ленты.

Графики зависимости критической кривизны ленты $1/\rho$ от ряда параметров – ширины ленты, тянущего усилия, действующего на ленту, температуры ленты в свинцовой ванне, определяемой скоростью прохождения ленты через ванну (в зависимости от сортамента ленты, составляющей 20–35 м/мин), показаны на **рис. 7–8**. При построении графиков использованы данные по пластичности углеродистой стали, приведенные в [20].

Как видно из графиков, тянущее усилие препятствует образованию кривизны ленты. Так, из **рис. 7** видно, что увеличение тянущего усилия с 0,5 до 2,5 кН снижает кривизну ленты толщиной 1 мм с 0,65 до 0,45 м^{-1} , при ширине ленты 10 мм, и от 0,23 до 0,20 м^{-1} при ширине ленты 30 мм. При более высоких температурах термообработки (см. **рис. 8**) снижение кривизны еще более выражено. Таким образом, кривизна ленты может быть снижена на 13–30% повышением тянущего усилия при приемлемых температурных режимах патентирования. Полученные результаты подтверждаются публикацией [21].

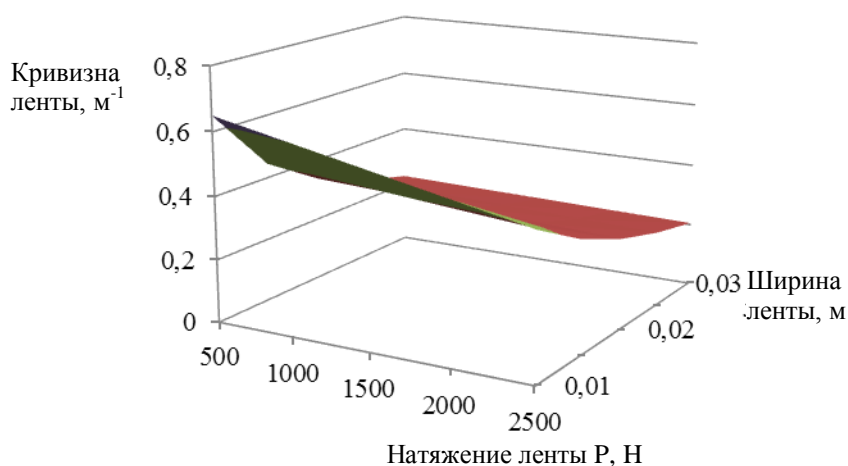


Рис. 7. Зависимость кривизны ленты от ее ширины и тянущего усилия при толщине ленты 1 мм (при температуре ленты 400°C)

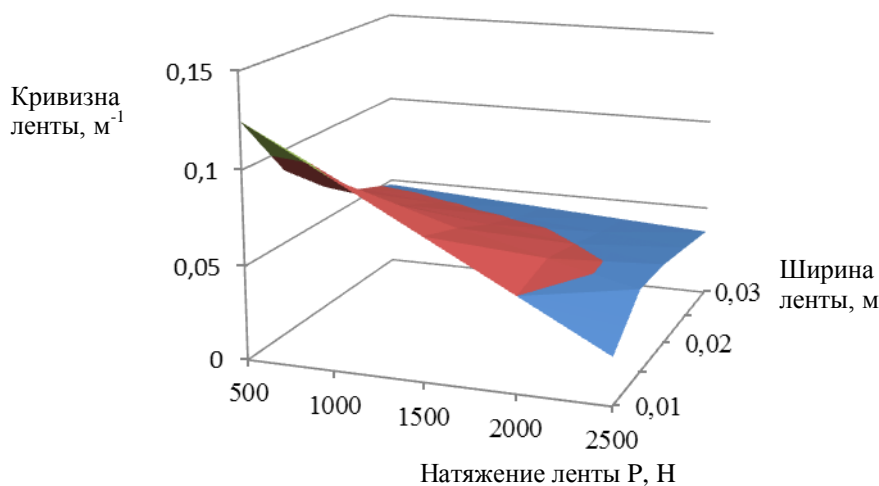


Рис. 8. Зависимость кривизны ленты от ее ширины и тянущего усилия при толщине ленты 0,5 мм (при температуре ленты 440°C)

Выводы:

1. Статистическим анализом установлено влияние на серповидность углеродистой ленты операции патентирования высокоуглеродистой ленты с использованием ванны изотермической закалки с расплавом свинца.

2. Определена схема силовых параметров, влияющих на серповидность ленты при термообработке и рассчитано напряженно-деформированное состояние ленты в упругой зоне, что позволило установить границы зон пластической деформации.

3. Определены критерии начала пластической деформации по кромкам ленты. Установлено, что увеличением натяжения можно уменьшить кривизну ленты на 13–30%.

Список литературы

- Куницын Г.А. Повышение точности процесса холодной прокатки ленты из подката клиновидного поперечного сечения: дис. ... канд. техн. наук. Магнитогорск, 2000. 130 с.
- Максимов Е.А. Взаимосвязь критериев и частные показатели плоскостности и серповидности листового проката // Изв. вузов. Черная металлургия. 2012. №6 С. 6–10.
- Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высш. школа, 2003. 480 с.
- Кацман А.Ю. Статистическая обработка экспериментальных данных. Томск: Изд-во Томского политех. ун-та, 2008. 38 с.
- Grinstead C.M., Snell J.L. Introduction to Probability. Dartmouth College, 2016. 520 p.
- Evans M.J., Rosenthal J.S. Probability and Statistics. University of Toronto, 2015. 773 p.
- Pishro-Nik H. Introduction to probability, statistics and random processes. Kappa Research, 2014. 654 p.
- <http://www.xumuk.ru/encyklopedia/2/3982.html>
- Беляев Н.М. Сопротивление материалов: учеб. пособие. 15 изд., перераб. М.: Альянс, 2014. 607 с.
- Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости / под ред. Г.С. Шапиро. 2-е изд. М.: Наука, 1979. 560 с.
- Love A.E. A Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity. Cambridge University Press, 2016. 350 p.
- Gould P.L., Feng Y. Introduction to Linear Elasticity. Springer, 2019. 384 p.
- Харитонов В.А., Таранин И.В. Сравнительный анализ эффективности совмещенных способов обработки металлов давлением при производстве проволоки // Сталь. 2015. №1. С. 61–64.
- Довженко Н.Н., Довженко И.Н., Сидельников С.Б. Энергосиловые параметры процесса совмещенной прокатки-прессования // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2005. №4. С. 54–61.
- Гастев В. А. Краткий курс сопротивления материалов. М.: Наука, 1977. 456 с.
- Анализ особенностей напряженного состояния фланца намоточного устройства как кольцевой пластины / Конев С.В., Михайлец В.Ф., Тефтелев И.Е., Файнштейн А.С. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т. 16. №3. С. 98–102.
- <http://tehtab.ru/guide/guidephysics/friction/frictiontovariousspairs/>
- Тергулов И.Г. Сопротивление материалов и основы теории упругости и пластичности. М.: Высш. шк., 1984. 472 с.
- <http://doctorlom.com/item230.html>
- Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. 3 изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1971. 424 с.
- Пат. №2463122 РФ, МПК В21D 1/02. Способ правки полосы: заявл. 16.12.2010; опубл.10.10.2012 / Гринавцев В.Н., Гринавцев О.В.

Поступила 06.09.19

Принята в печать 08.10.19

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-4-18-24>**ANALYSIS OF THE EFFECT OF OFF-CENTER ELASTIC-PLASTIC DEFORMATION ON THE CARBON STRAP CAMBER**

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

Andrei G. Miyanov – Engineer
LLC Ural Metalworking Company, Magnitogorsk, Russia

Aleksandr S. Fainshtein – PhD (Phys. and Math.), Associate Professor
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: swetlana@mgn.ru

Maksim V. Kharchenko – PhD (Eng.), Associate Professor
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: kharchenko.mv@bk.ru

Abstract. Problem Statement. When manufacturing high-strength steel strap on the production line of LLC Ural Metalworking Company, the strap camber defect may occur. It is known that the camber defect is caused by a difference in the tension of parallel strips of the strap

in the performed technological operations. **Methods Applied.** In the areas between the roller tensioner and the furnace (before heat treatment) and after the water cooling bath (after heat treatment) on the production line of LLC Ural Metalworking Company, the strap camber val-

ue was measured, revealing an increased value of the defect. The statistical analysis of the defect value, with a large (≥ 100) sample of measurements of crescent tape of two sizes, confirmed that an additional cause of the defect values, at high (≥ 100) sampling of measured straps of two types and sizes, proved that an additional reason for strap camber was heat treatment by patenting in a lead bath. It is assumed that the camber is formed during the heat treatment as a result of the off-axis elastic-plastic strain of the strap. Off-axis strain is formed by friction forces acting on the strap edges, when the strap edges interact with the walls of the guide gauge roller immersed in the lead bath. As a result, there is an additional force factor - bending moment. The analysis of the stress-strain state of the strap at off-axis strain determines the scheme of force parameters affecting the strap camber during heat treatment. The stress-strain state of the strap in the elastic zone was calculated, which allowed us to establish the boundaries of plastic deformation zones. We found the dependence between the critical strap curvature and several parameters, namely strap width and thickness, strap tension and temperature. The criteria determining the beginning of plastic deformation along the strap edges of the tape were determined. It was found that by increasing tension, the strap camber may be reduced by 13–30%.

Results. The statistical analysis established the influence of patenting operations on the strap camber. The scheme of force parameters was determined and the stress-strain state of the strap was calculated. The criteria determining the beginning of plastic deformation were determined and a possible significant decrease in camber was shown.

Keywords: high-carbon strap, camber, curvature, elastic and plastic deformation zones, friction on the strap edges.

References

1. Kunitsyn G.A. *Povyshenie tochnosti protsessy kholodnoy prokatki lenty iz podkata klinovidnogo poperechnogo secheniya. Diss. kand. tekhn. nauk* [Improving the accuracy of the cold rolling process of narrow strips from semi-finished products with a wedge-shaped cross section. PhD thesis]. Magnitogorsk, 2000. 130 p.
2. Maksimov E.A. Relationship of criteria and partial indicators of flatness and camber of the rolled sheet. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*. [Izvestiya. Ferrous metallurgy], 2012, no. 6, pp. 6–10. (In Russ.)
3. Gmurman V.E. *Teoriya veroyatnostei i matematicheskaya statistika* [Probability theory and mathematical statistics]. Moscow: Higher school, 2003, 480 p. (In Russ.)
4. Katsman A.Yu. *Statisticheskaya obrabotka eksperimentalnykh dannykh* [Statistical processing of experimental data]. Tomsk: Tomsk Polytechnic University, 2008, 38 p. (In Russ.)
5. Grinstead C.M., Snell J.L. *Introduction to probability*. Dartmouth College, 2016, 520 p.
6. Evans M.J., Rosenthal J.S. *Probability and statistics*. University of Toronto, 2015, 773 p.
7. Pishro-Nik H. *Introduction to probability, statistics and random processes*. Kappa Research, 2014, 654 p.
8. <http://www.xumuk.ru/encyklopedia/2/3982.html>
9. Belyaev N.M. *Soprotivlenie materialov: ucheb. posobie* [Strength of materials: teaching aid]. 15th ed., revised. Moscow: Alliance, 2014, 607 p. (In Russ.)
10. Timoshenko S.P., Gudier J. *Teoriya uprugosti* [Theory of elasticity]. Edited by G.S. Shapiro. 2nd ed. Moscow: Science, 1979, 560 p. (In Russ.)
11. Love A.E. *A Treatise on the mathematical theory of elasticity*. Cambridge University Press, 2016, 350 p.
12. Gould P.L., Feng Y. *Introduction to linear elasticity*. Springer, 2019, 384 p.
13. Kharitonov V.A., Taranin I.V. A comparative analysis of the efficiency of combined methods of metal forming in wire manufacturing. *Stal* [Steel], 2015, no. 1, pp. 61–64. (In Russ.)
14. Dovzhenko N.N., Dovzhenko I.N., Sidelnikov S.B. Power parameters of the combined rolling-press forming process. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2005, no. 4, pp. 54–61. (In Russ.)
15. Gastev V.A. *Kratkii kurs soprotivleniya materialov* [Brief course on strength of materials]. Moscow: Science, 1977, 456 p. (In Russ.)
16. Konev S.V., Mikhalets V.F., Tefteliev I.E., Fainshtein A.S. Analysis of the features of the stress state of a coiler flange as an annular plate. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2018, vol. 16, no. 3, pp. 98–102. (In Russ.)
17. <http://tehtab.ru/guide/guidephysics/friction/frictiontovarioustairs/>
18. Teregulov I.G. *Soprotivlenie materialov i osnovy teorii uprugosti i plastichnosti* [Resistance of materials and fundamentals of the theory of elasticity and plasticity]. Moscow: Higher school, 1984, 472 p. (In Russ.)
19. <http://doctorlom.com/item230.html>
20. Storozhev M.V., Popov E.A. *Teoriya obrabotki metallov davleniem* [Theory of metal forming]. 3rd ed., revised and supplemented. Moscow: Mashinostroenie, 1971, 424 p. (In Russ.)
21. Grinavtsev V.N., Grinavtsev O.V. *Sposob pravki polosy* [Method of strip leveling]. Patent RF. IPC B21D 1/02 No. 2463122. Applied: 16.12.2010. Published: 10.10.2012. Bulletin No. 31.

Received 06/09/19

Accepted 08/10/19

Образец для цитирования

Анализ влияния внецентренной упруго-пластической деформации на серповидность углеродистой ленты / Конев С.В., Миянов А.Г., Файнштейн А.С., Харченко М.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т.17. №4. С. 18–24. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-4-18-24>

For citation

Konev S.V., Miyanov A.G., Fainshtein A.S., Kharchenko M.V. Analysis of the Effect of Off-Center Elastic-Plastic Deformation on the Carbon Strap Camber. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2019, vol. 17, no. 4, pp. 18–24. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-4-18-24>

ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

УДК 621.762.002.68

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-4-25-33>

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ. Часть I. Анализ современного состояния технологий

Троценко И.Г., Герасименко Т.Е., Мешков Е.И.

Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), Владикавказ, Россия

Аннотация. Постановка задачи: в статье приведен анализ современного состояния технологий переработки отходов твердых сплавов, а также обозначены сравнительные технические параметры различных способов реализации переработки, включая способ, разработанный на кафедре металлургии цветных металлов и автоматизации металлургических процессов ФГБОУ ВО СКГМИ (ГТУ). **Цель работы:** выявление наиболее эффективного и экономичного способа переработки отходов твердых сплавов. **Новизна:** авторами статьи проанализировано значительное количество патентной и научно-технической информации, а также опыт практической реализации технологий переработки отходов твердых сплавов, и с учетом недостатков этих способов, была разработана технология переработки и оборудование для ее реализации, защищенные патентами РФ на изобретение. **Результат:** разработанная технология позволяет полностью деструктурировать твердый сплав быстрее всех известных аналогов с минимальными затратами электроэнергии. **Практическая значимость:** использование технологии в нашей стране позволит снизить экономическую и сырьевую зависимости от других государств, а именно от Китая, в результате многократной переработки отходов, а также способствует сохранению природного ландшафта в результате вторичной многократной переработки.

Ключевые слова: твердые сплавы, утилизация, деструкция, технологии переработки отходов.

Введение

Спеченные твердые сплавы применяют для производства режущего и бурового инструмента [1], который широко используется в горнодобывающей промышленности. Широкое применение твердых сплавов обусловлено их свойствами, а именно высокой твердостью, прочностью и износостойкостью и способностью сохранять эти свойства при температуре 900–1150°C. Спеченные твердые сплавы представляют собой композиции из высокотвердых, мелкозернистых тугоплавких карбидов вольфрама, титана, тантала, цементированных пластичным металлом, например кобальтом, имеющим меньшую температуру плавления по сравнению с карбидами. Кобальт является нейтральным элементом по отношению к углероду, не способным образовывать карбиды и не разрушающим карбиды других элементов. Спеченные твердые сплавы получают методами порошковой металлургии. Данный способ даёт высокую точность изготовления получаемой продукции и обеспечивает высокие значения различных свойств. Изделия,

произведенные методами порошковой металлургии, требуют минимальной механической обработки, поэтому они обрабатываются шлифованием или физико-химическими методами (лазером, ультразвуком, травлением в кислотах и др.). Наиболее распространенными представителями указанной группы являются сплавы ВК, например ВК8, ВК10 и ВК20, а также ТК и ТТК, изготовленные на основе карбида вольфрама.

При использовании в промышленности продукции из твердых сплавов в качестве режущего инструмента происходит его износ на небольшую величину, порядка 15–20%. Оставшаяся часть (80–85%) является весьма ценным вторичным вольфрамовым сырьем, сбор и переработка которого позволит сократить добычу вольфрамового сырья, сохранить природный ландшафт и снизить негативное воздействие на окружающую среду в связи с уменьшением площади разработки месторождений.

Материалы и методы исследования

Запасы разрабатываемых и осваиваемых месторождений вольфрамовых руд в Российской Федерации, учитываемые Государственным ба-

© Троценко И. Г., Герасименко Т.Е., Мешков Е.И., 2019

лансом запасов полезных ископаемых, составляют более 300 тыс. т (категорий $A+B+C_1+C_2$) в пересчёте на триоксид вольфрама, что позволяет стране занимать третье место в мире после Китая и Казахстана по размерам сырьевой базы металла [2, 3]. Однако доля производства концентратов в мировом показателе составляет порядка 3,6%. Лидером в вольфрамодобывающей отрасли традиционно является Китай, обеспечивая более 80% мировой добычи.

Согласно прогнозу агентства Argus, мировое потребление цементированного карбида вольфрама ежегодно будет увеличиваться в среднем на 3,5% за счет роста потребления в горнодобывающей и автомобильной промышленности [4]. Увеличение спроса на вольфрам приводит к сокращению запасов вольфрамового сырья и в нашей стране порядка 3,3 тыс. т в год. Причем по данным источников [2, 3] Россия традиционно является экспортером вольфрамового сырья. В 2016 году экспорт превысил импорт более чем на 4 тыс. т, а в 2017 году – почти на 500 т.

Возможности увеличения сырьевой базы вольфрама в нашей стране невелики. Прогноз ресурсов по частично разведанным месторождениям и по обнаруженным, но еще не разведанным месторождениям (категории Р), в шесть раз меньше запасов. Почти пятая их часть распределена между мелкими объектами с ресурсами этой категории менее 10 тыс. т триоксида вольфрама. При обеспеченности запасами вольфрама, оцениваемыми более чем в 300 лет, сохранение его добычи на уровне 2017 г. уже через пять лет приведет к истощению запасов крупнейших российских месторождений, содержащих наиболее качественные руды. Это может означать более чем двукратное падение производства вольфрамового сырья в России. Поэтому остро встает вопрос компенсации выбывающих мощностей.

В связи с этим существует необходимость использования отходов, которые образуются как в производстве твердых сплавов, так и при эксплуатации изделий из твердых сплавов в промышленности. Данные отходы являются вторичным сырьем, позволяющим значительно снизить материальные и энергетические затраты по сравнению с переработкой природного сырья. Относительное количество отходов твердых сплавов, возвращаемых после использования в промышленности на переработку, составляет 30–85% [5]. Кроме того, в процессе производства твердосплавной продукции выпускаются изделия, эксплуатационные и режущие свойства которых не соответствуют стандартным образцам. Такие изделия бракуются и направляются на переработку.

Разработками в области утилизации отходов твердых сплавов активно занимались как советские, а затем российские ученые, так и специалисты зарубежных стран [6–11], которые и по сей день продолжают совершенствовать технику и технологию процесса переработки твердосплавных изделий [12–23]. Причем рост цен на вольфрам является весомым аргументом для организации сбора, возврата отходов твердых сплавов и последующей их переработки в качестве вторичного ценного вольфрамово-кобальтового сырья. В настоящее время стоимость 1 кг вольфрама (Китай) на мировом рынке достаточно высока и составляет в 2019 году ~50 дол. США/кг.

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ источников информации [6–23] показал, что существующие технологии переработки отходов твердых сплавов имеют повышенные энергетические затраты и продолжительны по времени, что обуславливает их низкую производительность. В связи с этим реализация технологии, позволяющей снизить себестоимость переработки отходов твердосплавных изделий, временные, материальные и энергетические затраты по сравнению с известными аналогами, а также переработкой природного сырья, является актуальной задачей порошковой металлургии.

Известен способ переработки отходов твердых сплавов, который основан на химико-металлургических процессах. В этом способе кусковые отходы сплавляют с селитрой. Полученный спек выщелачивают, промывают и обрабатывают аммонийными соединениями. Образующиеся паравольфраматы аммония подвергаются термическому разложению. Конечным продуктом является окись вольфрама, которая далее восстанавливается в водороде до чистого вольфрама [7, 24]. Недостатками этого способа являются низкие экологические характеристики, связанные с выделением в окружающую среду нитрозных газов. Кроме того, в данном процессе необходима последующая многостадийная переработка образующегося спека, включающая выщелачивание вольфрама.

Еще одним из наиболее распространенных способов переработки отходов твердых сплавов является «цинковый» метод, связанный с экстракцией в цинковый расплав кобальта с последующим испарением цинка. Этот способ основан на утилизации твердого сплава при сплавлении с расплавленным цинком [8]. Способ проводят в вакуумной печи. При этом цинк и кусковые отходы твердого сплава устанавливают в вакуумную

печь в графитовые лодочки и затем расплавляют цинк. В вакууме происходит диффузия в цинк адгезионной-связки кобальта или никеля. Далее цинк отгоняют и происходит конденсация его в приемнике-конденсаторе с получением на графитовой лодочке спека, состоящего из карбидов вольфрама, титана, тантала и кобальта, а в водоохлаждающем конденсаторе – слоя конденсированного цинка. Далее производят охлаждение установки и осуществляют выгрузку из нее конденсатора с цинком и поддона, и последующее измельчение содержимого поддона в шаровой мельнице с получением порошковой смеси, пригодной для производства твердого сплава. Затем извлекают цинк для его повторного использования. Недостатками этого способа являются низкая производительность и необходимость тщательной предварительной сортировки перерабатываемого сырья.

Повышение производительности может быть достигнуто реализацией способа электрохимической переработки отходов вольфрамсодержащих твердых сплавов [14], применяя в электролите на основе соляной или серной кислоты анодное растворение. Анодное растворение проводят в режиме несимметричного реверсируемого тока под влиянием прямого электрического тока с периодическим переключением направления тока на обратное. Однако процесс электрохимической переработки отходов вольфрамсодержащих твердых сплавов протекает длительное время – от 24 до 48 ч, что негативно влияет на производительность данного способа, хотя и повышает ее по сравнению с традиционным цинковым методом.

Разработчики зарубежных стран, так же как и России, активно занимаются поиском оптимальных технических решений, позволяющих перерабатывать отходы твердых сплавов наиболее дешевым и наименее энергозатратным способом. Так, корейский институт керамической техники и технологии (KOREA INST CERAMIC ENG&TECH) разработал способ переработки вольфрамсодержащих твердых сплавов с использованием цинкового метода [19] (аналог 1). Способ основан на взаимодействии жидкого цинка с кобальтовой связкой в электрической печи (рис. 1). Предварительно отходы очищают от примесей промывкой поверхности растворителями, такими как этанол, метанол или ацетон, при температуре примерно от 10 до 40°C. Затем отходы твердых сплавов и цинк помещают в полностью герметичный тигель в соотношении от 1:0,5 до 1:6, который устанавливают в камеру печи. В камере создают защитную газовую атмосферу с помощью подачи от 0,1 до 20 л/мин аргона или

азота и нагревают материал до температуры 420–800°C, то есть выше температуры плавления цинка (419,6°C), но ниже температуры кипения цинка (907°C). Цинк, взаимодействуя с кобальтовой связкой, образует расплав Co-Zn. Карбид вольфрама (WC) с температурой плавления 2777°C при температуре 420–800°C представляет собой твердую фазу с большим удельным весом, из-за разницы отделяется от жидкой фазы расплава Co-Zn с относительно меньшим удельным весом и опускается на дно тигля. Когда цинк проникает в цементированный карбид и реагирует с кобальтом, происходит расширение объема и изменение кристаллической структуры перерабатываемого материала и происходит деструкция. В данном способе процесс деструкции протекает в течение 10–12 ч. Затем крышку тигля открывают, тигель наклоняют и сливают Co-Zn расплав. Твердый карбид вольфрама (WC) остается на дне тигля. После этого камеру печи нагревают в течение 1 ч до температуры выше температуры кипения цинка (907°C) и ниже температуры плавления карбида вольфрама (2777°C), например 1000–1200°C. При этом цинк испаряется и удаляется. Испаренный цинк собирают в емкости, соединенной с камерой. Поскольку температура плавления карбида вольфрама больше, чем указанная выше, он остается в тигле без каких-либо изменений.

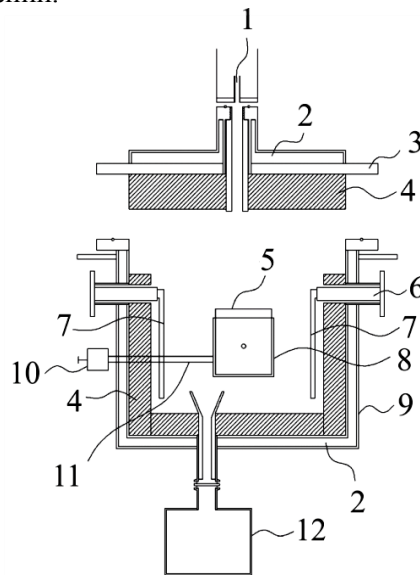


Рис. 1. Электрическая печь для переработки отходов твердых сплавов: 1 – газотводящий патрубок; 2 – охладитель; 3 – крышка камеры; 4 – теплоизоляция; 5 – крышка тигля; 6 – электропитание; 7 – нагреватель; 8 – тигель; 9 – камера; 10 – вращательный механизм; 11 – штанга; 12 – приемник

Полученный материал обрабатывают при температуре 10–30°C раствором фосфорной или соляной кислоты, которые растворяют кобальт, в течение 30–48 ч. После кислотной обработки материал промывают несколько раз, например этанолом, сушат и измельчают. В результате получают готовый порошок карбида вольфрама с размером зерен около 0,3–3 мкм и чистотой более 99%.

По приведенным параметрам процесса видно, что время, затраченное на процесс деструкции, занимает около 48 ч, а температура достигает 1200°C. Такие параметры требуют повышенных энергетических затрат и снижают производительность процесса. Кроме того, после удаления цинка материал требует проведения дополнительных операций: во-первых, гидрометаллургическую обработку полученного карбида вольфрама из-за загрязнения его цинком; а во-вторых, операцию разделения цинка и кобальта. Эти операции способствуют повышению негативного воздействия на окружающую среду.

Китайская компания Ganzhou Huaxin Metal-Mat CoLtd разработала способ извлечения карбида вольфрама и металлического кобальта из отходов твердых сплавов на кобальтовой связке, реализуемый в условиях высокого вакуума в замкнутом пространстве [20] (аналог 2). Предварительно отходы очищают от примесей, сушат и удаляют летучие вещества. Очищают отходы промыванием растворами при температуре 50–70°C. Очистку осуществляют при постоянном перемешивании с помощью ультразвукового генератора, создающего частоту ультразвука 20–30 кГц.

Затем очищенный и высушенный материал помещают в вакуумную термическую электропечь с графитовым тиглем (рис. 2) и начинают откачивать воздух до давления менее 10 Па. После этого печь нагревают со скоростью 2–10°C в минуту до тех пор, пока температура не достигнет 400–450°C, выдерживают при этой температуре 10–40 мин и снова снижают давление до 1 Па. Далее температуру в печи повышают до 1500–1800°C со скоростью нагрева 2–10°C в минуту. При температуре 1500–1800°C материал в печи выдерживают 0,5–5 ч. В результате происходит деструкция твердого сплава. После охлаждения печи до комнатной температуры материал с рыхлой и пористой структурой извлекают из тигля и измельчают до получения порошка с раз-

мером зерен от 2 до 10 мкм. Вместе с тем металлический кобальт с температурой плавления 1495°C при достижении температуры в печи 1500–1800°C переходит в жидкое состояние, а при снижении вакуума до $6,67 \cdot 10^{-2}$ Па интенсивно кипит, улетучивается, концентрируется в верхней части графитового тигля, переходит в кристаллизатор, содержащий от 3 до 10 лотков, и кристаллизуется. При реализации способа помимо вольфрамового порошка отдельно получают порошок кобальта с чистотой 99,8–99,9%.

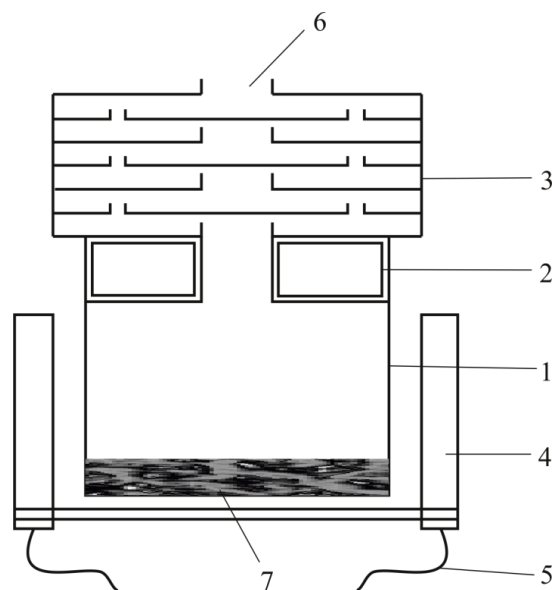


Рис. 2. Вакуумная термическая электропечь:
1 – графитовый тигель; 2 – переходная секция;
3 – кристаллизатор кобальта; 4 – нагревательный элемент; 5 – электропитание; 6 – выход; 7 – отходы

Вышеуказанный способ реализовывали на сплаве ВКЗ, взятом в количестве 1000 г. При этом в результате промывки были удалены примеси, а в результате сушки – влага. После этих операций масса исходного материала, загружаемого в вакуумную термическую электропечь, составила 987,2 г. С помощью вакуумного насоса в печи создали давление воздуха 5 Па, а затем произвели нагрев со скоростью 5°C в минуту до температуры 400°C и выдержали при ней 25 мин. После этого в печи снова снижали давление до величины менее 1 Па. Далее температуру в печи повышали до 1700°C со скоростью нагрева 5°C в минуту. При температуре 1700°C материал в печи выдерживали 3 ч. В результате была получена пористая структура карбида вольфрама. После измельчения ее в течение 12 ч было получено 957,6 г порошка. В кристалли-

заторе был получен порошок металлического кобальта с чистотой 99,9% в количестве 29,3 г.

Данный способ позволяет перерабатывать отходы твердых сплавов с получением отдельно порошка карбида вольфрама и металлического кобальта. Однако нагрев в вакуумной термической электропечи осуществляют до очень высоких температур (1500–1800⁰С), что предполагает использование специального оборудования и материалов, способных как создавать такие температуры, так и их выдерживать. Нагрев до высоких температур требует повышенных энергетических затрат, что способствует увеличению себестоимости готовой продукции. Кроме того, продолжительность процесса деструкции в вакуумной термической электропечи занимает порядка 5–8 ч, что снижает производительность процесса переработки в целом и повышает себестоимость порошка.

Еще один цинковый способ был разработан А.Н. Зеликманом с коллегами и реализован в ОАО «Победит» в полупромышленной установке [25]. Аппарат для переработки твердых сплавов выполнен из нержавеющей стали. Тигель аппарата прикрыт графитовой крышкой с отверстиями (предохранение от загрязнения конденсированного цинка). В верхней части аппарата расположен водоохлаждающий змеевик для конденсации паров цинка. Процесс протекает в защитной среде – аргоне. Разрежение в аппарате создается форвакуумным насосом НВР-5Д. В аппарате происходит экстрагирование кобальта в расплаве цинка. Твердый сплав и цинк загружают в аппарат в соотношении 1:1,15. Нагрев камеры осуществляют до температуры 650–750⁰С, затем продувают ее аргоном и выдерживают 60–120 мин. Для взаимодействия цинка с кобальтом камеру печи вакуумируют до остаточного разрежения 26,7–13,3 Па. В этих условиях протекает дистилляция цинка за 60–120 мин. Процесс экстрагирования кобальта занимает от 16 до 20 ч.

Известны способ технологии утилизации кусковых отходов твердых сплавов [13] и аппарат для его осуществления [21], основанный на деструкции сплава парами цинка, которые доказали свою эффективность на практике (аналог 3 – ближайший). Данный способ включает загрузку отходов твердого сплава в реактор, взаимодействие их с цинком при нагреве, дистилляцию

цинка, вакуумирование, деструкцию твердого сплава, его охлаждение и последующее измельчение. Однако вышеуказанный способ имеет некоторые недостатки. Например, образование холодных (не активных) паров цинка в вакууме уже при температуре 600 ⁰С. Эти пары при контакте с отходами твердых сплавов быстро конденсируются, незначительно деструктурируя структуру сплава, и переходят в твердое состояние. В результате образуется тонкий слой так называемого «холостого» цинка. При дальнейшем нагреве цинка до температуры 800 ⁰С образуются уже активные пары, которые, попадая в холодную зону реактора, при конденсации первоначально преодолевают слой «холостого» цинка и только потом разрушают структуру перерабатываемого твердого сплава. Эти явления способствуют снижению эффективности и производительности способа, а также увеличению расхода электроэнергии и стоимости переработки.

Все вышеперечисленные технологические решения по переработке отходов твердых сплавов имеют повышенные энергетические затраты и продолжительны по времени (см. таблицу), что обуславливает их низкую производительность. Эти недостатки делают организацию сбора отходов твердосплавной продукции, их транспортировку и переработку нецелесообразными. Поэтому для повышения заинтересованности предприятий в переработке отходов твердосплавной продукции необходимо снижать себестоимость переработки.

На кафедре металлургии цветных металлов и автоматизации металлургических процессов ФГБОУ ВО СКГМИ (ГТУ) разработан способ переработки кусковых отходов твердых сплавов и реактор для его осуществления. Суть способа описана в источниках [26, 27]. Данный способ включает загрузку отходов твердого сплава в реактор, взаимодействие их с парами цинка при нагреве, дистилляцию цинка, вакуумирование, деструкцию твердого сплава, его охлаждение и последующее измельчение до порошковой смеси, пригодной для производства изделий из твердых сплавов. Способ позволяет полностью деструктурировать твердый сплав (рис. 3) в 4–8 раз быстрее всех известных аналогов, при этом затратив на переработку в разы меньшее количество электроэнергии (порядка 1,8–2 кВт·ч/кг).

Сравнительные данные, показывающие различие в технических параметрах разработанного способа и ближайших аналогов

Технический параметр	Разработанная технология	Аналог 1 KOREA INST CERAMIC ENG&TECH	Аналог 2 Ganzhou Huaxin MetalMat CoLtd	Аналог 3 ближайший [13, 21]
Продолжительность, ч	3–4	30–48	9–11	8–9
Температура, °С	850–950	1000–1200	1500–1800	600–650
Давление, Па	$6 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-2}$	$6,67 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-2}$
Остаточное содержание цинка в порошке, %	0,03	0,03	0,03	0,03
Степень деструкции, %	100	99	99	83
Затраты электроэнергии, кВт·ч, на 1 кг перерабатываемых отходов	1,8	≈3,9	≈4,9	3,7
Страна-производитель	Россия	Корея	Китай	Россия

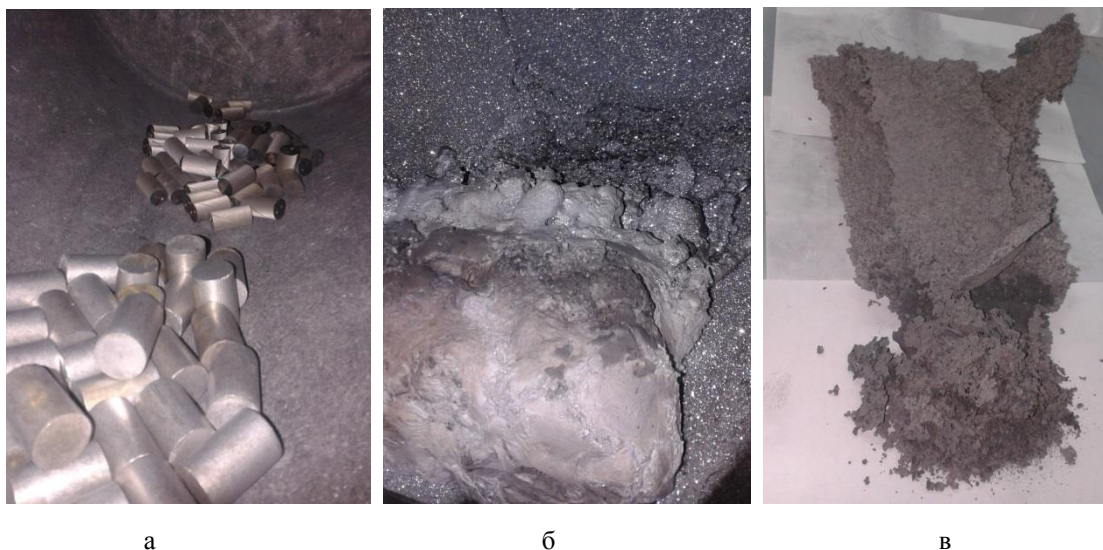


Рис. 3. Твердый сплав: а – отходы, загруженные в реактор деструкции; б – материал, полученный после промежуточной стадии; в – полностью деструктурированный продукт

Заключение

В работе проанализированы российские и зарубежные технологии переработки отходов твердых сплавов и аппаратура для их реализации, которые на протяжении полувека совершенствуются в поисках оптимальных условий проведения и получения готового продукта качества, соответствующего ГОСТ. Установлено, что большинство технологий имеет недостатки, они требуют повышенного расхода электроэнергии и продолжительны

по времени. Это негативно влияет на стоимость готового продукта – вторичного твердосплавного порошка. На кафедре металлургии цветных металлов и автоматизации металлургических процессов ФГБОУ ВО СКГМИ (ГТУ) разработан способ переработки кусковых отходов твердых сплавов и реактор для его осуществления, позволяющий полностью деструктурировать твердый сплав быстрее всех известных аналогов, при этом, затратив на переработку в разы меньшее количество электроэнергии (порядка 1,8–2 кВт·ч/кг).

Список литературы

1. Технология машиностроения. В 2-х т. Т.2. Производство машин / В.М. Бурцев, А.С. Васильев, О.М. Деев и др.; под ред. Г.Н. Мельникова. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 640 с.
2. Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2016 и 2017 годах. Москва, 2018.
3. Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2015 году». Москва, 2017.
4. Ведущее независимое ценовое агентство Argus [Электронный ресурс]. <https://www.argusmedia.com/ru/metals>. (дата обращения: 24.07.2019).
5. Кофман В.Н. Производство цветных металлов из вторичного сырья в Японии. М.: ЦНИИЦВЕТМЕТ, 1986. Вып 5. С.15–19.
6. Козин Л.Ф., Трефилов В.И. Редкометаллическая промышленность Украины. Проблемы и перспективы. Препринт / НАН Украины, ИПМ НАНУ, ИОНХ НАНУ. Киев, 1997. 74 с.
7. Борд Н.Ю., Королевич С.В., Хоняк К.В. Новая технология переработки отходов твердых и тяжелых сплавов // Инструмент. 1997. № 6. С. 10.
8. Зеликман А.Н., Каспарова Т.В., Биндер С.И. Получение твердых сплавов из регенерированных смесей WC-Co, полученных из кусковых отходов цинковым методом // Цветные металлы. 1993. № 1. С. 47–49.
9. Патент №2101375 РФ. Способ переработки кусковых отходов твердых сплавов / Жарков Д.В., Зыкус М.Ю., Медведев А.С., Фисенков М.В. Опубликовано 10.01.1998.
10. Patent 3595484 US. Reclamation of refractory carbides from carbide materials / Paul G. Barnard, Heine Kenworthy. Publication data 27.07.1971.
11. X. Liu, S. Xu, K. Wang. Recycling of WC-Co alloys [Переработка отходов WC-Co сплавов] // Non-Ferrous Metals. 2003. Vol 55, No 3. – Pp. 59–61
12. Патент №2443507 РФ. Способ переработки отходов твердого сплава BK8 электроэрозионным диспергированием / Дворник М.И., Ершова Т.Б. Опубликовано 27.02.2012.
13. Патент №2276193 РФ. Способ переработки кусковых отходов твердых сплавов / Троценко И.Г., Свиштунов Н.В. Опубликовано 10.05.2006.
14. Патент №2189402 РФ. Способ переработки отходов твердых сплавов / Алкацев М.И., Гуриев В.Р. Опубликовано 20.09.2002.
15. Агеев Е.В., Семенихин Б.А. Утилизация отходов твердого сплава методом электроэрозионного диспергирования // XV Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии», Томск, 4–8 мая. Томск, 2009.
16. Malyshev V.V., Gab A.I. Resource-saving methods for recycling waste tungsten carbide-cobalt cermet and extraction of tungsten from tungsten concentrates [Ресурсосберегающие способы переработки отходов твердых сплавов карбид вольфрама кобальт и экстракции вольфрама из вольфрамовых концентратов] // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2007. Vol. 41. No 4. P. 436–441.
17. Экологически безопасные и ресурсосберегающие способы переработки отходов твердых сплавов WC-Co и экстракции вольфрама из вольфрамовых концентратов (Ecologically safe and resource-saving methods of tungsten carbide-cobalt hard alloys waste processing extraction from tungsten concentrates) / Малышев В.В., Соловьев В.В., Лукашенко Т.Ф. и др. // Вестник КрНУ им. М. Остроградского. Вып. 4. 2011 (69). Ч.1. С. 155–159.
18. Колобов Г.А., Панов В.С. Новые технологии переработки отходов вольфрама и твердых сплавов // Запорожская государственная инженерная академия (Запорізька державна інженерна академія) // Металлургия (Металургія). 2013. №1. С. 65–73.
19. Patent 20120028490 KR. Recycling method of tungsten carbide from waste cemented carbide using pressured zinc melt / Pee Jae Hwan, Yun Jin Soon, Cho Woo Seok, Kim Kyung Ja, Seong Nam Eui. Publication data 23.03.2012.
20. Patent 106145114 CN. Method for recycling tungsten carbide and metallic cobalt through waste tungsten-cobalt cemented carbide / Xiahou Bin. Publication data 23.11.2016.
21. Патент №2341571 РФ. Аппарат для переработки отходов твердых сплавов цинковым способом / Троценко И.Г., Свиштунов Н.В. Опубликовано 20.12.2008.
22. Пивоваров М.Н., Власова А.В. Новый метод переработки кусковых отходов твердых сплавов // Новая технология. 2003. №1. С. 89–91.
23. Панов В.С., Чувилин А.М., Фальковский В.А. Технология и свойства спеченных твердых сплавов и изделий из них. М.: МИСиС, 2004. 463 с.
24. Борд Н.Ю. Новая технология переработки отходов твердых и тяжелых сплавов // Инструмент. 1996. №6. С. 47–49.
25. Зеликман А.Н., Никитина Л.С. Вольфрам. М.: Металлургия, 1978. 272 с.
26. Патент №2643291 РФ. Способ переработки кусковых отходов твердых сплавов / Троценко И.Г., Герасименко Н.П. Опубликовано 31.01.2018.
27. Патент №2581690 РФ. Реактор деструкции отходов твердых сплавов газообразным цинком. Троценко И.Г. Опубликовано 20.04.2016.

Поступила 30.09.19

Принята в печать 28.10.19

IMPROVEMENT OF THE CEMENTED CARBIDE MATERIAL WASTE PROCESSING TECHNOLOGY.

Part I. Analysis of the Current State of Technologies

Igor G. Trotsenko – PhD (Eng.), Associate Professor of the Department of Non-Ferrous Metallurgy and Automation of Metallurgical Processes North Caucasian Mining and Metallurgical Institute (State Technological University), Vladikavkaz, Russia. E-mail: itrocenko@mail.ru.

Tatiana E. Gerasimenko – PhD (Eng.), Associate Professor, Head of the Intellectual Property Department North Caucasian Mining and Metallurgical Institute (State Technological University), Vladikavkaz, Russia. E-mail: gerasimenko_74@mail.ru

Evgeniy I. Meshkov – DrSc (Eng.), Professor of the Department of Non-Ferrous Metallurgy and Automation of Metallurgical Processes North Caucasian Mining and Metallurgical Institute (State Technological University), Vladikavkaz, Russia. E-mail: eimeshkov@mail.ru

Abstract. Problem Statement: The paper presents an analysis of the current state of cemented carbide material processing technologies and the comparative technical parameters of various ways of processing, including the method developed at the Department of Non-Ferrous Metallurgy and Automation of Metallurgical Processes, North Caucasian Mining and Metallurgical Institute (State Technological University). **Objectives:** To identify the most efficient and economical method of processing. **Originality:** The authors of the paper analyzed a significant amount of patent, scientific and technical information, as well as practical experience of cemented carbide material waste processing technologies, and, taking into account the shortcomings of these methods, developed the processing technology and equipment protected by Russian patents for invention. **Findings:** The developed technology makes it possible to completely destruct cemented carbide materials faster than all known similar techniques, while consuming minimum electrical energy. **Practical Relevance:** The use of the technology in this country will reduce economic and raw material dependence on other states, namely China, as a result of multiple waste processing, and also contribute to natural landscape preservation because of multiple recycling.

Keywords: cemented carbide materials, recycling, destruction, waste processing technologies.

References

1. Burtsev V.M., Vasiliev A.S., Deev O.M. et al. *Tekhnologiya mashinostroeniya. V 2-kh tomakh. T.2. Proizvodstvo mashin* [Mechanical engineering technology. In 2 volumes. Vol.2. Machine building]. Moscow: Bauman MSTU, 2001, 640 p. (In Russ.)
2. State report "On the state and use of mineral resources of the Russian Federation in 2016 and 2017". Moscow, 2018. (In Russ.)
3. State report "On the state and use of mineral resources of the Russian Federation in 2015". Moscow, 2017. (In Russ.)
4. Leading independent price agency Argus [Electronic resource]. Available at: <https://www.argusmedia.com/ru/metals> (Accessed: July 24, 2019).
5. Kofman V.N. *Proizvodstvo tsvetnykh metallov iz vtorichnogo syrya v Yaponii* [Non-ferrous metal production from secondary raw materials in Japan]. Moscow: TsNIITsVET-MET, 1986, vol. 5, pp.15–19. (In Russ.)
6. Kozin L.F., Trefilov V.I. *Redkometallnaya promyshlennost Ukrainy. Problemy i perspektivy. Preprint* [Rare metal industry of Ukraine. Problems and prospects. Preprint]. National Academy of Sciences of Ukraine, Institute of Materials Science Issues, Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine. Kiev, 1997, 74 p. (In Russ.)
7. Bord N.Yu., Korolevich S.V., Khonyak K.V. New technology for processing wastes of cemented carbide materials and heavy alloys. *Instrument [Tool]*, 1997, no 6, p. 10. (In Russ.)
8. Zelikman A.N., Kasparova T.V., Binder S.I. Preparation of cemented carbide materials from regenerated WC-Co mixtures obtained from lump waste by the zinc method. *Tsvetnyye metally* [Non-ferrous metals], 1993, no. 1, pp. 47–49. (In Russ.)
9. Zharkov D.V., Zykus M.Yu., Medvedev A.S., Fisenkov M.V. *Sposob pererabotki kuskovykh otkhodov tverdykh splavov* [A method of processing lump waste of cemented carbide materials]. Patent RF, no. 2101375, 1998.
10. Paul G. Barnard, Heine Kenworthy. Reclamation of refractory carbides from carbide materials. Patent US, no. 3595484, 1971.
11. X. Liu, S. Xu, K. Wang. Recycling of WC-Co alloys. *Non-Ferrous Metals*, 2003, vol. 55, no. 3, pp. 59–61.
12. Dvornik M.I., Ershova T.B. *Sposob pererabotki otkhodov tverdogo splava VK8 elektroerozionnym dispergirovaniem* [A method of processing wastes of cemented carbide material VK8 by electroerosion dispersion]. Patent RF, no. 2443507, 2012.
13. Trotsenko I.G., Svistunov N.V. *Sposob pererabotki kuskovykh otkhodov tverdykh splavov* [A method of processing lump wastes of cemented carbide materials]. Patent RF, no. 2276193, 2006.
14. Alkatsev M.I., Guriev V.R. *Sposob pererabotki otkhodov tverdykh splavov* [A method of processing wastes of cemented carbide materials]. Patent RF, no. 2189402, 2002.
15. Ageev E.V., Semikhin B.A. Recycling of cemented carbide materials by the electroerosion dispersion method. *XV Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya*

- studentov, aspirantov i molodykh uchenykh «Sovremennye tekhnika i tekhnologii»* [The 15th International Scientific and Practical Conference of Students, PhD Students and Young Scientists "Modern Machines and Technologies"]. Tomsk, 4–8 May 2009. (In Russ.)
16. Malyshev V.V., Gab A.I. Resource-saving methods for recycling waste tungsten carbide-cobalt cermet and extraction of tungsten from tungsten concentrates. Theoretical Foundations of Chemical Engineering, 2007, vol. 41, no. 4, pp. 436–441.
 17. Malyshev V.V., Solovyev V.V., Lukashenko T.F. et al. Ecologically-safe and resource-saving methods of processing wastes of tungsten carbide-cobalt alloys and extraction of tungsten from tungsten concentrates. *Vestnik KrNU im. M. Ostrogradskogo* [Vestnik of Kremenchuk Mykhailo Ostrogradskiy National University], no. 4, 2011 (69), part 1, pp. 155–159. (In Russ.)
 18. Kolobov G.A., Panov V.S. New technologies for processing wastes of tungsten and cemented carbide materials. Zaporizhia State Engineering Academy. *Metallurgiya* [Metallurgy], 2013, no. 1, pp. 65–73. (In Russ.)
 19. Pee Jae Hwan, Yun Jin Soon, Cho Woo Seok, Kim Kyung Ja, Seong Nam Eui. Recycling method of tungsten carbide from waste cemented carbide using pressured zinc melt. Patent KR, no. 20120028490, 2012.
 20. Xiahou Bin. Method for recycling tungsten carbide and metallic cobalt through waste tungsten-cobalt cemented carbide. Patent CN, no. 106145114, 2016.
 21. Trotsenko I.G., Svistunov N.V. *Apparat dlya pererabotki otkhodov tverdykh splavov tsinkovym sposobom* [A device for processing wastes of cemented carbide materials by the zinc method]. Patent RF, no. 2341571, 2008.
 22. Pivovarov M.N., Vlasova A.V. A new method for processing lump wastes of cemented carbide materials. *Novaya tekhnologiya* [New technology], 2003, no. 1, pp. 89–91. (In Russ.)
 23. Panov V.S., Chuvilin A.M., Falkovsky V.A. *Tekhnologiya i svoystva spechennykh tverdykh splavov i izdeliy iz nikh* [Technology and properties of sintered cemented carbide materials and their products]. Moscow: MISiS, 2004, 463 p. (In Russ.)
 24. Bord N.Yu. New technology for processing wastes of cemented carbide materials and heavy alloys. *Instrument [Tool]*, 1996, no. 6, pp. 47–49. (In Russ.)
 25. Zelikman A.N., Nikitina L.S. *Volfram* [Tungsten]. Moscow: Metallurgiya, 1978, 272 p. (In Russ.)
 26. Trotsenko I.G., Gerasimenko N.P. *Sposob pererabotki kuskovykh otkhodov tverdykh splavov* [A method of processing lump wastes of cemented carbide materials]. Patent RF, no. 2643291, 2018.
 27. Trotsenko I. G. *Reaktor destruktzii otkhodov tverdykh splavov gazoobraznym tsinkom* [Reactor for decomposition of wastes of hard alloys with gaseous zinc]. Patent RF, no. 2581690, 2016.

Received 30/09/19

Accepted 28/10/19

Образец для цитирования

Троценко И.Г., Герасименко Т.Е., Мешков Е.И. Совершенствование технологии переработки отходов твердых сплавов. Часть I. Анализ современного состояния технологий // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т.17. №4. С. 25–33. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-4-25-33>

For citation

Trotsenko I.G., Gerasimenko T.E., Meshkov E.I. Improvement of the Cemented Carbide Material Waste Processing Technology. Part I. Analysis of the Current State of Technologies. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2019, vol. 17, no. 4, pp. 25–33. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-4-25-33>

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

УДК 669.2: 669.715

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-4-34-43>ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ
АЛЮМИНИЕВО-МАГНИЕВОГО СПЛАВА АМг2 С ИНДИЕМГаниев И.Н.¹, Шарипова Х.Я.², Одиназода Х.О.¹, Иброхимов Н.Ф.¹, Ганиева Н.И.¹¹Таджикский технический университет им. М.С. Осими, Душанбе, Таджикистан²Хатлонский государственный медицинский университет, Душанбе, Таджикистан

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы): Применение алюминия и его сплавов как конструкционных материалов обусловлено их стойкостью к коррозии. Алюминиево-магниево-магний обладают высокой стойкостью к коррозии в атмосферных и морских условиях, в щелочных растворах и растворах кислот малой плотностью, хорошей обрабатываемостью резанием. По коррозионной стойкости эти сплавы значительно превосходят литейные сплавы других систем на основе алюминия. Высокая коррозионная стойкость алюминиево-магниево-магний в различных средах определяется образованием гидратной плёнки, задерживающей коррозионный процесс. Высокая прочность сплавов этой системы связана с увеличением искажения кристаллической решетки с повышением содержания магния в твердом растворе. Для повышения коррозионных и механических свойств в алюминиево-магниево-магний вводят добавки различных металлов. Одной из важнейших характеристик алюминиево-магниево-магний является теплоемкость. Знание теплоемкости и её температурной зависимости играет большую роль в исследованиях сплавов. **Цель работы:** изучение температурной зависимости теплофизических свойств и термодинамические функции алюминиево-магниево-магний сплава АМг2 с индием. **Используемые методы:** описано много методов измерения теплоемкости твердого тела. В настоящей работе применяется метод сравнения кривых охлаждения эталонного и исследуемого образцов в режиме «охлаждения» с использованием медного эталона (Cu марки М00) в интервале 300–800 К. **Новизна:** впервые исследовано влияние добавок индия на теплофизические свойства и изменения термодинамических функций алюминиево-магниево-магний сплава АМг2. **Результат:** установлены математические модели, которые описывают температурную зависимость теплоемкости сплава АМг2 от содержания индия и изменение их термодинамических функций в указанном температурном диапазоне. В результате проведенных исследований показано, что с ростом температуры теплоемкость, энтальпия и энтропия сплавов увеличиваются, а значение энергии Гиббса уменьшается. Добавки индия в сплав АМг2 незначительно уменьшают величины указанных функций. **Практическая значимость:** полученные характеристики теплофизических свойств и термодинамических функций алюминиево-магниево-магний сплава АМг2 с индием пополняют страницы соответствующих справочников по теплофизике материалов и могут использоваться при проектировании деталей и машин из указанных сплавов.

Ключевые слова: алюминий-магний сплав АМг2, индий, теплоёмкость, режим «охлаждения», энтальпия, энтропия, энергия Гиббса.

Введение

К сплавам системы Al-Mg относятся сплавы типа АМг1, АМг2, АМг3, АМг4 и АМг6, которые широко используются в промышленности. В сплавах системы Al-Mg, с ростом содержания магния твердость и усталостная прочность повышается, а пластичность понижается. Эти сплавы широко используются в промышленности и отличаются высокой пластичностью, хорошей свариваемостью и высокой коррозионной стойкостью [1–3].

Из литературы известно, что сплавы системы

Al-Mg с содержанием магния до 6% являются стойкими к коррозионному разрушению в различных средах. При более высоких содержаниях магния коррозионная стойкость сплавов снижается [3–5].

По глубине питтинга в морской воде промышленные сплавы системы Al-Mg располагаются в ряд: АМг1→АМг2→АМг3→АМг4→АМг6, т.е. последний сплав обладает максимальной глубиной питтинга.

В морской воде имеет место корреляция между чувствительностью к структурной коррозии и обычным питтингом. С ростом степени легирования сплавов возрастает пресыщение твёрдого раствора и вместе с ним чувствительность к структурной коррозии [5–7].

Практика показывает, что при концентрации до 3.5%Mg сплавы системы Al-Mg не проявляют чувствительность к межкристаллитной коррозии. Это объясняется дискретным распределением твердого раствора β – фазы по границам зерен в связи с малым распределением твердого раствора. Отсюда целесообразно предотвращение образования плёнки β – фазы по границам зерен для повышения сопротивления коррозионному растрескиванию [2]. Чтобы устранить указанные недостатки, сплавы системы Al-Mg подвергаются легированию различными компонентами [4–7].

В литературе нет сведений о теплофизических свойствах сплава AlMg2 с индием. Как известно, теплофизические свойства материалов являются важнейшими характеристиками, определяющими закономерности их поведения при различных внешних воздействиях.

Цель работы заключается в исследовании влияния добавок индия на теплофизические свойства и термодинамические функции алюминиево-магниевого сплава AlMg2.

Теория метода и описание установки

В литературе описано много методов измерения теплоемкости твердого тела. В настоящей работе используется метод сравнения кривых охлаждения эталонного и исследуемого образцов. Исследуемый образец, нагретый до температуры, превышающей температуру окружающей среды, будет охлаждаться.

Скорость охлаждения образца зависит от её теплоемкости. Сравнивая термограммы (зависимости температуры от времени) двух образцов, один из которых является эталоном с известной теплоемкостью, можно определить теплоемкость другого, то есть исследуемого образца [8–11].

Физическая сущность предлагаемого метода измерения состоит в следующем. Скорость охлаждения образцов определяется тремя механизмами теплопередачи – теплопроводностью окружающей среды, конвекцией и излучением. Для первых двух процессов с достаточной точностью можно констатировать, что тепловой поток от нагретого тела (J) пропорционален разности между температурой поверхности образца T и температурой окружающей среды T_0 (закон Ньютона-Рихмана):

$$J = \alpha(T - T_0). \quad (1)$$

Коэффициент теплопередачи α зависит от большого количества параметров, его невозможно описать общей формулой, поэтому коэффициент теплоотдачи на практике определяется экспериментально.

Тепловой поток за счет излучения имеет несколько иную зависимость от температуры (закон Стефана–Больцмана)

$$J = \sigma \varepsilon S(T^4 - T_0^4), \quad (2)$$

где $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$ Вт/м²К⁴, ε – коэффициент поглощения; S – площадь поверхности тела.

При небольшой разности температур $T - T_0$ он приближенно сводится к виду (1):

$$J = 4\sigma \varepsilon S T_0^3 (T - T_0). \quad (3)$$

Температура при охлаждении тела будет спадать по экспоненте, если не учитывать излучение и считать, что теплоемкость и коэффициент теплопередачи постоянны, а окружающая среда бесконечна и однородна. Уравнение теплового баланса

$$\delta Q = -J dt \quad (4)$$

здесь имеет вид

$$C_p^0 m dT = -a(T - T_0) dt, \quad (5)$$

где C_p^0 – удельная теплоемкость тела; m – его масса.

Решением данного уравнения является

$$T(t) = (T_1 - T_0)e^{-t/\tau} + T_0, \quad (6)$$

где T_1 – начальная температура; $\tau = mc / \alpha$ – время тепловой релаксации.

В случае выполнения всех указанных выше условий теплоемкость материала образца можно определить из измеренного по термограмме параметру релаксации τ . Однако, ввиду того, что величина α не известна, измерения нужно вести параллельно с эталонным образцом с известной теплоемкостью. При этом образец должен иметь те же размеры, чтобы условия охлаждения у них были идентичны. Допуская, что коэффициент α у них одинаков, теплоемкость измеряемого материала c_x можно найти по формуле

$$C_x^0 = C_0^0 \frac{m_0 \tau_x}{m_x \tau_0}, \quad (7)$$

где C_0^0 – теплоемкость эталонного материала; m_x и m_0 – массы исследуемого и эталонного; τ_x и τ_0 – измеренное время тепловой релаксации для исследуемого образца и эталона, $\tau_0 = \left(\frac{dT}{d\tau}\right)_1$

и $\tau_x = \left(\frac{dT}{d\tau}\right)_2$.

Этот метод предполагает: 1) постоянство c_x и c_0 , коэффициента α при изменении темпера-

туры; 2) охлаждение в бесконечной среде и 3) температуры образцов, при которых излучением можно пренебречь по сравнению с теплопроводностью и конвекцией. Несоблюдение любого из указанных условий нарушает экспоненциальный ход кривой охлаждения [7, 8].

Учет зависимости c_x и c_y от температуры можно выполнить, разбив термограмму на узкие интервалы температур, в которых теплоемкости и коэффициент α можно считать постоянными. Найдя для каждого интервала свои параметры тепловой релаксации $\tau_x(T)$ и $\tau_y(T)$, можно использовать их для расчета $c_x(T)$.

В данной работе определение средней теплоемкости проводится по всему измеряемому интервалу температур. При этом коэффициент теплопередачи α для всех образцов предполагается одинаковым [9, 10].

Скорости охлаждения τ_y и τ_x определяются путём построения кривых охлаждения эталона и исследуемых образцов, которые представляют собой зависимость температуры образца от времени при охлаждении его в неподвижном воздухе.

Передача тепла от более нагретого тела к менее нагретому – процесс, стремящийся к установлению термодинамического равновесия в системе. При этом система состоит из огромного числа частиц, то есть это релаксационный процесс, который можно описать во времени экспонентой. В нашем случае нагретое тело передает свое тепло окружающей среде (т.е. телу с бесконечно большой теплоёмкостью). Отсюда температуру окружающей среды можно считать постоянной (T_0). В таком случае закон изменения температуры тела от времени τ можно записать в виде

$$\Delta T = \Delta T_1 e^{-\tau/\tau_1}.$$

Здесь ΔT – разность температур окружа-

ющей среды и нагретого тела; ΔT_1 – разность температур окружающей среды и нагретого тела при $\tau=0$; τ_1 – постоянная охлаждения, численно равная времени, в течение которого разность температур между окружающей средой и нагретым телом уменьшается в e раз.

Измерение теплоемкости проводилось по методикам, описанным в работах [12–21]. Схема установки (малый патент Респ. Таджикистан № TJ 877 «Установка для определений теплоемкости и теплопроводности твердых тел», приоритет изобретения от 20.04.2017 г.) для измерения теплоемкости представлена на **рис. 1**. Установка состоит из следующих узлов: электропечь 3 смонтирована на стойке 6, по которой она может перемещаться вверх и вниз (стрелкой показано направление перемещения). Образец 4 и эталон 5 (тоже могут перемещаться) представляют собой цилиндр длиной 30 мм и диаметром 16 мм с высверленными каналами с одного конца, в которые вставлены термопары 4 и 5. Концы термопар подведены к цифровому многоканальному термометру 7, который подсоединен к компьютеру 8.

Включаем электропечь 3 через автотрансформатор 1, установив нужную температуру с помощью терморегулятора 2. По показаниям цифрового многоканального термометра 7 отмечаем значение начальной температуры.

Вдвигаем измеряемый образец 4 и эталон 5 в электропечь 3 и нагреваем до нужной температуры. При этом контролируем температуру по показаниям цифрового многоканального термометра на компьютере 8. Затем измеряемый образец 4 и эталон 5 одновременно выдвигаем из электропечи 3, и с этого момента фиксируем снижение температуры. Далее записываем показания цифрового термометра 7 на компьютере 8 через фиксированное время (от 0,1 до 20 с). Образец и эталон охлаждаем ниже 30°C.

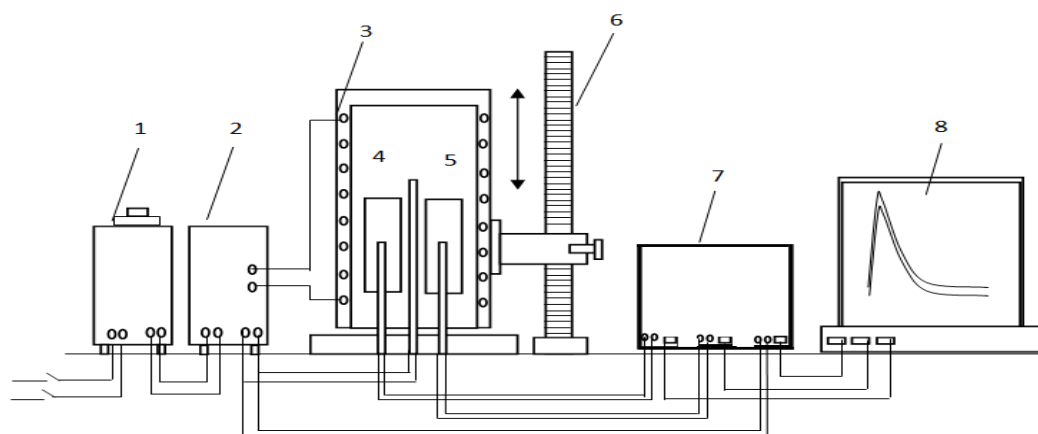


Рис. 1. Схема установки для определения теплоемкости твердых тел в режиме «охлаждения»: 1 – автотрансформатор; 2 – терморегулятор; 3 – электропечь; 4 – образец измеряемый; 5 – эталон; 6 – стойка электропечи; 7 – многоканальный цифровой термометр; 8 – регистрирующий прибор (компьютер)

Результаты и их обсуждение

Теплоёмкость алюминиевого сплава АМг2 с индием измеряли в режиме «охлаждения». С помощью программ MS Excel и Sigma Plot производилась обработка результатов измерений и построение графиков. Значение коэффициента корреляции $R_{\text{корр}} \leq 1,00$, подтверждая правильность выбора аппроксимирующей функции. Временной интервал фиксации температуры – 10 с. Относительная погрешность измерения температуры составляла $\pm 1\%$, в интервале от 40 до 400°C и при более 400°C составлял $\pm 2,5\%$. Погрешность измерения теплоемкости не превышала 4%. На рис. 2 представлены полученные в ходе эксперимента зависимости температуры образца от времени охлаждения для сплава АМг2 с индием, которые описываются уравнением вида

$$T = T_0 + \frac{1}{2} \left[\frac{(T_1 - T_0) e^{-\tau/\tau_1}}{\tau_1} + \frac{(T_2 - T_0) e^{-\tau/\tau_2}}{\tau_2} \right]. \quad (8)$$

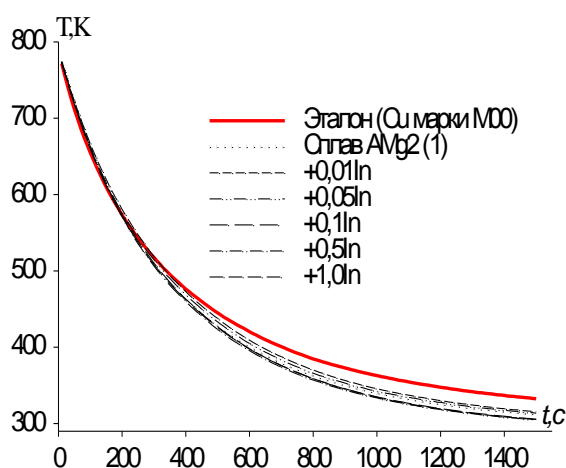


Рис. 2. Зависимость изменения температуры (Т) от времени охлаждения образцов из сплава АМг2 с индием и эталона (Cu марки М00)

Дифференцируя уравнения (8) по τ , получаем уравнение для определения скорости охлаждения образцов из сплава АМг2 с индием и медного эталона марки (М00):

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{1}{2} \left[\frac{-(T_1 - T_0) e^{-\tau/\tau_1}}{\tau_1^2} - \frac{-(T_2 - T_0) e^{-\tau/\tau_2}}{\tau_2^2} \right]. \quad (9)$$

На рис. 3 приведены рассчитанные по данному дифференцированному уравнению зависимости скорости охлаждения $dT/d\tau - T$ для образцов из сплавов. Экспериментальные значения ΔT_{01} , τ_1 , ΔT_{02} , τ_2 из уравнения (9) для исследованных сплавов представлены в табл. 1. Результаты эксперимента обработаны с помощью программы MS Excel, графики построены по программе Sigma Plot. При этом коэффициент корреляции составлял не менее 1,00.

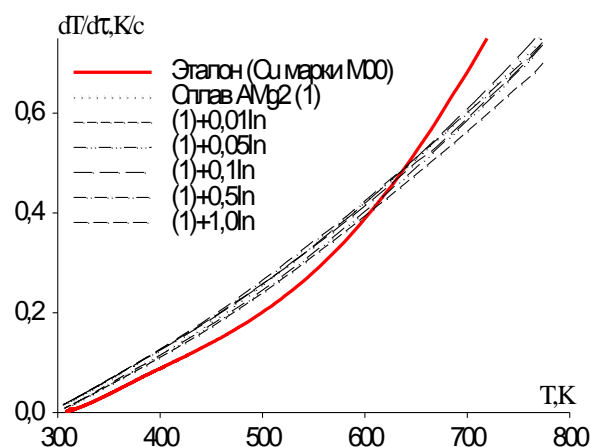


Рис. 3. Зависимость скорости охлаждения образцов из сплава АМг2 с индием и эталона (Cu марки М00) от температуры

Обрабатывая полученные экспериментальные и имеющиеся литературные данные по теплоемкости сплава АМг2 и индия [22] по программе Sigma Plot и используя уравнение (7), получили следующие уравнения температурной зависимости удельной теплоемкости (в скобках представлены соответствующие им коэффициенты регрессии):

$$C_P^{0 \text{ AMg2}} = 0.4148 + 0.0009585T + 9.5925 \cdot 10^{-7} T^2 - 1.304 \cdot 10^{-9} T^3. \quad (R=1,0000);$$

$$C_P^{\text{In}} = 138.6337 + 0.6523T - 1.22 \cdot 10^{-3} T^2 + 6.97 \cdot 10^{-7} T^3. \quad (R=1,0000).$$

Рассчитанные значения C_P^0 для сплава АМг2 с индием через 100 К приведены в табл. 2 и на рис. 4. Видно, что от температуры теплоемкость сплавов увеличивается, а от содержания индия незначительно уменьшается.

Далее вычислили температурную зависимость коэффициента теплоотдачи (α , Вт/К·м²) по полученным экспериментально величинам ско-

рости охлаждения образцов из сплавов и по рассчитанным результатам теплоемкости для сплава АМг2 с индием. Результаты расчёта, представленные в **табл. 3** показывают, что с ростом температуры и содержания индия в сплаве АМг2 коэффициента теплоотдачи увеличивается.

С применением программы Sigma Plot получены коэффициенты для уравнения, описывающего температурную зависимость удельной теплоемкости сплава АМг2 с индием. Значения коэффициентов представлены в **табл. 4**.

$$C_p^0 = a + bT + cT^2 + dT^3. \quad (10)$$

При вычислении температурной зависимости изменений энтальпии, энтропии и энергии Гиббса были применены интегралы от удельной теплоемкости по (10):

$$[H^0(T) - H^0(T_0)] = a(T - T_0) + \frac{b}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{c}{3}(T^3 - T_0^3) + \frac{d}{4}(T^4 - T_0^4); \quad (11)$$

$$[S^0(T) - S^0(T_0)] = a \ln \frac{T}{T_0} + b(T - T_0) + \frac{c}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{d}{3}(T^3 - T_0^3); \quad (12)$$

$$[G^0(T) - G^0(T_0)] = [H^0(T) - H^0(T_0)] - T[S^0(T) - S^0(T_0)], \quad (13)$$

где $T_0 = 273,15$ К.

Результаты расчёта температурной зависимости изменений энтальпии, энтропии и энергии Гиббса для сплава АМг2 с индием и эталона (Cu марки М00) через 100 К представлены в **табл. 5**.

Таблица 1

Значения коэффициентов $\Delta T_1, \tau_1, \Delta T_2, \tau_2$ в уравнении (9) для сплава АМг2 с индием и эталона (Cu марки М00)

Содержание индия в сплаве, мас. %	ΔT_1 , К	τ_1 , с	ΔT_2 , К	τ_2 , с	$\Delta T_{01}/\tau_1$, К/с	$\Delta T_{02}/\tau_2$, К/с	ΔT_0 , К
Сплав АМг2	138,33	169,49	356,17	467,38	0,8162	0,7621	297,67
(1)+0,01% In	131,725	180,83	359,57	494,34	0,7285	0,7274	297,77
(1)+0,05% In	94,25	143,21	396,00	450,71	0,6581	0,8786	299,27
(1)+0,1% In	92,80	134,00	405,86	442,58	0,6925	0,9170	292,31
(1)+0,5% In	120,839	169,70	377,29	454,94	0,7121	0,8293	291,08
(1)+1,0% In	86,027	143,32	411,04	440,70	0,6002	0,9327	291,73
Эталон (Cu марки М00)	277,41	109,73	390,83	543,51	2,5282	0,7191	308,35

Таблица 2

Температурная зависимость удельной теплоёмкости (кДж/кг·К) сплава АМг2 с индием и эталона (Cu марки М00)

Содержание индия в сплаве, мас. %	T, К					
	300	400	500	600	700	800
Сплав АМг2(1)	0,7537	0,8686	0,9716	1,0546	1,1101	1,1302
(1)+0,01% In	0,7534	0,8682	0,9708	1,0535	1,1084	1,1278
(1)+0,05% In	0,7532	0,8679	0,9705	1,0532	1,1081	1,1274
(1)+0,1% In	0,7530	0,8676	0,9702	1,0528	1,1077	1,1270
(1)+0,5% In	0,7509	0,8651	0,9673	1,0495	1,1042	1,1234
(1)+1,0% In	0,7484	0,8621	0,9636	1,0455	1,0998	1,1190
Рост C_p^0 , %	-0,67	-0,71	-0,74	-0,77	-0,78	-0,79
Эталон (Cu марки М00)	0,3850	0,3977	0,4080	0,4169	0,4251	0,4336

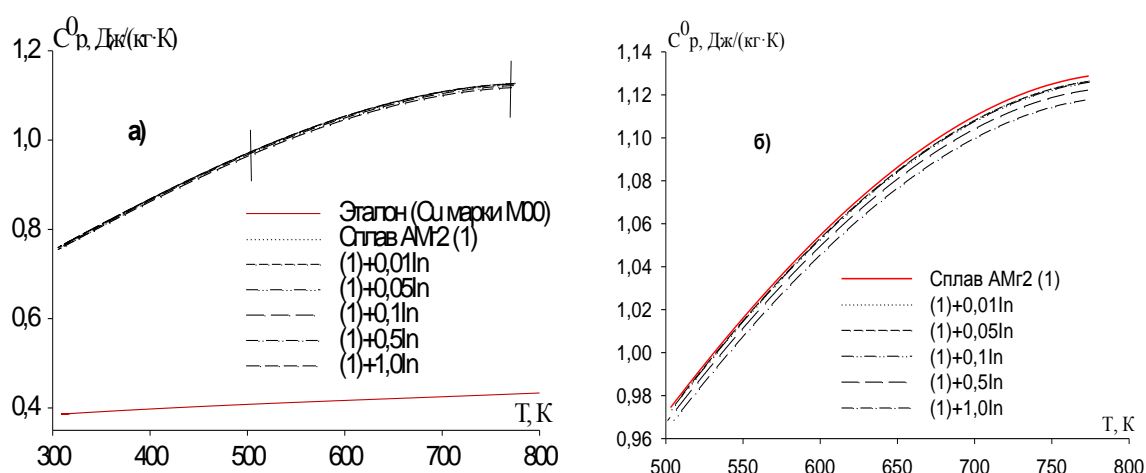


Рис. 4. Зависимость удельной теплоёмкости от температуры для сплава АМг2 с индием (а) и в интервале температур 500–800 К (б)

Таблица 3

Температурная зависимость коэффициента теплоотдачи (Вт/К·м²) сплава АМг2 с индием и эталона (Cu марки М00)

Содержание индия в сплаве, мас. %	T, K					
	300	400	500	600	700	800
Сплав АМг2 (1)	0,00014	0,0017	0,0033	0,0051	0,0064	0,0075
(1)+0,01% In	0,000078	0,0018	0,0035	0,0051	0,0066	0,0079
(1)+0,05% In	0,000067	0,0017	0,0033	0,0049	0,0064	0,0079
(1)+0,1% In	0,000182	0,0019	0,0035	0,0051	0,0066	0,0081
(1)+0,5% In	0,000196	0,0020	0,0037	0,0053	0,0068	0,0080
(1)+1,0% In	0,001286	0,0038	0,0064	0,0091	0,0118	0,0146
Эталон (Cu марки М00)	0,000066	0,0021	0,0039	0,0065	0,0099	0,013

Таблица 4

Значения коэффициентов a, b, c, d в уравнении (10) для сплава АМг2 с индием и эталона (Cu марки М00)

Содержание индия в сплаве, мас. %	a, Дж/кг·К	b·10 ⁻⁴ , Дж/кг·К ²	c·10 ⁻⁷ , Дж/кг·К ³	d·10 ⁻⁹ , Дж/кг·К ⁴	Коэффициент корреляции R, %
Сплав АМг2 (1)	0,4148	9,59	9,59	-1,30	1,00
(1)+0,01% In	0,4148	9,59	9,59	-1,30	1,00
(1)+0,05% In	0,4148	9,59	9,57	-1,30	1,00
(1)+0,1% In	0,4149	9,60	9,55	-1,30	1,00
(1)+0,5% In	0,4154	9,64	9,39	-1,28	1,00
(1)+1,0% In	0,4159	9,70	9,18	-1,26	1,00
Эталон (Cu марки М00)	0,3245	2,75	-2,87	0,142	1,00

Таблица 5

Температурная зависимость изменений термодинамических функций сплава АМг2 с индием

T, K	Эталон (Cu марки М00)	Сплав АМг2 (1)	(1)+0,01% In	(1)+0,05% In	(1)+0,1% In	(1)+0,5% In	(1)+1,0% In
$[H^0(T) - H^0(T_0^*)]$, кДж/кг для сплавов							
300	0,71	1,39	1,39	1,3914	1,3909	1,3873	1,3825
400	39,86	82,57	82,51	82,52	82,48	82,27	81,97
500	80,16	174,71	174,57	174,58	174,51	174,05	173,40
600	121,41	276,22	275,96	275,99	275,87	275,14	274,08
700	163,51	384,72	384,31	384,38	384,19	383,18	381,67
800	206,44	497,06	496,46	496,58	496,31	495,03	493,05
$[S^0(T) - S^0(T_0^*)]$, кДж/кг · К для сплавов							
300	0,0024	0,0046	0,0047	0,0047	0,0047	0,0046	0,0046
400	0,1154	0,2374	0,2372	0,2373	0,2372	0,2365	0,2357
500	0,2058	0,4425	0,4422	0,4423	0,4421	0,4409	0,4393
600	0,2816	0,6274	0,6269	0,6269	0,6267	0,6250	0,6226
700	0,3473	0,7945	0,7938	0,7939	0,7935	0,7914	0,7884
800	0,4055	0,9445	0,9435	0,9437	0,9432	0,9408	0,9371
$[G^0(T) - G^0(T_0^*)]$, кДж/кг для сплавов							
300	-0,0042	-0,004	-0,0043	-0,0043	-0,0043	-0,0043	-0,0043
400	-6,27802	-12,39	-12,3809	-12,38	-12,37	-12,34	-12,30
500	-22,7266	-46,58	-46,5447	-46,54	-46,52	-46,40	-46,23
600	-47,5615	-100,28	-100,154	-100,16	-100,11	-99,85	-99,48
700	-79,5877	-171,48	-171,329	-171,34	-171,27	-170,81	-170,17
800	-117,957	-258,58	-258,33	-258,36	-258,25	-257,57	-256,60

* $T_0 = 298,15\text{K}$.

Заключение

В режиме «охлаждения» по известной теплоёмкости эталонного образца из меди марки М00 установлена температурная зависимость теплоёмкости сплава АМг2 с индием. Получены полиномы, описывающие температурную зависимость теплоёмкости и изменения термодинамических функций (энтальпия, энтропия, энергия Гиббса) для сплава АМг2 с индием в интервале температур 300–800 К. С помощью установленных полиномиальных зависимостей показано, что с ростом температуры теплоёмкость, энтальпия и энтропия сплавов увеличиваются, а значения энергии Гиббса уменьшается. Добавки индия в изученном концентрационном интервале (0,01–1,0 мас.%) практически не влияют на теплоёмкость и термодинамические функции сплава АМг2.

Список литературы

1. Иброхимов Н.Ф., Ганиев И.Н., Одинаев Х.О. Физикохимия сплава АМг2 с редкоземельными металлами. Душанбе: ИО ТТУ им. М.С. Осими, 2016. 153 с.
2. Умарова Т.М., Ганиев И.Н. Коррозия двойных алюминиевых сплавов в нейтральных средах. Душанбе: Дошиш, 2007. 258 с.
3. Sanad S.H., Ismail A.A. Corrosion of Al-Mg alloys in sodium chloride solution // Corros. Prev. and Contr. 1982. 29. No 5. P. 21–23.
4. Rohlfs U., Kaiser H., Kaesche H. Metallkundliche und elektronische untersuchungen die interkristalline corrosion on einer AlMg-9,56 knetlegierung. // Werkst. And Korros., 1979. 30. No 8. P. 529–535.
5. Черпахова Г.Л., Шрейдер А.В. Исследование влияния ионов охлаждающих вод на питтинговую коррозию сплава Al-Mg // ЖПХ. 1972. Т.45. Вып. 9. С. 1958–1–963.
6. Ahmed Zaki. Corrosion and corrosion prevention of Al –

- alloys in desalination planets: a review. *Solution // Anti-Corros. Meth. And Mater.* 1981. 28. No 6. P. 4–7.
7. Muller I.L., Galvele J.R. Pitting potential of high purity binary aluminum alloys // *Corros. Sci.*, 1977. 17. No 12. P. 995–1007.
8. Киров С.А., Салецкий А.М., Харабадзе Д.Э. Изучение явлений переноса в воздухе. Описание задачи №219 общего физического практикума «Молекулярная физика» Физического факультета МГУ. М.: ООП Физ. фак-та МГУ, 2013. 22 с.
9. Матвеев А.Н. Молекулярная физика. М.: Бином, 2010. С. 321–333.
10. Сивухин Д.В. Общий курс физики. М.: Физматлит, 2006. 544 с.
11. Кикоин А.К., Кикоин И.К. Молекулярная физика. М.: Лань, 2008. 480 с.
12. Температурная зависимость теплоемкости и изменений термодинамических функций сплава АЖ 4.5 с оловом / Ганиев И.Н., Сафаров А.Г., Одинаев Ф.Р., Якубов У.Ш., Кабутов К. // *Изв. вузов. Цветная металлургия.* 2019. №1. С. 50–28.
13. Влияние лития на теплоёмкость и изменении термодинамических функции алюминиевого сплава АЖ2,18 / Азимов Х.Х., Ганиев И.Н., Амонов И.Т., Иброхимов Н.Ф. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова.* 2018. Т.16. №1. С. 37–44.
14. Микроструктура и механические свойства сплава Al+6%Li с редкоземельными металлами / Назаров Ш.А., Ганиев И.Н., Ганиева Н.И., Каллиари И. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова.* 2017. Т.15. №2. С. 63–68.
15. Влияния кальция на температурную зависимость удельной теплоемкости и изменение термодинамических функции алюминиевого сплава АЖ5К10 / Ганиев И.Н., Якубов У.Ш., Сангов М.М., Сафаров А.Г. // *Вестник Казанского технологического университета.* 2018. Т.21. №8. С. 11–15.
16. Влияние стронция на теплоемкость и изменение термодинамических функции свинцового сплава ССу3 / Ганиев И.Н., Ниёзов О.Х., Сафаров А.Г., Муллоева Н.М. // *Известия Санкт-Петербургского государственного технического института (технологического университета).* 2018. № 47(73). С. 36–42.
17. Температурная зависимость теплоемкости и изменении термодинамических функции сплава АКМ2, легированного стронцием / Ганиев И.Н., Отаджонов С.Э., Иброхимов Н.Ф., Махмудов М. // *Изв. вузов. Материалы электронной техники.* 2018. Т.21. №1. С. 35–42.
18. Влияние стронция на температурную зависимость удельной теплоемкости и изменение термодинамических функций сплава АЖ5К10 / Якубов У.Ш., Ганиев И.Н., Махмадизода М.М., Сафаров А.Г., Ганиева Н.И. // *Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия естественных наук.* 2018. №3. С. 61–67.
19. Влияния иттрия на удельную теплоемкость и изменение термодинамических функции сплава АЖ2.18 / Эсанов Н.Р., Ганиев И.Н., Хакимов А.Х., Иброхимов Н.Ф. // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия техника технология.* 2018. Т.8. №2 (27). С. 75–84.
20. Умаров М.А., Ганиев И.Н. Температурная зависимость теплоемкости и изменение термодинамических функций свинца марки С2 // *Известия Самарского научного центра РАН.* 2018. Т.20. №1. С. 23–29.
21. Температурная зависимость теплоемкости и изменение термодинамических функции сплавов системы Pb-Ba / Муллоева Н.М., Ганиев И.Н., Эшов Б.Б., Аминбекова М.С. // *Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна.* 2018. №2. С. 69–75.
22. Зиновьев В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. М.: Металлургия, 1989. 384 с.

Поступила 23.07.19

Принята в печать 09.09.19

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-4-34-43>

THERMOPHYSICAL PROPERTIES AND THERMODYNAMIC FUNCTIONS OF ALUMINUM-MAGNESIUM ALLOY AMG2 WITH INDIUM

Izatullo N. Ganiev – DrSc (Chem.), Academician of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan, Professor Osimi Tajik Technical University, Dushanbe, Tajikistan. E-mail: ganiev48@mail.ru

Khilola Ya. Sharipova – Senior Lecturer Khatlon State Medical University. E-mail: simran.77@mail.ru

Khaydar O. Odinazoda – DrSc (Eng.), Professor, Corresponding Member, the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan, Rector Osimi Tajik Technical University, Dushanbe, Tajikistan. E-mail: haydar.odinazoda@mail.ru

Nasim F. Ibrokhimov – PhD (Eng.), Associate Professor Osimi Tajik Technical University, Dushanbe, Tajikistan. E-mail: nasimqon@mail.ru

Nargis I. Ganieva – PhD (Eng.), Associate Professor Osimi Tajik Technical University, Dushanbe, Tajikistan. E-mail: n.ganieva1977@mail.ru

Abstract. Problem Statement (Relevance): The use of aluminum and its alloys as structural materials is due to their corrosion resistance. Aluminum-magnesium alloys have high corrosion resistance in atmospheric and marine conditions, in alkaline solutions and low density acid solutions, and good machining properties. The corrosion resistance of these alloys significantly exceeds the resistance of cast alloys of other aluminum-based systems. A main reason for high corrosion resistance of aluminum-magnesium alloys in various solutions is the formation of a hydrate film that delays the corrosion process. High strength of the alloys of this system is explained by an increase in the distortion of the crystal lattice with an increase in the magnesium content in the solid solution. To improve the corrosion and mechanical properties, aluminum-magnesium alloys are supplemented with additives of various metals. One of the most important characteristics of aluminum-magnesium alloys is heat capacity. Measurement of heat capacity and its temperature dependence play a major role in studies on alloys. There is no information in the literature on the effect of indium additives on the heat capacity of the AMg2 aluminum-magnesium alloy. **Objective:** study of the temperature dependence of the thermophysical properties and thermodynamic functions of the AMg2 aluminum-magnesium alloy with indium. **Methods Used:** There are many described methods for measuring the heat capacity of solids. In this paper we use the method of comparing the cooling curves of the reference and test samples in the "cooling" mode using a copper standard (Cu grade M00) in the range of 300–800 K. **Novelty:** For the first time, the effect of indium additives on the thermophysical properties and changes in the thermodynamic functions of the AMg2 aluminum-magnesium alloy was studied. **Findings:** We identified mathematical models describing the temperature dependence of the heat capacity of the AMg2 alloy on the indium content and changes in their thermodynamic functions in the indicated temperature range. As a result of the studies, it was shown that with increasing temperature the heat capacity, enthalpy and entropy of the alloys increase, and the value of the Gibbs energy decreases. Additives of indium in the AMg2 alloy slightly reduce the value of these functions. **Practical Relevance:** The obtained characteristics of the thermophysical properties and thermodynamic functions of the AMg2 aluminum-magnesium alloy with indium will be added to the corresponding handbooks of thermophysics of materials and may be used in the design of parts and machines from these alloys.

Keywords: AMg2 aluminum alloy, indium, heat capacity, "cooling" mode, enthalpy, entropy, Gibbs energy.

References

1. Ibrokhimov N.F., Ganiev I.N., Odinaev Kh.O. *Fizikokhimiya splava AMg2 s redkozemelnymi metallami* [Physicochemistry of AMg2 alloy with rare earth metals]. Dushanbe: Osimi TTU, 2016, 153p. (In Russ.)
2. Umarova T.M., Ganiev I.N. *Korroziya dvoynykh alyuminiyevykh splovov v neitralnykh sredakh* [Corrosion of double aluminum alloys in neutral media]. Dushanbe: Donish, 2007, 258p. (In Russ.)
3. Sanad S.H., Ismail A.A. Corrosion of Al-Mg alloys in sodium chloride solution. *Corros. Prev. and Contr.*, 1982, 29, no. 5, pp. 21–23.
4. Rohlfes U., Kaiser H., Kaesche H. Metallkundliche und elektronische Untersuchungen über die interkristalline Korrosion an einer AlMg-9,56 Knetlegierung. *Werkst. und Korros.*, 1979, 30, no. 8, pp. 529–535.
5. Cherepakova G.L., Shreider A.V. Study of the effect of cooling water ions on pitting corrosion of the Al-Mg alloy. *Zhurnal prikladnoy khimii* [Journal of Applied Chemistry], 1972, vol. 45, iss. 9, pp. 1958–1963. (In Russ.)
6. Ahmed Zaki. Corrosion and corrosion prevention of Al – alloys in desalination plants: a review. *Solution. Anti-Corros. Meth. And Mater.*, 1981, 28, no. 6, pp. 4–7.
7. Muller I.L., Galvele J.R. Pitting potential of high purity binary aluminum alloys. *Corros. Sci.*, 1977, 17, no. 12, pp. 995–1007.
8. Kirov S.A., Saletsky A.M., Kharabadze D.E. *Izucheniye yavleniya perenosa v vozdukh. Opisaniye zadachi #219 obshchego fizicheskogo praktikuma "Molekulyarnaya fizika" Fizicheskogo fakulteta MGU* [Study of airborne transport phenomena. Task description No. 219 of the general workshop on physics "Molecular Physics" at the Physics Department of MSU]. Moscow: OOP Physics Department of MSU, 2013, 22 p. (In Russ.)
9. Matveev A.N. *Molekulyarnaya fizika* [Molecular physics]. Moscow: Binom, 2010, pp. 321–333. (In Russ.)
10. Sivukhin D.V. *Obshchiy kurs fiziki* [General course on physics]. Moscow: Fizmatlit, 2006, 544 p. (In Russ.)
11. Kikoin A.K., Kikoin I.K. *Molekulyarnaya fizika* [Molecular physics]. Moscow: Lan, 2008, 480 p. (In Russ.)
12. Ganiev I.N., Safarov A.G., Odinaev F.R., Yakubov U.Sh., Kabutov K. Temperature dependence of heat capacity and changes in thermodynamic functions of the AZh4.5 alloy with tin. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya* [Izvestiya. Non-ferrous metallurgy], 2019, no. 1, pp. 50–58. (In Russ.)
13. Azimov Kh.Kh., Ganiev I.N., Amonov I.T., Ibrokhimov N.F. The effect of lithium on heat capacity and changes in thermodynamic functions of the AZh2.18 aluminum alloy. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2018, vol. 16, no. 1, pp. 37–44. (In Russ.)
14. Nazarov Sh.A., Ganiev I.N., Ganieva N.I., Calliari I. Microstructure and mechanical properties of Al + 6% Li alloy with rare earth metals. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2017, vol. 15, no. 2, pp. 63–68. (In Russ.)
15. Ganiev I.N., Yakubov U.Sh., Sangov M.M., Safarov A.G. The effects of calcium on the temperature dependence of specific heat capacity and changes in thermodynamic functions of the AZh5K10 aluminum alloy. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of Kazan Technological University], 2018, vol. 21, no. 8, pp. 11–15. (In Russ.)
16. Ganiev I.N., Niyozov O.Kh., Safarov A.G., Mulloeva N.M. The effect of strontium on heat capacity and changes in thermodynamic functions of the SSu3 lead alloy. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo instituta (tekhnologicheskogo universiteta)* [Bulletin of the Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University)], 2018, no. 47(73), pp. 36–42. (In Russ.)
17. Ganiev I.N., Otadzhonov S.E., Ibrokhimov N.F., Makhmudov M. Temperature dependence of heat capacity and changes in

- thermodynamic functions of the AKIM2 alloy doped with strontium. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoy tekhniki* [News of universities. Materials of electronics engineering], 2018, vol. 21, no. 1, pp. 35–42. (In Russ.)
18. Yakubov U.Sh., Ganiev I.N., Makhmadizoda M.M., Safarov A.G., Ganieva N.I. The effect of strontium on the temperature dependence of specific heat capacity and changes in thermodynamic functions of the AZh5K10 alloy. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta tekhnologii i dizaina. Seriya estestvennykh nauk* [Vestnik of St. Petersburg State University of Technology and Design. Series: Natural sciences], 2018, no. 3, pp. 61–67. (In Russ.)
19. Esanov N.R., Ganiev I.N., Hakimov A.Kh., Ibrokhimov N. F. The influence of yttrium on specific heat capacity and changes in thermodynamic functions of the AZh2.18 alloy. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya tekhnika i tekhnologii* [Proceedings of South-West State University. Series Technics and Technologies], 2018, vol. 8, no. 2 (27), pp.75–84. (In Russ.)
20. Umarov M.A., Ganiev I.N. Temperature dependence of heat capacity and changes in thermodynamic functions of C2 lead. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2018, vol.20, no. 1, pp. 23–29. (In Russ.)
21. Mulloeva N.M., Ganiev I.N., Eshov B.B. Aminbekova M.S. Temperature dependence of heat capacity and changes in thermodynamic functions of alloys of the Pb-Ba system]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta tekhnologii i dizaina*. [Vestnik of St. Petersburg State University of Technology and Design], 2018, no. 2, pp. 69–75. (In Russ.)
22. Zinoviev V.E. *Teplofizicheskie svoystva metallov pri vysokikh temperaturakh* [Thermophysical properties of metals at high temperatures]. Moscow: Metallurgy, 1989, 384 p. (In Russ.)

Received 23/07/19

Accepted 09/09/19

Образец для цитирования

Теплофизические свойства и термодинамические функции алюминиево-магниевого сплава АМг2 с индием / Ганиев И.Н., Шарипова Х.Я., Одиназода Х.О., Иброхимов Н.Ф., Ганиева Н.И. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т.17. №4. С. 34–43. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-4-34-43>

For citation

Ganiev I.N., Sharipova Kh.Ya., Odinzoda Kh.O., Ibrokhimov N.F., Ganieva N.I. Thermophysical Properties and Thermodynamic Functions of Aluminum-Magnesium Alloy AMg2 with Indium. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2019, vol. 17, no. 4, pp. 34–43. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-4-34-43>

СТАНДАРТИЗАЦИЯ, СЕРТИФИКАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ

УДК 519.718.2

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-4-44-51>

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СВОЙСТВ ВАКУУМНЫХ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ УСТАНОВЛЕНИЯ СИСТЕМНЫХ СВЯЗЕЙ

Полякова М.А.¹, Янсаитова М.И.²

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

²Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). В статье показано применение функционально-целевого анализа для системы «изделие – вакуумное ионно-плазменное покрытие». На примере технологического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия разработана последовательность установления системных связей в системе «изделие – вакуумное ионно-плазменное покрытие». Проведен анализ функций каждой подсистемы и установлены связи между ними. **Целью работы** является разработка методики выбора показателей качества вакуумных ионно-плазменных покрытий на основе определения системных связей. **Используемые методы.** Системные связи в системе «изделие – вакуумное ионно-плазменное покрытие» определены с использованием функционально-целевого анализа. Это позволило произвести декомпозицию данной технической системы и определить связь между функциями и свойствами для каждой подсистемы. **Новизна** проведенного исследования заключается в анализе процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия как сложной технологической системы, что позволяет установить существующие связи между свойствами покрытия, которые формируются в процессе его нанесения, и требуемыми функциональными характеристиками изделия с покрытием. **Результат.** Полученные результаты теоретического исследования являются развитием работ в области стандартизации свойств покрытий с использованием функциональных связей на различных уровнях технической системы «изделие – покрытие». **Практическая значимость.** Предложенная методика позволяет установить системные связи между функциями изделия с покрытием и его свойствами, что решает задачу выбора перечня свойств для нормирования в нормативной, конструкторской и технической документации.

Ключевые слова: вакуумное ионно-плазменное покрытие, система «изделие – покрытие», свойство, функционально-целевой анализ, нормирование, нормативная документация.

Введение

Одним из направлений обеспечения эксплуатационных свойств поверхностного слоя является нанесение покрытий. Анализ требований действующих стандартов показал, что в настоящее время действующие стандарты распространяются на покрытия, наносимые электрохимическим, химическим и горячим способами. Отсутствуют стандарты, регламентирующие требования к показателям качества вакуумных ионно-плазменных покрытий [1–5]. Кроме того, в действующих стандартах регламентируются свойства, обусловленные только технологией нанесения. При этом не учитываются свойства,

обусловленные функциями изделия, что в значительной степени ограничивает возможности конструктора назначать вид покрытия, состав, его физико-химические свойства в зависимости от условий эксплуатации изделий. Это связано со сложностью нормирования показателей качества для включения в нормативную и конструкторско-технологическую документацию, поэтому необходимо использовать принципиально новые подходы для нормирования показателей качества вакуумных ионно-плазменных покрытий.

Под вакуумной ионно-плазменной технологией понимается совокупность методов обработки с использованием трех необходимых условий: наличие вакуума, наличие вещества в плазменном состоянии, ускорение плазменных потоков и

пучков заряженных частиц с помощью электрических и магнитных полей. Вакуумные ионно-плазменные технологии рассматриваются в настоящее время как наиболее перспективные технологии для придания специальных свойств поверхности изделий авиационной техники. Они позволяют создавать сложные композиции различных видов покрытий, а также осуществлять комплексную обработку с предварительным диффузионным модифицированием [1–3, 5].

По своей сущности покрытие не может существовать отдельно от подложки (или изделия), на которое оно наносится. Как известно, свойства покрытий, а значит, их свойства зависят не только от материала и технологических режимов нанесения, но и от свойств материала, из которого изготовлено изделие. С этой точки зрения при выборе свойств покрытия, которые следует нормировать в нормативной и технической документации, возникает необходимость рассматривать систему «изделие – вакуумное ионно-плазменное покрытие».

Методы исследования

Для установления функциональных связей в системе «покрытие – изделие» в данной работе предлагается использовать функционально-целевой анализ (ФЦА), разработанный учеными Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова [6–11]. Функционально-целевой подход позволяет комбинировать технические решения для обеспечения отдельной функции и определять их согласованность с другими уже существующими функциями. Применение ФЦА заключается в дезинтеграции комплексного качества изделия на измеримые составляющие, называемые единичными показателями. В зависимости от целей использования можно выделить потребительские функции, которые должно выполнять изделие, и поставить в соответствие им показатели качества, регламентируемые в стандартах [12–14].

Рассмотрим особенности применения ФЦА для системы «изделие – вакуумное ионно-плазменное покрытие». Анализируемую систему можно разделить на ряд подсистем, для каждой из которых провести функционально-целевой анализ. Это позволит определить функции каждой подсистемы, установить связи между ними, что в конечном итоге позволит выбрать и научно обосновать показатели качества вакуумного

ионно-плазменного покрытия, которые необходимо нормировать в нормативной и конструкторско-технологической документации.

В этой связи методика выбора показателей качества вакуумных ионно-плазменных покрытий (**рис. 1**) состоит из следующих этапов:

1) функционально-целевой анализ системы «изделие – вакуумное ионно-плазменное покрытие»;

2) функционально-целевой анализ элемента «вакуумное ионно-плазменное покрытие» системы «изделие – вакуумное ионно-плазменное покрытие»;

3) определение функций технологического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия.

Для выявления функций изделия с покрытием, покрытий, технологического процесса нанесения покрытий необходимо рассмотреть отдельно каждый элемент данной системы.

Результаты исследования и их обсуждение

Поскольку покрытие наносится на определенное изделие, которое в свою очередь является составной частью узла или механизма, поэтому ФЦА системы «изделие – вакуумное ионно-плазменное покрытие» позволяет установить связи между функциональными свойствами покрытия с учетом требуемых свойств изделия. Характеристиками данной системы являются физико-механические свойства покрытий, геометрические характеристики самого изделия, материалы изделия и покрытия, а также масса изделия с покрытием.

В свою очередь, функциями в данной системе, то есть зависимыми от вышеприведенных характеристик параметрами, являются эксплуатационные характеристики. Условия эксплуатации изделий определяются напряженным состоянием, скоростью скольжения сопряженных поверхностей изделий, температурой нагрева, газовой средой, наработкой и другими факторами [1, 3, 5]. Поэтому для изделий с вакуумным ионно-плазменным покрытием износостойкость, коррозионная стойкость, эрозионная стойкость, теплостойкость, термостойкость и трещиностойкость являются наиболее важными.

Схема функционально-целевого анализа системы «изделие – вакуумное ионно-плазменное покрытие» (**рис. 2**) заключается в установлении связей между функциями изделия с покрытием и свойствами покрытия.



Рис. 1. Обобщенная схема установления системных связей в системе «изделие – вакуумное ионно-плазменное покрытие»



Рис. 2. Связи между функциями изделия с ионно-плазменным покрытием и свойствами покрытия в системе «изделие – вакуумное ионно-плазменное покрытие»

Таким образом, физико-механические и геометрические характеристики оказывают влияние на все рассматриваемые эксплуатационные характеристики (функции изделия) в системе «изделие – вакуумное ионно-плазменное покрытие». Износостойкость, коррозионная и эрозионная стойкость зависят как от материала изделия, так и материала покрытия. Более того, материал покрытия определяет степень термостойкости, трещиностойкости. С другой стороны, эти свойства также зависят от массы изделия с покрытием.

Следующим этапом является проведение ФЦА для самого покрытия, что позволило определить его свойства как элемента системы «изделие – вакуумное ионно-плазменное покрытие» (рис. 3).

Выходными показателями технологического процесса нанесения покрытий вакуумным ионно-плазменным напылением, характеризующими только покрытие в системе «изделие – вакуумное ионно-плазменное покрытие», являются толщина, адгезия, микротвердость, шероховатость, пористость покрытия. Технологический процесс нанесения вакуумных ионно-плазменных покрытий представляет собой ряд последовательно выполняемых основных, вспомогательных и обслуживающих операций. Основными операциями технологического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия являются предварительная подготовка поверхности изделия перед нанесением покрытия, ионная очистка, предварительный нагрев поверхности изделия потоком ионов катода, которые сопровождаются следующими этапами формирования покрытия: создание потока напыляемых частиц, взаимодействие плазмы и рабочего газа с поверхностью изделия, осаждение ионов на поверхности изделия и охлаждение изделия. К вспомогательным операциям техно-

логического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия относится контроль параметров поверхности изделия перед нанесением покрытия и свойств покрытий после осаждения вакуумного ионно-плазменного покрытия. Данные виды контроля осуществляются в соответствии с конструкторско-технологической документацией. К обслуживающей операции технологического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия относится техническое обслуживание оборудования, на котором непосредственно осуществляется нанесение вакуумного ионно-плазменного покрытия.

Поскольку формирование вакуумного ионно-плазменного покрытия представляет собой ряд последовательно протекающих процессов, рассмотрим функциональные связи между технологическими параметрами процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия, этапами его формирования и свойствами покрытия (рис. 4).

Чтобы обеспечить выполнение эксплуатационных свойств деталей газотурбинного двигателя (ГТД), на которые наносится покрытие TiN вакуумным ионно-плазменным напылением, необходимо правильно выбрать свойства этого покрытия для регламентации в нормативной, технической и конструкторской документации. Для этого устанавливают функции изделия с покрытием. В работах [15–17] показана перспективность нанесения TiN на компрессорные лопатки ГТД для продления срока их службы.

Рассмотрим особенности применения ФЦА для установления существующих системных и функциональных связей в системе «изделие – вакуумное ионно-плазменное покрытие». На рис. 5 представлена обобщенная схема взаимосвязи функциональных свойств вакуумного ионно-плазменного покрытия с процессами его получения.

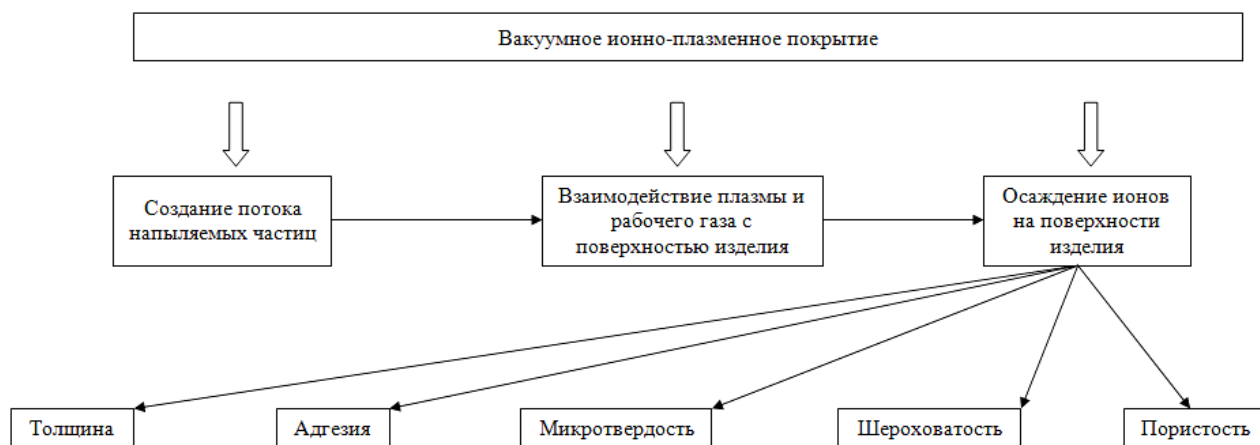


Рис. 3. Взаимосвязь этапов формирования вакуумного ионно-плазменного покрытия и его свойствами в системе «вакуумное ионно-плазменное покрытие»



Рис. 4. Структурно-функциональная схема технологического процесса нанесения вакуумных ионно-плазменных покрытий

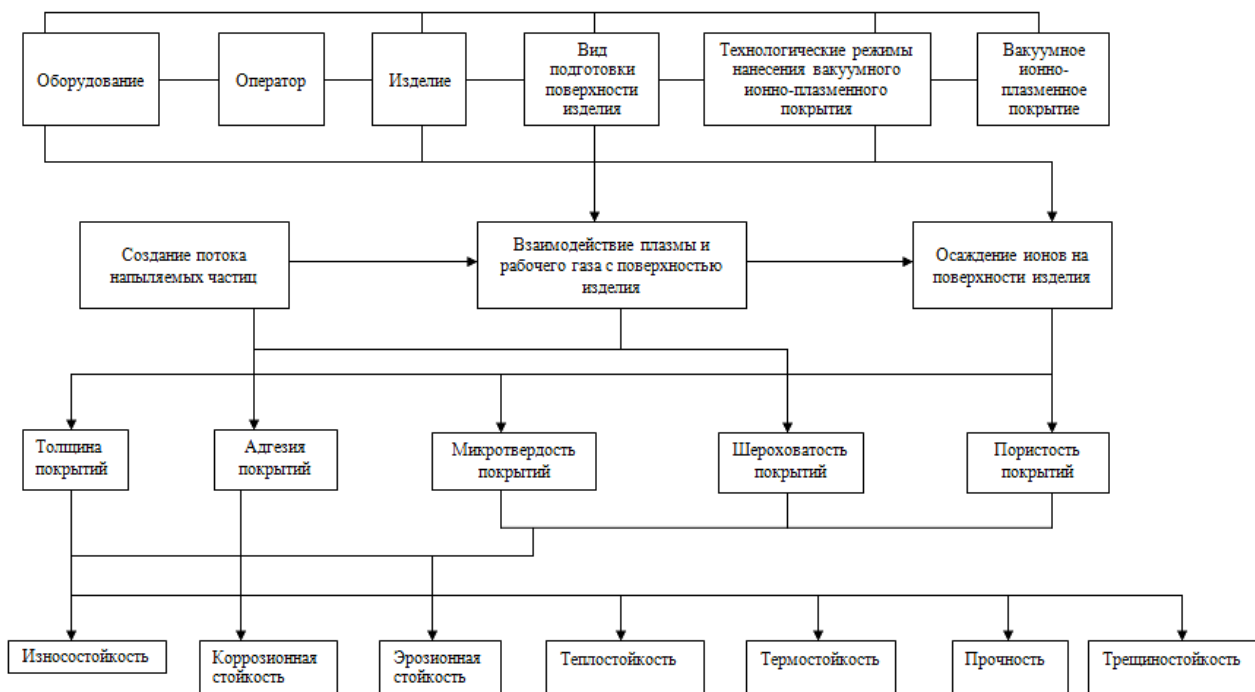


Рис. 5. Взаимосвязь эксплуатационных свойств вакуумного ионно-плазменного покрытия с процессами его формирования

Заключение

Таким образом, использование функционально-целевого анализа дает возможность установить системные связи между функциями изделия с покрытием и его свойствами в сложной технологической системе. Разработанная методика выбора свойств вакуумных ионно-плазменных покрытий позволяет установить взаимосвязь между требованиями к функциональным свойствам этого покрытия и техническими возможностями процесса формирования покрытия данным методом. Использование разработанного подхода даст возможность решить задачу выбора перечня свойств покрытия для нормирования в нормативной, конструкторской и технической документации.

Список литературы

1. Будилов В.В., Мухин В.С., Ягафаров И.И. Технологическая наследственность, качество поверхности, точность и эксплуатационные свойства деталей с покрытиями из плазмы вакуумного дугового разряда: монография. М.: Машиностроение, 2015. 269 с.
2. Сысоев Ю.А. Обеспечение качества вакуумно-дуговых ионно-плазменных покрытий // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. 2014. №63. С. 84–90.
3. Киреев Р.М., Ягафаров И.И. Обеспечение точности деталей при ионно-плазменном нанесении покрытий // Вестник УГАТУ. 2012. №1(46), Т.16. С. 88–93.
4. Фатхутдинов Р.А. «Функции-процессы» в управлении конкурентоспособностью // Стандарты и качество. 2008. №2. С. 74–78.
5. Мухин В.С., Шехтман С.Р. Поверхность технического объекта: физика, химия, механика, нанотехнология модифицирования // Вестник УГАТУ. 2007. №1 (19). Т.9. С. 84–91.
6. Рубин Г.Ш., Полякова М.А. Развитие научных основ стандартизации // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 1. С. 97–101.
7. Рубин Г.Ш., Гун Г.С., Полякова М.А. Стандартизация метизной продукции: особенности, проблемы, перспективы развития // Известия ТулГУ. Технические науки. 2014. Вып. 10. Ч. 2. С. 27–34.
8. Рубин Г.Ш. Квалиметрия метизного производства. Магнитогорск: ФГБОУ ВПО «МГТУ», 2012. 167 с.
9. Данилова Ю.В., Полякова М.А., Рубин Г.Ш. Поиск консенсуса между потребителем и производителем – важный этап при разработке нормативных документов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. № 2. С. 79–84.
10. Рубин Г.Ш. Функционально-целевой анализ качества изделий // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2011. №2. С. 29–30.
11. Функционально-целевой анализ как метод структурирования свойств и функций металлоизделий / Рубин Г.Ш., Чукин М.В., Гун Г.С., Полякова М.А. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2016. Т. 59. №10. С. 715–719.
12. Рубин Г.Ш., Данилова Ю.В., Полякова М.А. Функционально-целевой анализ как метод структурирования функций и свойств металлоизделий. Сообщение 1 // Производство проката. 2015. № 5. С. 27–31.
13. Рубин Г.Ш., Данилова Ю.В., Полякова М.А. Функционально-целевой анализ как метод структурирования функций и свойств металлоизделий. Сообщение 2 // Производство проката. 2015. № 6. С. 38–43.
14. Камалутдинов И.М. Совершенствование конструкции и технологии производства геофизического кабеля на основе функционально-целевого анализа качества продукции: дис ... канд. техн. наук // Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова. Магнитогорск, 2010. 143 с.
15. Мубояджян С.А., Александров Д.А., Горлов Д.С. Нанослойные упрочняющие покрытия для защиты стальных и титановых лопаток компрессора ГТД // Авиационные материалы и технологии. 2011. С. 3–8.
16. Повышение коррозионной стойкости стальных лопаток компрессора ГТД путем применения ионно-плазменного покрытия / В.Я. Белоус, А.Д. Жирнов, А.Н. Луценко, С.А. Мубояджян // Авиационные материалы и технологии. 2006. С. 53–60.
17. Технологические особенности формирования полифункциональных наноструктурированных покрытий нитрида титана для компрессорных лопаток авиационных ГТД / Ю.П. Тарасенко, И.Н. Царева, Е.П. Кочеров, Л.М. Вязовская // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2012. №3(34). С. 296–302.

Поступила 25.11.19

Принята в печать 09.12.19

METHOD FOR DETERMINING THE PROPERTIES OF VACUUM ION-PLASMA COATINGS BY ESTABLISHING SYSTEM RELATIONSHIPS

Marina A. Polyakova – DrSc (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Materials Processing Technologies
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
E-mail: m.polyakova@magtu.ru. ORCID 0000-0002-1597-8867

Milyausha I. Yansaitova – Post-Graduate Student
Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia. E-mail: milyausha.yansaitova@mail.ru

Abstract. Problem Statement (Relevance): The paper shows the application of a functional-target analysis for the system “item – vacuum ion-plasma coating”. Using the vacuum ion-plasma coating technological process as an example, the authors developed a scheme for establishing system relationships in the system “item – vacuum ion-plasma coating”. The functions of every subsystem were analyzed and the relationships between them were established. **Objectives:** To develop the method for selecting quality properties of vacuum ion-plasma coatings by establishing the system relationships. **Methods Applied:** The system relationships in the system “item – vacuum ion-plasma coating” were determined using the functional-target analysis. It made it possible to make a decomposition of the whole technical system and to establish the relationships between the functions and the properties for every subsystem. **Novelty:** The novelty of the study lies in the analysis of a vacuum ion-plasma coating process as a complicated technological system, which allows us to establish the existing relationships between the coating properties formed during the technological process and the required functional characteristics of the coated item. **Findings:** The obtained results of this theoretical study are considered to follow the studies in the standardization of coating properties using functional relationships at different stages of the technical system “item – vacuum ion-plasma coating”. **Practical Relevance:** The proposed method allows us to establish system relationships between the functions of the coated item and its properties solving the problem of selecting a list of properties for their regulation in normative, design and technical documentation.

Keywords: vacuum ion-plasma coating, system “item – vacuum ion-plasma coating”, property, functional-target analysis, regulation, normative documentation.

References

1. Budilov V.V., Mukhin V.S., Yagafarov I.I. *Tekhnologicheskaya nasledstvennost, kachestvo poverkhnosti, tochnost i ekspluatatsionnye svoystva detaley s pokrytiyami iz plazmy vakuumnogo dugovogo razryada: monografiya* [Technological heredity, surface quality, accuracy and operational properties of parts with vacuum arc plasma coatings: monograph]. Moscow: Mechanical Engineering, 2015, 269 p. (In Russ.)
2. Sysoev Yu.A. Quality assurance of vacuum-arc ion-plasma coatings. *Otkrytye informatsionnye i kompyuternye integrirovannye tekhnologii* [Open information and computer integrated technologies], 2014, no. 63, pp. 84–90. (In Russ.)
3. Kireev R.M., Yagafarov I.I. Ensuring the accuracy of items when applying ion-plasma coatings. *Vestnik UGATU* [Vestnik of USATU], 2012, no. 1 (46), pp. 88–93. (In Russ.)
4. Fatkhutdinov R.A. “Functions-processes” in the competitiveness management. *Standarty i kachestvo* [Standards and quality], 2008, no. 2, pp. 74–78. (In Russ.)
5. Mukhin V.S., Shekhtman S.R. The technical object surface: physics, chemistry, mechanics, nanotechnology of modification. *Vestnik UGATU* [Vestnik of USATU], 2007, no. 1 (19), vol. 9, pp. 84–91. (In Russ.)
6. Rubin G.Sh., Polyakova M.A. Development of standardization scientific basics. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2014, no. 1, pp. 97–101. (In Russ.)
7. Rubin G.Sh., Gun G.S., Polyakova M.A. Standardization of metalware: features, problems, prospects of development. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of TulSU. Technical sciences], 2014, no. 10, part 2, pp. 27–34. (In Russ.)
8. Rubin G.Sh. *Kvalimetriya metiznogo proizvodstva* [Qualimetry of metalware production]. Magnitogorsk: FSBEI HPE NMSTU, 2012, 167 p. (In Russ.)
9. Danilova Yu.V., Polyakova M.A., Rubin G.Sh. The search for consensus between customers and manufacturers as an important stage in the development of regulatory documents. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2015, no. 2, pp. 79–84. (In Russ.)
10. Rubin G.Sh. Functional-target analysis of products quality. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2011, no. 2, pp. 29–30. (In Russ.)
11. Rubin G.Sh., Chukin M.V., Gun G.S., Polyakova M.A. Functional-target analysis as a method for structuring the metalware properties and functions. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chemaya metallurgiya* [Izvestiya. Ferrous Metallurgy], 2016, vol. 59, no. 10, pp. 715–719. (In Russ.)
12. Rubin G.Sh., Danilova Yu.V., Polyakova M.A. Functional-target analysis as a method for structuring metalware functions and properties. Report 1. *Proizvodstvo prokata* [Production of rolled products], 2015, no. 5, pp. 27–31. (In Russ.)
13. Rubin G.Sh., Danilova Yu.V., Polyakova M.A. Functional-target analysis as a method for structuring metalware functions and properties. Report 2. *Proizvodstvo prokata* [Production of rolled products], 2015, no. 6, pp. 38–43. (In Russ.)
14. Kamalutdinov I.M. *Sovershenstvovanie konstruksii i tekhnologii proizvodstva geofizicheskogo kabelya na osnove funktsionalno-tselevogo analiza kachestva produktsii*. Diss.

- kand. tekhn. nauk [Improving the design and production technology of geophysical cables applying a functional-target analysis of the product quality. PhD thesis]. Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2010, 143 p.
15. Muboyadzhyan S.A., Aleksandrov D.A., Gorlov D.S. Nanolayer hardening coatings for the protection of steel and titanium blades of gas turbine engine compressors. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation materials and technologies], 2011, pp. 3–8. (In Russ.)
 16. Belous V.Ya., Zhironov A.D., Lutsenko A.N., Muboyadzhyan S.A. Increasing the corrosion resistance of gas turbine engine compressor steel blades by applying an ion-plasma coating. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation materials and technologies], 2006, pp. 53–60. (In Russ.)
 17. Tarasenko Yu. P., Tsareva I.N., Kocherov E.P., Vyazovskaya L.M. Technological features of the formation of polyfunctional nanostructured titanium nitride coatings for aircraft gas turbine engine compressor blades. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta* [Vestnik of Samara State Aerospace University], 2012, no. 3 (34), pp. 296–302. (In Russ.)

Received 25/11/19

Accepted 09/12/19

Образец для цитирования

Полякова М.А., Янсаитова М.И. Методика определения свойств вакуумных ионно-плазменных покрытий на основе установления системных связей // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т.17. №4. С. 44–51. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-4-44-51>

For citation

Polyakova M.A., Yansaitova M.I. Method for Determining the Properties of Vacuum Ion-Plasma Coatings by Establishing System Relationships. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2019, vol. 17, no. 4, pp. 44–51. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-4-44-51>

НАДЕЖНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

УДК 534.014.3

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-4-52-55>

ИНЕРТНЫЕ РЕАКТАНСЫ ВИБРАЦИОННЫХ МАШИН

Попов И.П.

Курганский государственный университет, Курган, Россия

Аннотация. Показано, что производной работы или соответствующей ей механической энергии является тепловая мощность, которую в электротехнике называют активной. Эта мощность является пульсирующей, но знакопостоянной, поскольку тепловой поток при механических колебаниях необратим. Производная кинетической энергии по времени является знакопеременной, поэтому ее аналоги в электротехнике называют реактивными. Большинство приводов машин и механизмов являются электромеханическими, поэтому реактивная механическая мощность при колебаниях массивных заготовок, деталей, узлов и т.п. в соответствии с законом сохранения энергии трансформируется в реактивную электрическую мощность питающей сети, существенно ухудшая качество тока и вызывая заметные потери в проводах при ее циркуляции. В этой связи задача корректного учета как активной, так и реактивной механических мощностей для целей энергосбережения, а также силовых конструкторских расчетов является актуальной. **Цель работы** заключается в установлении взаимосвязи между активной, реактивной и полной мощностями при механических колебаниях. Реактивная (инерционная) мощность представляет собой чисто мнимую величину. Активная (тепловая) мощность при любом характере движения, например, развиваемая силой трения скольжения, является вещественной величиной. Активная и реактивная механические мощности, являясь условно «ортогональными», не складываются. Для полной мощности справедлив аналог теоремы Пифагора (точно так же, как в электротехнике). Инертный и упругий реактансы характеризуют свойства массивного и упругого тел оказывать сопротивление приводу, понуждающему их совершать колебания. В силу специфики работы вибрационных машин инертные реактансы являются одними из ключевых их параметров.

Ключевые слова: инертный, упругий реактансы, привод, активная, реактивная, полная мощности.

Введение

Колебания инертного тела характеризуются, в частности, работой, совершаемой при преодолении сил трения, и кинетической энергией, запасаемой в теле. Производной работы или соответствующей ей механической энергии является тепловая мощность, которую в электротехнике называют *активной*. Эта мощность является пульсирующей, но знакопостоянной, поскольку тепловой поток при механических колебаниях необратим. Производная кинетической энергии по времени является знакопеременной, поэтому ее аналоги в электротехнике называют реактивными.

Большинство приводов вибрационных машин и механизмов [1, 2] являются электромеханическими, поэтому реактивная механическая мощность при колебаниях массивных заготовок, деталей, узлов и т.п. в соответствии с законом сохранения энергии трансформируется в реактив-

ную электрическую мощность питающей сети, существенно ухудшая качество тока и вызывая заметные потери в проводах при ее циркуляции (до 10% реактивной мощности).

В этой связи задача корректного учета как активной, так и реактивной механических мощностей для целей энергосбережения, а также силовых конструкторских расчетов является актуальной.

Целью работы является теоретическое описание разновидностей мощности вибрационных машин на основе представления о механических реактансах.

Задача заключается в аналитическом представлении энергетического аспекта вибрационных явлений.

Актуальность исследования обусловлена негативным влиянием механических реактансов на качество тока питающей сети (появление гармоник с частотой механических колебаний, трансформация механической реактивной мощности в электрическую реактивную мощность и др.).

© Попов И.П., 2019

Инертный реактанс и инерционная мощность

Пусть к массивному телу приложена синусоидальная сила

$$f = F_m \cos \omega t, \quad (1)$$

где F_m – амплитуда, Н; ω – частота, рад/с.

В соответствии с основной аксиомой механики

$$F_m \cos \omega t = m \frac{dv}{dt}.$$

Здесь m – инертная масса, кг; v – мгновенная скорость, м/с.

$$\int_0^v dv = \frac{F_m}{m} \int_0^t \cos \omega t dt,$$

$$v = \frac{F_m}{\omega m} \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right).$$

Из этого следует, что амплитуда имеет вид

$$V_m = \frac{F_m}{\omega m} = \frac{F_m}{X_m}.$$

Здесь X_m – инертный реактанс, кг · рад/с.

Полученное выражение можно представить в комплексном виде.

$$\dot{V} = -i \frac{\dot{F}}{\omega m} = \frac{\dot{F}}{i \omega m} = \frac{\dot{F}}{\underline{X}_m}. \quad (2)$$

Знак « $-i$ » обусловлен тем, что фаза мгновенной скорости отстает от фазы силы на $\pi/2$.

Комплексные величины, соответствующие синусоиде, обозначаются точкой сверху. Прочие – подчеркиваются снизу.

В соответствии с (2) инертный реактанс равен

$$\underline{X}_m = i \omega m.$$

Он характеризует свойство массивного тела оказывать сопротивление приводу, понуждающему его совершать колебания. Вполне закономерно, что он определяется не только массой, но и частотой.

В механику реактансы введены А.Г. Вебстером (Webster) в начале XX века.

Дуально-инверсным аналогом формулы (2) является закон Ома для участка электрической цепи. При этом V соответствует току, F – ЭДС, X_m – индуктивному реактивному сопротивлению.

В соответствии с выражением (1) вектор силы ориентирован вдоль вещественной оси комплекс-

ной плоскости, поэтому в соответствии с формулой (2) вектор скорости ориентирован вдоль мнимой оси (т.е. скорость – чисто мнимая).

Мгновенное значение реактивной (инерционной) мощности равно

$$q_i = f v.$$

Эта величина является мнимой, поскольку является произведением мнимой величины v на действительную f .

Реактивная (инерционная) мощность в комплексном виде

$$\dot{Q}_i = \dot{F} \dot{V}. \quad (3)$$

В электротехнике величина реактивной мощности отождествляется с ее амплитудой [3, 4]. Аналогично этому, учитывая (2), реактивная (инерционная) мощность равна

$$Q_i = \frac{F^2}{X_m} = V^2 X_m.$$

Механический резистанс и тепловая мощность

Пусть сила трения определяется формулой

$$f = r v,$$

где r – коэффициент пропорциональности, Н · с/м.

Отсюда скорость равна

$$v = \frac{f}{r}.$$

Дуально-инверсным аналогом этой формулы является закон Ома для участка электрической цепи. При этом v соответствует току, f – ЭДС, r – активному сопротивлению (электрическому резистансу).

Поскольку вектор силы ориентирован вдоль вещественной оси комплексной плоскости (см. (1)) и механический резистанс r – вещественная величина, величина v является тоже вещественной.

Мгновенное значение активной (тепловой) мощности равно

$$p = f v.$$

Активная мощность тоже вещественная величина, поскольку является произведением вещественных величин.

Активная (тепловая) мощность в комплексном виде

$$\underline{P} = \dot{F} \dot{V}.$$

В электротехнике величина активной мощности отождествляется с ее средним за период значением. Это положение обобщается и на механическую активную (тепловую) мощность P .

Полная механическая мощность

В соответствии с (3) и (2) реактивная (инерционная) мощность представляет собой чисто мнимую величину

$$\dot{Q}_i = \dot{F} \dot{V} = -i \frac{(\dot{F})^2}{\omega m}.$$

Активная (тепловая) мощность при любом характере движения, например, развиваемая силой трения скольжения, является вещественной величиной.

В этой связи реактивная и активная мощности являются условно «ортогональными». Следовательно, полная механическая мощность определяется выражением

$$S = \sqrt{Q^2 + P^2}. \quad (4)$$

Упругий реактанс и упругодеформационная мощность

Эта мощность обусловлена способностью упругого тела запасать и возвращать потенциальную энергию упругой деформации [5–8]. Реактивная (упругодеформационная) мощность является чисто мнимой величиной. Ее знак противоположен знаку реактивной (инерционной) мощности.

Нетрудно показать, что формула упругого реактанса имеет вид

$$\underline{X}_k = -i \frac{k}{\omega}.$$

Здесь k – коэффициент упругости, Н/м. \underline{X}_k соответствует емкостному реактивному сопротивлению в электротехнике.

Реактивная (упругодеформационная) мощность определяется выражением

$$Q_d = \frac{F^2}{X_k} = V^2 X_k.$$

Полная мощность также вычисляется по формуле (4).

Резонанс

В механической системе, состоящей из пружины и груза, сумма реактансов равна

$$\underline{X} = \underline{X}_m + \underline{X}_k = i\omega_0 m - i \frac{k}{\omega_0}.$$

Если она равна нулю, возникает резонанс.

$$i\omega_0 m - i \frac{k}{\omega_0} = 0,$$

откуда непосредственно следует

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}.$$

Заключение

Активная и реактивная механические мощности, являясь условно «ортогональными», не складываются. Для полной мощности справедлив аналог теоремы Пифагора (точно так же, как в электротехнике).

Инертный и упругий реактансы характеризуют свойства массивного и упругого тел оказывать сопротивление приводу, понуждающему их совершать колебания.

В силу специфики работы вибрационных машин инертные реактансы являются одними из ключевых их параметров.

Список литературы

1. Попов И.П., Кубарева С.Ю. Автобалансировка вибрационных машин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т. 16. № 3. С. 140–144. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-140-144>
2. Попов И.П. Реактивная и полная механические мощности вибрационных машин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т. 17. № 2. С. 55–59. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-2-55-59>
3. Wang, X., Sun, G., Wang, L., Ma Q., Cui J. A new approach for preparing SiC particle-reinforced aluminum matrix composites by applying electromagnetic field. J. Wuhan Univ. of Technology (Mater. Sci.). 2016. Vol. 31. No. 4. P. 717–721.
4. Propescu M., Vagra B. Microstructure of aluminum alloys solidified by rotating electric field. Mater. Mech. 2015. No. 10. P. 44–48.
5. Hongxiang Zong, Dezhen Xue, Xiangdong Ding and Turab Lookman. Phase transformations in Titanium: Anisotropic deformation of ω phase. Journal of Physics: Conference Series. 2014. V.500. P. 112042. DOI: 10.1088/1742-6596/500/11/112042/
6. Lux, R., Kletzin, U., Geinitz, V., Beyer, P. Changes in mechanical parameters of stored patented cold-drawn steel wire // Wire Journal International. Vol. 47, iss. 7, July 2014. P. 78–83.
7. Yu Y.-Q. Analysis of the tube head upsetting forming process // Petrochemical Equipment. 2015. Vol. 44. P. 58–63.

8. Зайдес С.А. Новые способы поверхностного пластического деформирования при изготовлении деталей машин // Вестник Магнитогорского государственного тех-

нического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №3. С. 129–139. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-129-139>

Поступила 24.09.19

Принята в печать 21.10.19

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-4-52-55>

INERT REACTANCE OF VIBRATING MACHINES

Igor P. Popov – Senior Lecturer,

Kurgan State University, Kurgan, Russia. E-mail: ip.popov@yandex.ru

Abstract. It is shown that the derivative of the work or its corresponding mechanical energy is thermal power, which is called active in electrical engineering. This power is pulsating, but of constant signs, since the heat flux during mechanical vibrations is irreversible. The time derivative of kinetic energy is alternating in sign; therefore, its equivalents in electrical engineering are called reactive. Most drives of machines and mechanisms are electromechanical; therefore, in accordance with the energy conservation law, during vibrations of massive workpieces, parts, assemblies and other units reactive mechanical power is transformed into reactive electric power of the supply network, substantially worsening the quality of current and causing noticeable losses in wires during its circulation. In this regard, the task of correct accounting of both active and reactive mechanical power for energy-saving purposes, as well as power design calculations is relevant. The objective of the paper is to establish the relationship between active, reactive and full power during mechanical vibrations. Reactive (inertial) power is a purely imaginary value. Active (thermal) power at any nature of movement, for example, developed by the sliding friction force, is a real value. Active and reactive mechanical powers, being conditionally “orthogonal”, do not add up. For full power, a law similar to the Pythagorean Theorem is valid (just like in electrical engineering). Inert and elastic reactance characterizes the properties of massive and elastic bodies to resist the drive, which forces them to oscillate. Due to the special features of the operation of vibrating machines, inert reactance is one of their key parameters.

Keywords: inert, elastic reactance, drive, active, reactive, full power.

References

1. Popov I.P., Kubareva S.Yu. Autobalanced vibration machines. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2018, no. 3, pp. 140–144. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-140-144> (In Russ.)
2. Popov I.P. Reactive and full mechanical power of vibration machines. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2019, vol. 17, no. 2, pp. 55–59. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-2-55-59> (In Russ.)
3. Wang X., Sun G., Wang L., Ma Q., Cui J. A new approach for preparing SiC particle-reinforced aluminum matrix composites by applying electromagnetic field. *J. Wuhan Univ. of Technology (Mater. Sci.)*, 2016, vol. 31, no. 4, pp. 717–721.
4. Propescu M., Vagra B. Microstructure of aluminum alloys solidified by rotating electric field. *Mater. Mech.* 2015, no. 10, pp. 44–48.
5. Hongxiang Zong, Dezhen Xue, Xiangdong Ding, Turab Lookman. Phase transformations in Titanium: Anisotropic deformation of ω phase. *Journal of Physics: Conference Series*. 2014, vol.500, p. 112042. DOI: 10.1088/1742-6596/500/11/112042/
6. Lux R., Kletzin U., Geinitz V., Beyer P. Changes in mechanical parameters of stored patented cold-drawn steel wire. *Wire Journal International*, vol. 47, no. 7, July 2014, pp. 78–83.
7. Yu Y.-Q. Analysis of the tube head upsetting forming process. *Petrochemical Equipment*, 2015, vol. 44, pp. 58–63.
8. Zaydes S.A. New surface plastic deformation techniques in the manufacture of machine parts. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2018, vol. 16, no. 3, pp. 129–139. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-129-139> (In Russ.)

Received 24/09/19

Accepted 21/10/19

Образец для цитирования

Попов И.П. Инертные реактансы вибрационных машин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т.17. №4. С. 52–55. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-4-52-55>

For citation

Popov I.P. Inert Reactance of Vibrating Machines. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2019, vol. 17, no. 4, pp. 52–55. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-4-52-55>

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И СТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МЕТАЛЛУРГИИ

УДК 624.05

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-4-56-61>

РЕДЕВЕЛОПМЕНТ ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ

Лapidус А.А.¹, Топчий Д.В.¹, Ефремова В.Е.¹, Кузин Е.А.²¹Московский государственный строительный университет, Москва, Россия²Комитет государственного строительного надзора города Москвы (Мосгосстройнадзор), Москва, Россия

Аннотация. Для большого количества крупных индустриальных городов по всему миру характерно наличие промышленных площадок в центральной части города и приближенных к центру районах. Значительная часть этих зон утратила свою актуальность и не используется в качестве производства, а функционируют в качестве арендного бизнеса. Развитие городской среды связано не только с увеличением плотности жилых кварталов, повышением этажности деловых районов и интенсивным развитием инфраструктуры, но и изменением функционального назначения отдельных городских зон. Наибольший потенциал развития внутригородских территорий располагается в промышленных зонах. Исторически подобные производственные конгломераты формировались на окраинах городов, но развитие любого городского поселения связано с увеличением его площади. Таким образом, расположенные некогда на окраинах производства, они оказались в центральных частях мегаполисов, создавая излишнюю нагрузку на экологию окружающей среды, выпуская продукцию заведомо с большей себестоимостью в связи с дополнительными затратами из-за высокой кадастровой стоимости земли и зданий внутригородской черты, высокой заработной платы специалистов, проживающих в мегаполисах, а также других факторов. Одним из важнейших аспектов развития городской среды является проведение комплексной реконструкции территорий сложившейся застройки города, направленное на создание благоприятных условий проживания и эффективное использование производственного, инженерного, научного и других потенциалов строительного комплекса. Актуальность исследования, рассмотренного в данной статье, обусловлена необходимостью создания организационно-технологической модели по разработке проектной документации при редевелопменте промышленных объектов в условиях отсутствия федеральных и региональных программ в России, затрагивающих данную сферу, а также нормативной базы по регулированию деятельности проектных организаций, выполняющих разработку вышеуказанных проектов. В статье рассмотрены общие принципы разработки организационно-технологической модели, позволяющей оценить и оптимизировать деятельность проектировщика при перепрофилировании промышленных объектов, а также направленной на совершенствование процессов проектирования подобных объектов.

Ключевые слова: перепрофилирование территорий, организационно-технологическая модель, редевелопмент промышленных объектов, организация производства, развитие городской среды, эффективность реализации проектов.

Введение

Для научных, методологических и системно-технических основ проектирования организационных структур предприятий и организации производственных процессов моделирования перепрофилирования промышленных территорий потребовалось решение следующих задач:

- изучить и обобщить зарубежный и отечественный опыт редевелопмента промышленных зон;
- выявить актуальные проблемы при осу-

ществлении проектирования редевелопмента промышленных территорий;

- изучить факторы, влияющие на эффективность деятельности проектировщика;
- установить степень влияния выявленных факторов на качество выпускаемой проектной документации;
- сформировать рекомендации, направленные на совершенствование процессов проектирования перепрофилирования промзон в России;
- внедрить полученную модель при разработке проекта перепрофилирования промышленной зоны в г. Москве.

В широком смысле редевелопмент представляет собой процесс вторичного, как правило ком-

© Лapidус А.А., Топчий Д.В., Ефремова В.Е.,
Кузин Е.А., 2019

плексного, развития отдельных объектов недвижимости и территорий. В узком смысле для конкретизации понятия и уточнения описываемого процесса следует разграничивать понятия редевелопмент зданий и редевелопмент территорий.

Редевелопмент зданий – это преобразование уже существующих объектов недвижимости через процессы реконструкции и восстановления полезности изношенных объектов недвижимости с использованием современных технологий и материалов; через процессы реставрации и воссоздания объекта недвижимости в первоначальном состоянии; через процессы модернизации и расширения, связанные с наделением объекта недвижимости новой полезностью путем изменения архитектурных и объемно-планировочных решений с использованием современных технологий и материалов [1].

Материалы и методы

Редевелопмент территорий представляет собой комплексную застройку, реконструкцию и модернизацию объектов недвижимости в масштабах кварталов, районов и иных крупных территорий [2].

Другими словами, редевелопмент является одним из видов предпринимательской деятельности, который непосредственно связан с превращением объекта недвижимости в иной объект, наделенный новыми функциональными характеристиками и назначением. В результате описанной выше деятельности стоимость объекта возрастает, а сам земельный участок либо объект недвижимости используется более эффективно. В отечественной практике такое направление коммерческой деятельности принято называть развитием территорий.

Понятие «редевелопмент» происходит от общего понятия «девелопмент», которое отражает качественное преобразование одного объекта недвижимости в другой и конкретизируется через ряд процессов, к которым относят лэнд-девелопмент земельных участков, девелопмент и редевелопмент зданий и территорий. В своем первичном значении девелопмент означает «развитие» [3]. Исходя из вышесказанного, так как девелопмент подразумевает развитие объектов недвижимости, то под редевелопментом можно понимать перерождение объектов недвижимости с целью более эффективного их использования. Можно сказать, что редевелопмент – это процесс вторичного, как правило, комплексного развития территории. Это процесс, направленный на преобразование, преимущественно на базе ветхого

фонда, уже имеющихся на земельном участке объектов недвижимости в совершенно новые, часто с изменением их функционального назначения.

Основная цель редевелопмента заключается в привлечении инвестиционных потоков, создании новых рабочих мест, восстановлении и развитии жилищно-коммунального и производственного секторов экономики, развитии эффективной системы социального обеспечения населения и сервисных услуг для преодоления тенденций, связанных с экономическими спадами [4].

Редевелопмент предполагает комплексное решение вопросов с привлечением специалистов, способных решать нестандартные проблемы и задачи, находящиеся на стыках различных областей знаний, таких как согласование, строительство, проектирование, экономический анализ, логистика и маркетинг.

Основой разработки научных, методологических и системотехнических принципов повышения эффективности функционирования и качества организации редевелопмента [5] являются:

- 1) изменение городского планирования, смещение центров производственной активности населения и основных транспортных узлов в другие районы города;
- 2) дефицит свободных территорий для строительства новых объектов недвижимости в рамках сложившейся городской границы;
- 3) утрата существующими объектами прежней функциональности. Преимущественно характерно для объектов производственного и военного назначения, но в ряде случаев может быть применимо для объектов социальной инфраструктуры;
- 4) необходимость привлечения инвестиционных потоков в городские проекты.

В российской практике не существует общепринятой классификации видов редевелопмента, однако подобное деление все же встречается в работах отечественных авторов. Например, профессор Сибирского федерального университета Кукина И.В. приводит следующее деление:

- 1) «Глобальный» редевелопмент. Этот вид подразумевает полное перерождение объектов или территорий, начиная с изменения функционального назначения участка и согласования нового проекта, заканчивая прокладкой новых инженерных сетей и организацией новых транспортных развязок. При «глобальном» редевелопменте в обязательном порядке должны быть проработаны [6]:

- а) архитектурная идея, которая должна учитывать не только выполнение требований норма-

тивной документации, а прежде всего, опираться на комплексный анализ будущего проекта.

Также в данном случае необходимо учитывать методологические и системотехнические принципы повышения эффективности функционирования и качества организации производственных систем:

- наличие возможности увеличения нагрузки на существующие коммуникации, сети и инфраструктуру;

- сохранение исторического облика объекта при условии отнесения объекта недвижимости или его части к историческим памятникам и памятникам культуры и архитектуры;

- сочетание планируемого или реконструируемого объекта с градостроительными планами развития окружающих территорий как с точки зрения архитектурных требований, так и с точки зрения концептуального развития территории;

- экономическая целесообразность архитектурной конфигурации, а также ожидаемая эффективность вложений финансовых средств.

б) финансовый анализ развития территорий;

в) совокупный логистический анализ в случае организации офисно-складского комплекса или терминала [7];

г) маркетинговые исследования и перспективный прогноз ожидаемого спроса на объекты недвижимости в районе застройки.

2) Редевелопмент «местного значения». Данный вид связан с перепрофилированием уже существующих зданий и сооружений. Примером редевелопмента «местного значения» может служить реконструкция бывшего научно-исследовательского института с последующей переквалификацией в бизнес-центр либо перепрофилирование территории бывшего производственного цеха под офисно-складской комплекс класса «В» или «С». Подобный редевелопмент не требует значительных финансовых и временных затрат, поэтому является более экономически эффективным [8].

Доктор экономических наук, профессор Южно-Уральского государственного университета В.А. Киселева и кандидат экономических наук Е.Б. Голованов приводят следующую классификацию видов редевелопмента промышленной недвижимости:

1) Полный редевелопмент. Данный вид редевелопмента подразумевает кардинальное переразвитие территории и объектов недвижимости, начиная с изменения целевого назначения земельного участка, согласования нового проекта и заканчивая прокладкой новых инженерных сетей, организацией новых транспортных разв

зок. Полный редевелопмент предполагает проведение комплекса маркетинговых исследований, разработку концепции проекта и его согласование, а также проработку архитектурной идеи. При данном виде редевелопмента используется исключительно земельный участок [9].

2) Частичный редевелопмент. Данный вид редевелопмента подразумевает переразвитие городских территорий и частично объектов с модернизацией или обновлением существующих транспортных развязок и инженерных сетей. В данном случае не всегда проводится изменение целевого назначения земельного участка, а будущий проект зачастую проектируется в рамках существующего целевого назначения, в ряде случаев применяют небольшие корректировки. Как правило, подобным образом разрабатываются офисно-складские или логистические комплексы с административными зданиями. В случае частичного редевелопмента используется имеющийся земельный участок и некоторые существующие на нем объекты, которые, как правило, проходят процесс реконструкции или модернизации.

3) Поверхностный редевелопмент. Данный вид редевелопмента, как правило, не подразумевает серьезных, кардинальных изменений существующих объектов. Редевелопменту подвергаются либо административные здания, либо отдельные цеха. По такому варианту, как правило, возводятся складские комплексы в случаях, когда не требуется кардинальное изменение транспортных путей, подъездных дорог и объектов инженерной инфраструктуры [10].

Наиболее трудозатратным и капиталоемким является полный редевелопмент промышленных объектов, поскольку объем необходимых инвестиций практически равнозначен сумме инвестиций, необходимых для реализации нового проекта. Также необходимо учитывать затраты на изменение целевого назначения участка и очистку территории от существующих зданий и конструкций. Наименее затратным по времени и финансовым потокам выступает поверхностный редевелопмент [11].

При редевелопменте недвижимости промышленного назначения девелоперу необходимо обращать особое внимание на разработку и реализацию принципов производственного менеджмента, включая подготовку кадрового обеспечения и эффективность форм организации труда, а также:

- национальные, региональные, местные экономические тенденции;

- рост занятости и изменение численности

людей, занятых на работах в промьшленном секторе;

- социально-экономические характеристики агломерации, включая темп роста населения и структуру занятости;

- местную политику развития и отношение к деверелопменту и редерелопменту промьшленных зданий;

- прогноз спроса на различные типы офисных и промьшленных объектов;

- текущее предложение по отраслям промьшленности;

- исторически сложившиеся тенденции в области продаж и текущую деятельность по сдаче в аренду недвижимости планируемого назначения;

- исторически сложившуюся долю свободных площадей, в особенности на площади, доступные для развития в настоящее время.

Старые, изжившие себя промьшленные зоны могут представлять хорошие возможности для деверелоперов, главным образом благодаря наличию зданий, используемых с недоагрузкой и пригодных для реконструкции, а также небольших участков, пригодных для точечного редерелопмента.

Восстановление старых промьшленных зон открывает следующие возможности перед деверелоперами:

- модернизация зданий предприятий легкой промьшленности, не использующих высокие технологии, с тем чтобы сделать их конкурентоспособными по сравнению с более новыми сооружениями;

- редерелопмент зданий предприятий легкой промьшленности, не использующих высокие технологии, с тем чтобы переориентировать их под офисы, жилье и помещения для научно-исследовательской работы, связанной с высокими технологиями;

- реконструкция старых крупных предприятий, например, автомобильных заводов, для дальнейшего использования в качестве складов для большого количества арендаторов и офисно-технологических зданий;

- снос объектов тяжелой промьшленности и последующее использование земли под бизнес-парки [11];

- адаптация устаревших городских многоэтажных складов под помещения офисного и коммерческого назначения [12].

Заклучение

Для того чтобы в короткие сроки на этапе разработки концепции деверелопер мог принять

решение о целесообразности и осуществимости проекта частичного или поверхностного редерелопмента, он должен обладать представлением о функциональных характеристиках существующих объектов промьшленной недвижимости.

В узком смысле промьшленная недвижимость представляет собой место для производства или складирования товаров. В зависимости от характера производимой продукции, организации производства и выполняемых функций, к промьшленной недвижимости могут предъявляться различные требования по высоте этажа, нагрузкам на перекрытия, температурно-влажностному режиму, возможности погрузо-разгрузочных работ, транспортной доступности и т. д.

При классификации недвижимости промьшленного назначения обычно используют три основных категории:

- складские и товарораспределительные здания;

- производственные здания;

- здания комбинированного назначения.

Обозначенные выше категории в свою очередь подразделяются на подкатегории со своими отличительными особенностями, основанными на выполнении специфических функций. Такие здания могут располагаться в промьшленных зонах или бизнес-парках, построенных в соответствии с генеральным планом, либо могут быть отдельно стоящими строениями.

Список литературы

1. Разработка методологии комплексного контроля на объектах строительства, реконструкции перепрофилирования / Топчий Д.В., Юргайтис А.Ю., Бабушкин Е.С., Зуева Д.Д. // Обеспечение качества строительства в г. Москве на основе современных достижений науки и техники: сборник трудов Первой совместной научно-практической конференции ГБУ «ЦЭИИС» и ИПРИМ РАН. Москва, 2019. С. 267–272.
2. Лапидус А.А. Оптимизация управления деверелоперскими проектами // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2008. № 3 (110). С. 50–52.
3. Zueva D.D., Babushkin E.S., Topchy D.V., Yurgaitis A.Yu. Construction supervision during capital construction, reconstruction and re-profiling. MATEC Web of Conferences. 2019. Vol. 265. DOI: 10.1051/mateconf/201926507022.
4. Лапидус А.А. Успешный опыт управления строительными проектами // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2008. № 6 (113). С. 86–88.
5. Topchy D.V., Yurgaitis A.Yu., Kravchuk A., Shevchuk D. Controlling methods of buildings' energy performance characteristics. Topical Problems of Architecture, Civil Engineering and Environmental Economics (TPACEE 2018) electronic edition. E3S Web of Conferences. 2019.

- Vol. 91. DOI: 10.1051/e3sconf/20199102026.
6. Лapidус А.А., Сайдаев Х.Л.А. Необходимость введения стандартов генподрядных организаций как важнейший инструмент развития строительной отрасли // Техническое регулирование. Строительство, проектирование и изыскания. 2011. № 7. С. 36–39.
 7. Topchy D.V., Lapidus A.A. Construction supervision at the facilities renovation. Topical Problems of Architecture, Civil Engineering and Environmental Economics (TPACEE 2018) electronic edition. E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 91. DOI: 10.1051/e3sconf/20199108044.
 8. Топчий Д.В., Юрайтис Д.Ю., Болотова А.С. Возможности применения глобальных спутниковых навигационных систем для функций строительного контроля и регулирования ресурсного обеспечения строительных предприятий за счет оптимизации маневровой работы // Инновации и инвестиции. 2019. № 2. С. 258–263.
 9. Топчий Д.В., Токарский А.Я. Формирование базиса ин-формационных технологий при осуществлении государственного строительного надзора на реновационных городских территориях // Наука и бизнес: пути развития. 2019. № 2 (92). С. 141–148.
 10. Лapidус А.А. Влияние современных технологических и организационных мероприятий на достижение планируемых результатов строительных проектов // Технологии и организация строительного производства. 2013. № 2. С. 1.
 11. Лapidус А.А. Потенциал эффективности организационно-технологических решений строительного объекта // Вестник МГСУ. 2014. № 1. С. 175–180.
 12. Современные подходы к решению вопросов организационно-технологического проектирования / Воловик М.В., Ершов М.Н., Ишин А.В., Лapidус А.А., Лянг О.П., Теличенко В.И., Олейник П.П., Туманов Д.К., Фельдман О.А. // Технология и организация строительного производства. 2013. № 3. С. 10–16.

Поступила 02.09.19

Принята в печать 15.10.19

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-4-56-61>

REDEVELOPMENT OF INDUSTRIAL AREAS

Azary A. Lapidus – DrSc (Eng.), Professor,
Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia.
E-mail: lapidus58@mail.ru. ORCID 0000-0001-7846-5770

Dmitriy V. Topchiy – PhD (Eng.), Associate Professor,
Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia.
E-mail: dvtopchiy0405@gmail.com. ORCID 0000-0002-3697-9201

Veronika E. Efremova – master's student,
Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia. E-mail: efremova.ronnie@yandex.ru

Evgeniy A. Kuzin – Head of the Department for Control and Supervision of Metro Facilities
Committee of State Construction Supervision of Moscow (Mosgosstroynadzor), Moscow, Russia.
E-mail: eakuzin@mail.ru

Abstract. A large number of major industrial cities around the world are characterized by industrial sites located in the central part of the city and areas close to the center. A significant share of these zones has lost their relevance and is not used as the production site, but functions as rental business. Development of urban environment is related to not only a higher density of residential buildings, taller buildings in business areas and intensive development of infrastructure, but also changes in a functional application of individual city zones. A great potential of development of intra-city areas is found in industrial zones. Historically, such industrial conglomerates were formed on the outskirts of cities, but development of any urbanized area means its growth. Thus, industrial sites formerly located on the outskirts are found in central areas of metropolises. They create extra load on environmental ecology, manufacturing products with certainly higher cost due to additional expenses resulting from a high cadastral value of land and buildings in the city, high salary of specialists living in metropolises, and other factors. One of the most important aspects of the develop-

ment of the urban environment is to conduct a comprehensive reconstruction of the existing urban development areas aimed at creating favorable living conditions and using the industrial, engineering, scientific and other potentials of the construction complex efficiently. The relevance of the study considered in this paper is due to the need to create an organizational and technological model for the development of design documentation for the redevelopment of industrial facilities, when there are no federal or regional programs in Russia related to this area, as well as no regulatory framework to control the activities of design organizations running the above mentioned projects. The paper describes the general principles of the development of the organizational and technological model, which allows us to evaluate and optimize the activities of a design company, when repurposing industrial facilities, as well as improving the design processes of such facilities.

Keywords: repurposing of areas, organizational and technological model, redevelopment of industrial facilities, organization of production, development of the urban environment, efficiency of project implementation.

References

1. Topchiy D.V., Yurgaitis A.Yu., Babushkin E.S., Zueva D.D. Development of the methodology for integrated control at construction sites, reconstruction and repurposing]. *Obespechenie kachestva stroitelstva v g. Moskve na osnove sovremennykh dostizheniy nauki i tekhniki: sbornik trudov Pervoy sovmestnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii GBU «TsEiIS» i IPRIM RAN* [Construction quality assurance in Moscow applying modern achievements of science and technology: collection of papers of the First Joint Scientific and Practical Conference of the State-Financed Institution Center of Expertise, Research and Tests in Construction and the Institute of Applied Mechanics of the Russian Academy of Sciences]. Moscow, 2019, pp. 267–272. (In Russ.)
2. Lapidus A.A. Optimization of development project management. *Stroitelnye materialy, oborudovanie, tekhnologii XXI veka* [Construction materials, equipment and technologies of the 21st century], 2008, no. 3 (110), pp. 50–52. (In Russ.)
3. Zueva D.D., Babushkin E.S., Topchy D.V., Yurgaitis A.Yu. Construction supervision during capital construction, reconstruction and re-profiling. *MATEC Web of Conferences*, 2019, vol. 265. DOI: 10.1051/mateconf/201926507022.
4. Lapidus A.A. Successful experience in construction project management. *Stroitelnye materialy, oborudovanie, tekhnologii XXI veka* [Construction materials, equipment and technologies of the 21st century], 2008, no. 6 (113), pp. 86–88. (In Russ.)
5. Topchy D.V., Yurgaitis A.Yu., Kravchuk A., Shevchuk D. Controlling methods of buildings' energy performance characteristics. *Topical Problems of Architecture, Civil Engineering and Environmental Economics (TPACEE 2018) electronic edition. E3S Web of Conferences*, 2019, vol. 91. DOI: 10.1051/e3sconf/20199102026.
6. Lapidus A.A., Saidayev Kh.L.A. The need to introduce standards for general contractors as an essential tool for the development of the construction industry. *Tekhnicheskoe regulirovanie. Stroitelstvo, proektirovanie i izyskaniya* [Technical regulation. Construction, design and survey], 2011, no. 7, pp. 36–39. (In Russ.)
7. Topchy D.V., Lapidus A.A. Construction supervision at the facilities renovation. *Topical Problems of Architecture, Civil Engineering and Environmental Economics (TPACEE 2018) electronic edition. E3S Web of Conferences*, 2019, vol. 91. DOI: 10.1051/e3sconf/20199108044.
8. Topchiy D.V., Yurgaitis D.Yu., Bolotova A.S. The possibilities of using global satellite navigation systems for the functions of construction control and regulating the resource supply of construction enterprises by optimizing shunting work. *Innovatsii i investitsii* [Innovation and investment], 2019, no. 2, pp. 258–263. (In Russ.)
9. Topchiy D.V., Tokarsky A.Ya. Formation of the basis of information technologies in the implementation of state construction supervision in renovated urban areas. *Nauka i biznes: puti razvitiya* [Science and business: paths of development], 2019, no. 2 (92), pp. 141–148. (In Russ.)
10. Lapidus A.A. The influence of modern technological and organizational measures on the achievement of the planned results of construction projects. *Tekhnologiya i organizatsiya stroitelnogo proizvodstva* [Technology and organization of construction operations], 2013, no. 2, p. 1. (In Russ.)
11. Lapidus A.A. Potential of efficiency of organizational and technological solutions of construction facilities. *Vestnik MGSU* [Vestnik of Moscow State University of Civil Engineering], 2014, no. 1, pp. 175–180. (In Russ.)
12. Volovik M.V., Ershov M.N., Ishin A.V., Lapidus A.A., Lyang O.P., Telichenko V.I., Oleinik P.P., Tumanov D.K., Feldman O.A. Modern approaches to issues of an organizational and technological design. *Tekhnologiya i organizatsiya stroitelnogo proizvodstva* [Technology and organization of construction operations], 2013, no. 3, pp. 10–16. (In Russ.)

Received 02/09/19

Accepted 15/10/19

Образец для цитирования

Редерелопмент промьшленньх террторий / Ладудус А.А., Топчий Д.В., Ефремова В.Е., Кузин Е.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т.17. №4. С. 56–61. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-4-56-61>

For citation

Lapidus A.A., Topchiy D.V., Efremova V.E., Kuzin E.A. Redevelopment of Industrial Areas. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2019, vol. 17, no. 4, pp. 56–61. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-4-56-61>

ЭКОНОМИКА, УПРАВЛЕНИЕ И РЫНОК ПРОДУКЦИИ

УДК 65.01

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-4-62-70>

РАЗРАБОТКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАКУПОЧНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ РОССИИ

Николаева А.Г.

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы): промышленные предприятия функционируют на высоко конкурентном мировом поле, характеризующимся нестабильным спросом на выпускаемую продукцию. В данных условиях предприятиям необходимо совершенствовать свою деятельность для сохранения позиций на рынке, а вследствие того, что любое производство является материалоёмким, закупочная деятельность становится важнейшим элементом, влияющим на конкурентное положение предприятия на рынке. Даже незначительное совершенствование закупочных процессов может стать решающим фактором в конкурентной борьбе. Для эффективного управления и принятия оптимальных стратегических решений в области закупок необходимо не только осуществлять анализ внешней среды, но и проводить регулярную оценку результатов закупочной деятельности организации. Однако на сегодняшний день нет единого комплекса показателей, позволяющего оценивать эффективность закупочной деятельности промышленных предприятий. **Цель работы:** разработка системы сбалансированных показателей оценки эффективности закупочной деятельности для промышленных предприятий России. **Новизна работы:** впервые предлагается механизм, позволяющий осуществлять комплексную количественную оценку эффективности закупочной деятельности промышленных предприятий на основании системы сбалансированных показателей. **Результат:** на основании проведённого исследования и обобщения данных по предлагаемым как зарубежными, так и отечественными авторами критериям и показателям оценки закупочной деятельности разработана сбалансированная система, состоящая из 29 показателей, которые включают в себя финансовые показатели, показатели бизнес-процессов, показатели обучения и развития персонала, а также показатели, ориентированные на удовлетворение потребностей клиентов. **Практическая значимость:** предложенные показатели являются готовым инструментом для оценки закупочной деятельности любого предприятия России, позволяющим на основе полученных количественных значений принимать эффективные управленческие решения в области закупок.

Ключевые слова: закупки, закупочная деятельность, оценка эффективности закупочной деятельности, показатели эффективности закупочной деятельности, промышленные предприятия.

Введение

Одной из областей деятельности, существенно влияющих на конкурентное положение предприятия в отрасли, является закупочная деятельность, отвечающая за обеспечение предприятия материально-техническими ресурсами, необходимыми для полноценного функционирования организации. Особенно это актуально для промышленных предприятий с материалоёмким производством, поскольку расходы на закупку необходимых ресурсов достигают 70% в себестоимости продукции [1]. Поэтому даже относительно небольшие улучшения в области закупок могут принести существенные преимущества организации. Обязательной составляющей эффективного

логистического управления закупками на любом предприятии является гибкое реагирование на постоянно изменяющиеся условия рыночной среды и максимальное приспособление под сложившуюся ситуацию, что позволяет получать преимущества перед конкурентами за счет оптимизации расходов и процессов [2]. Рациональная организация закупок на предприятии в значительной мере предопределяет уровень использования средств производства, рост производительности труда, снижение себестоимости продукции, увеличение прибыли и рентабельности. Этими обстоятельствами определяется роль и значение закупок в системе управления предприятием [3]. Для осуществления рациональной организации закупочной деятельности и эффективного управления закупками в условиях изменяющегося

© Николаева А.Г., 2019

спроса на рынке, а также для принятия оптимальных решений в конкретных обстоятельствах, предприятиям необходимо осуществлять планирование и реализацию закупочной деятельности не только на основании мониторинга мировых тенденций, но и на основании анализа результатов закупочной деятельности в прошлом. Для этого целесообразно проводить регулярную ретроспективную оценку эффективности закупочной деятельности предприятия.

На данный момент в Российской Федерации отсутствует единый подход к оценке закупочной деятельности и, хотя предприятия одной отрасли достаточно однородны по закупаемому сырью и материалам, а различия в основном касаются объёмов производства, тем не менее, нет универсальных подходов для комплексной оценки эффективности закупок [4]. При этом руководство компаний всегда интересуется, насколько эффективно работает система материально-технического обеспечения производственного процесса. Ведь от своевременного выполнения графика производства и заказов потребителей напрямую зависит успешность бизнеса, а это в свою очередь связано с организацией поставок на предприятие. Немаловажное значение при этом имеет стоимость закупаемой продукции, поскольку руководство должно понимать: осуществляется ли закупка по рыночным ценам; применяются ли эффективные методики при взаимодействии с поставщиками, ведущие к снижению общих затрат на поставку закупаемых ресурсов; оправдан ли объём запаса закупаемой продукции и каков риск остановки производства из-за отсутствия необходимой номенклатуры на складе? Для ответов на вышеуказанные вопросы сотрудникам, осуществляющим закупочную деятельность, приходится давать пояснения в виде большого количества отчётов, качество которых оставляет желать лучшего. При этом чёткого понимания эффективно ли осуществляется закупочная деятельность нет [5]. Для решения вышеуказанных проблем в рамках проведённого исследования был осуществлён анализ применяемых систем оценки закупочной деятельности, изложенных как в работах ряда зарубежных авторов – Лайсонса К., Джиллингема М., Линдерса М., Джонсона Ф., Флинна А., Фирона Г., Парментера Д., так и отечественных авторов – Григорьева М.Н., Долгова А.П., Уварова С.А., Афанасенко И.Д., Борисовой В.В., Щербакова В.В., Кипер И.Л., Мясниковой

Л.А., Парфёнова А.В., Плоткина Б.К., Ткач В.В., Шевченко С.Ю., Зиминной Г.А., Растегаевой Ф.С., Шашковой Т.Н., Панкова С.Н. [4–10]. Целью исследования являлась разработка комплекса показателей оценки эффективности закупочной деятельности на основании системы сбалансированных показателей для промышленных предприятий РФ, которые позволили бы руководству организаций на основании объективных данных принимать эффективные управленческие решения в области закупок.

Методы исследования

В общем представлении эффективность представляет собой отношение полезного эффекта к затратам на его достижение. При оценке эффективности закупочной деятельности возникает проблема идентификации видов затрат по отношению к порождённому ими эффекту. Сложность оценки эффективности закупок заключается в неоднозначности результатов закупочной деятельности с точки зрения проявления эффекта и его оценки, что в свою очередь влияет на используемые методы исследования эффективности. При проведении комплексной оценки эффективности закупочной деятельности применяемые показатели должны быть направлены на реализацию стратегии организации; нет смысла анализировать показатели, если они не соответствуют целям, заданным руководством. При этом показатели оценки эффективности закупочной деятельности должны быть связаны и с другими функциональными областями предприятия, направленными на осуществление стратегических целей, например, с логистикой, маркетингом, производством, инновационной деятельностью и др. Стоит отметить, что при проведении сравнительного анализа по показателям эффективности в целом по организации могут возникать неоднозначные результаты. Например, в закупочной деятельности удалось добиться высоких результатов, но в целом по организации результаты могут быть неудовлетворительными за счёт проблем в других функциональных областях и наоборот. Необходимо использовать такую методику оценки закупочной деятельности, которая позволяла бы оценить вклад в результаты компании именно функциональной области закупок.

При оценке экономической эффективности закупочной деятельности исследователи сталки-

ваются с рядом трудностей, заключающихся в следующем:

1) Не всегда можно выразить количественно и сопоставить показатели закупочной деятельности, поскольку одни составляющие в отдельности соизмеримы, но не сопоставимы с другими данными или друг с другом, некоторые составляющие вообще не поддаются измерению.

2) В логистике закупок в ряде случаев может проявляться обратная зависимость между эффектом, полученным от реализации мероприятий по оптимизации закупочной деятельности, и общим сокращением расходов. Например, сокращение издержек в одной функциональной области деятельности в итоге может вызвать увеличение общих расходов. Нельзя не согласиться с мнением В.В. Новожилова, сформулировавшего ещё в 1970 году свой тезис о том, что совмещение проектных вариантов, дающих минимумы затрат по каждому объекту в отдельности, не во всех случаях обеспечивает общий минимум всех затрат [11].

3) Денежные затраты не являются полным отражением овеществлённого труда, в том числе в закупках, например, это касается затрат, связанных с природопользованием. Поэтому количественные оценки не могут быть абсолютно исчерпывающей основой для принятия управленческих решений. Для того чтобы добиться наилучшего результата, необходимо учитывать множество факторов, однако, полученные количественные показатели служат первичной основой для проведения содержательного анализа экономической ситуации и принятия верного управленческого решения [12–13].

С учётом обозначенных выше проблем автором была разработана система показателей, позволяющая топ-менеджменту компании, руководителям структурных подразделений, координирующих закупочную деятельность, получить достаточно полную и объективную информацию, основанную на количественных данных, об эффективности закупочной деятельности предприятий ЦБП. Эту методику анализа предлагается применять не только в рамках одного предприятия, сравнивая результаты текущей деятельности с результатами предшествующих периодов, но и рекомендуется проводить сравнительный анализ по аналогичным (репрезентативным) предприятиям отрасли.

В процессе оценки эффективности закупочной деятельности используются следующие клас-

сические методы анализа:

1) Метод абсолютных, относительных и средних величин, предполагающий использование данных по количеству, объёму изучаемого процесса. При этом сравниваются данные по текущему периоду с предшествующим периодом, рассчитывается абсолютное и относительное отклонение по одноимённым показателям.

2) Метод сравнения, позволяющий определять лучшие или худшие показатели.

3) Вертикальный анализ, который представляет результаты закупочной деятельности в виде относительных величин и определяет долю каждого вида затрат, приходящихся на закупочную деятельность в общих расходах на закупки, в выручке от продаж. Позволяет осуществлять сравнение результатов между предприятиями отрасли, сглаживает влияние инфляционных процессов на интерпретацию результатов.

4) Горизонтальный анализ, обеспечивающий оценку показателей за определённый период времени, где абсолютные значения анализируемых данных дополняются относительным темпом изменений за исследуемый период. Это позволяет отслеживать изменение отдельных показателей и строить прогнозные значения их в будущем.

5) Трендовый анализ, заключающийся в выявлении тренда и построении на его основе прогнозных значений на последующий период. При этом графически отображаются временные ряды, по которым строится график возможного изменения анализируемых показателей.

6) Факторный анализ, основанный на комплексном и системном изучении факторов, влияющих на значение исследуемых показателей. Определяется функциональная зависимость между рядом факторов и их воздействие на величину изучаемого процесса.

Результаты исследования

В соответствии с поставленными целями предлагается осуществлять анализ закупочной деятельности на основании оценки 29 показателей эффективности закупок, которые объединяются по следующим четырём основным группам сбалансированной системы показателей:

1. Финансовые показатели.

2. Показатели бизнес-процессов (планирование закупочной деятельности, организация закупок, управление запасами, эффективность персонала).

3. Показатели обучения и развития персонала.

4. Показатели, ориентированные на удовлетворение потребностей клиентов.

По каждой группе показателей предлагается осуществлять расчёт в соответствии с нижеприведённым порядком. Финансовые показатели (табл. 1) предназначены для топ-менеджмента компании, они отражают результаты многих видов деятельности, в том числе и закупочной. Данные показатели свидетельствуют о том, какими темпами идёт развитие организации, но не дают однозначных ответов о том, как улучшить результаты деятельности.

Показатели бизнес-процессов (табл. 2) существенно влияют на конкурентоспособность компании, поскольку в современном менеджменте одним из передовых методов эффективного управления организацией является процессный подход к управлению. Показатели планирования определяют точность расчёта потребностей в материально-технических ресурсах и их стоимость, что является крайне важным при заключении договоров, определении объёмов и стоимости поставок. Показатели организации закупок ориентированы на оценку эффективности применения электронных торгов, в том числе демонстрируют уровень конкуренции среди потенциальных поставщиков, большое количество которых позволяет заключить договор по наилучшим условиям и минимальной цене. Показатели, связанные с оценкой эффективности управления запасами закупаемой продукции, позволяют понять насколько обосновано количество запасов как с точки зрения обеспечения надёжности снабжения производственного процесса, так и с точки зрения отсутствия излишков, которые «омертвляют» капитал, связанный в них.

Показатели обучения и развития персонала (табл. 3) оценивают эффективность работы структурного подразделения, ведь успешность деятельности организационной единицы в первую очередь зависит от профессионализма её сотрудников. Так структурное подразделение, осуществляющее закупки, необходимо укомплектовывать профессионалами с чётко определёнными для них сферами ответственности, при этом важным является совершенствование их деятельности посредством участия в программах обучения, эффективных тренингах, позволяющих по-

лучать информацию о передовых методах, процедурах и приёмах в осуществлении закупочной деятельности.

Показатели, ориентированные на удовлетворение потребностей клиентов (табл. 4), прежде всего подразумевают обеспечение бесперебойных, надёжных поставок продукции. В данном случае надёжность подразумевает под собой гарантию обеспечения производства необходимыми материально-техническими ресурсами в течение заданного промежутка времени независимо от обстоятельств, которые могут возникнуть в ходе поставок. Предотвращение каких-либо нарушений условий поставок – сроков, качества – является одной из приоритетных задач сотрудников, осуществляющих закупки.

Возможность применения вышеперечисленных показателей оценки эффективности закупочной деятельности во многом зависит от уровня организации на предприятии бухгалтерского, управленческого, финансового учёта, в том числе учёта оперативных (текущих) затрат на организацию закупочной деятельности, выделения затрат в соответствии с функциональной областью закупок. Следует иметь в виду, что при проведении оценки эффективности закупочной деятельности необходимо руководствоваться всеми показателями, предлагаемыми для анализа, поскольку только совокупность всех предложенных показателей, может являться полной основой для принятия последующих верных решений. Например, нельзя рассматривать отдельно показатели экономии, полученной в ходе закупочной деятельности, при этом не анализируя показатели надёжности и качества, поскольку при постановке цели получить более низкие закупочные цены не должен снижаться уровень качества поставки и т.д.

Однако установка приоритетов, определение значимости критериев не может быть единообразной для всех предприятий отрасли. Каждая организация должна самостоятельно определять значимость рассматриваемых показателей исходя из стратегических целей компании и сложившейся ситуации в конкретный период времени. При этом применение показателей позволит создать основу для построения эффективной системы мотивации персонала предприятия, задействованного в закупочной деятельности.

Таблица 1

Финансовые показатели эффективности закупочной деятельности

№ п/п	Показатель	Формула расчёта	Исходные данные для расчёта
1	K1 – отношение расходов на закупку к выручке от продаж, %	$K_1 = \frac{I_3}{B_n} \times 100\%$	И ₃ – общие расходы на закупку за определённый период времени В _п – выручка от продаж за определённый период времени
2	K2 – отношение операционных (текущих расходов) на организацию закупок к выручке от продаж, %	$K_2 = \frac{I_m}{B_n} \times 100\%$	И _т – операционные (текущие) расходы на организацию закупок за определённый период времени В _п – выручка от продаж за определённый период времени
3	K3 – отношение операционных (текущих расходов) на организацию закупок к общим расходам на закупки, %	$K_3 = \frac{I_m}{I_3} \times 100\%$	И _т – операционные (текущие) расходы на организацию закупок за определённый период времени И ₃ – общие расходы на закупку за определённый период времени
4	K4 – доля запасов сырья и материалов в выручке от продаж, %	$K_4 = \frac{З_{cp}}{B_n} \times 100\%$	З _{ср} – средний запас сырья и материалов за определённый период времени В _п – выручка от продаж за определённый период времени
5	K5 – доля запасов сырья и материалов в общих активах, %	$K_5 = \frac{З_{cp}}{A_o} \times 100\%$	З _{ср} – средний запас сырья и материалов за определённый период времени А _о – общие активы
6	K6 – доля запасов сырья и материалов в оборотных активах, %	$K_6 = \frac{З_{cp}}{A_{об}} \times 100\%$	З _{ср} – средний запас сырья и материалов за определённый период времени А _{об} – оборотные активы
7	K7 – процент экономии, полученной по результатам закупок продукции, от среднерыночной стоимости, %	$K_7 = \frac{(Ц_p - Ц_д)}{Ц_p} \times 100\%$	Ц _р – совокупная средняя рыночная стоимость закупаемой продукции Ц _д – совокупная стоимость закупаемой продукции в соответствии с заключёнными договорами
8	K8 – экономия, полученная за отсрочку платежа, тыс. руб.	$K_8 = \frac{t_{от} \times B_{np}}{365 \times 100\%} \times Ц$	т _{от} – количество дней отсрочки платежа Б _{пр} – годовой банковский процент по заёмным средствам Ц – сумма сделки, по которой была получена отсрочка платежа
9	K9 – процент экономии, полученной по результатам электронных закупок, %	$K_9 = \frac{(Ц_n - Ц_{эп})}{Ц_n} \times 100\%$	Ц _н – совокупная начальная цена закупаемой продукции Ц _{эп} – совокупная стоимость закупаемой продукции в соответствии с договорами, заключёнными по итогам электронных торгов
10	K10 – средняя стоимость заказа на закупку, тыс. руб.	$K_{10} = \frac{Ц_д}{K_{зак}}$	Ц _д – совокупная стоимость закупаемой продукции в соответствии с заключёнными договорами за определённый период времени К _{зак} – количество заказов, сделанных за определённый период времени

Таблица 2

Показатели бизнес-процессов

№ п/п	Показатель	Формула расчёта	Исходные данные для расчёта
	К11 – качество планирования закупок по стоимости ресурсов, %	$K_{11} = \sqrt{\left(\frac{Ц_{епр} - Ц_{ед}}{Ц_{ед}}\right)^2} \times 100\%$	Цепр – планируемая цена единицы закупаемой продукции Цед – стоимость единицы закупаемой продукции в соответствии с заключёнными договорами
	К12 – качество планирования потребности в материальных ресурсах, %	$K_{12} = \sqrt{\left(\frac{O_{пр} - O_{ф}}{O_{ф}}\right)^2} \times 100\%$	Опр – планируемый объём поставок по группе закупаемой продукции Оф – фактический объём поставок по группе закупаемой продукции
	К13 – качество планирования операционных расходов на организацию закупок, %	$K_{13} = \sqrt{\left(\frac{I_{пр} - I_{м}}{I_{м}}\right)^2} \times 100\%$	Ипр – планируемые операционные (текущие) расходы на организацию закупок за определённый период времени Ит – операционные (текущие) расходы на организацию закупок за определённый период времени
	К14 – доля электронных закупок в общем объёме закупок, %	$K_{14} = \frac{Ц_{эм}}{Ц_{о}} \times 100\%$	Цэт – совокупная стоимость закупаемой продукции в соответствии с договорами, заключёнными по итогам электронных торгов Цд – совокупная стоимость закупаемой продукции в соответствии с заключёнными договорами
	К15 – среднее количество участников закупок, ед.	$K_{15} = \frac{У_{эм}}{К_{эм}}$	Уэт – количество участников электронных торгов Кэт – общее количество проведённых электронных процедур
	К16 – доля ключевых поставщиков, %.	$K_{16} = \frac{K_{кпос}}{K_{дп}} \times 100\%$	Ккпос – количество ключевых поставщиков, на долю которых приходится 80% суммы, затраченной на закупки Кдп – количество действующих поставщиков
	К17 – доля поставщиков, с которыми заключены договора на срок не менее 3-х лет	$K_{17} = \frac{K_{кпдол}}{K_{дп}} \times 100\%$	Ккпдол – количество поставщиков, с которыми заключены договора на срок не менее 3-х лет Кдп – количество действующих поставщиков
	К18 – оборачиваемость запасов сырья и материалов, оборотов	$K_{18} = \frac{B_n}{З_{ср}}$	Вп – выручка от продаж за определённый период времени Зср – средний запас сырья и материалов за определённый период времени
	К19 – период оборота запасов сырья и материалов, дней	$K_{19} = \frac{З_{ср} \times t}{B_n}$	Зср – средний запас сырья и материалов за определённый период времени t – число дней в периоде Вп – выручка от продаж за определённый период времени
	К20 – расходы на закупку в расчёте на одного сотрудника, осуществляющего закупки; тыс. руб./чел.	$K_{20} = \frac{I_z}{K_{сз}}$	Из – общие расходы на закупку за определённый период времени Ксз – численность сотрудников, осуществляющих закупки
	К21 – доля операционных (текущих расходов) на организацию закупок в расчёте на одного сотрудника, осуществляющего закупки, %	$K_{21} = \frac{I_m}{K_{сз}} \times 100\%$	Ит – операционные (текущие) расходы на организацию закупок за определённый период времени Ксз – численность сотрудников, осуществляющих закупки
	К22 – количество поставщиков на одного сотрудника, осуществляющего закупки, ед./чел.	$K_{22} = \frac{K_{дп}}{K_{сз}}$	Кдп – количество действующих поставщиков Ксз – численность сотрудников, осуществляющих закупки

Таблица 3

Показатели обучения и развития персонала

№ п/п	Показатель	Формула расчёта	Исходные данные для расчёта
	K23 – средняя продолжительность обучения одного сотрудника, осуществляющего закупки, в год, дни/чел.	$K_{23} = \frac{T_{об}}{K_{сз}}$	Тоб – совокупная за год продолжительность обучения сотрудников, осуществляющих закупки Ксз – численность сотрудников, осуществляющих закупки
	K24 – среднегодовые расходы на обучение одного сотрудника, осуществляющего закупки, тыс. руб./чел.	$K_{24} = \frac{I_{об}}{K_{сз}}$	Иоб – совокупная стоимость обучения сотрудников, осуществляющих закупки, за год Ксз – численность сотрудников, осуществляющих закупки
	K25 – доля сотрудников, осуществляющих закупки, в общей численности сотрудников предприятия, %	$K_{25} = \frac{K_{сз}}{K_c} \times 100\%$	Ксз – численность сотрудников, осуществляющих закупки Кс – общая численность сотрудников предприятия

Таблица 4

Показатели, ориентированные на удовлетворение потребностей клиентов

№ п/п	Показатель	Формула расчёта	Исходные данные для расчёта
	K26 – доля поставок, осуществлённых с нарушением качества поставки, в общем числе поставок, %	$K_{26} = \frac{П_{нкач}}{П_o} \times 100\%$	Пнкач – количество поставок, осуществлённых с нарушением качества поставки за период По – общее количество поставок за период
	K27 – доля поставок, осуществлённых без нарушений, от общего количества поставок, %	$K_{27} = \frac{П_{бн}}{П_o} \times 100\%$	Пбн – количество поставок, осуществлённых без нарушений за период По – общее количество поставок за период
	K28 – доля поставок, которые вызвали нарушения в запланированном графике производства, в общем числе поставок, %	$K_{28} = \frac{П_{нгр}}{П_o} \times 100\%$	Пнгр – количество поставок, которые вызвали нарушения в запланированном графике производства за период По – общее количество поставок за период
	K29 – доля поставок, осуществлённых с нарушением сроков поставки, в общем числе поставок, %	$K_{29} = \frac{П_{нсп}}{П_o} \times 100\%$	Пнсп – количество поставок, осуществлённых с нарушением сроков поставки за период По – общее количество поставок за период

Заключение

Проведение оценки эффективности закупочной деятельности, основанной на сбалансированной системе показателей, промышленными предприятиями позволит осуществлять комплексную объективную оценку результатов закупок, определять эффективность работы структурного подразделения, осуществляющего закупки, рассчитывать прогнозные значения целевых показателей на будущие периоды. Предлагаемый комплекс показателей всесторонне охватывает большин-

ство аспектов закупочной деятельности предприятия, поддающихся количественной оценке, и является объективной основой для принятия эффективных управленческих решений, обеспечивающих конкурентное преимущество организации. По сути, предлагаемые показатели оценки – это готовый инструмент, позволяющий топ-менеджменту компании осуществлять стратегическое планирование на основании оценки не только результативности закупочной деятельности своего предприятия, но и учитывать лучшие практики предприятий отрасли, на основании ко-

торых необходимо задавать целевые значения показателей для собственной компании, что позволит гибко реагировать на сложившуюся ситуацию на рынке и обеспечивать высокую конкурентоспособность предприятию.

Список литературы

1. Николаева А.Г., Терёшкин М.В. Оценка влияния закупочной деятельности на эффективность работы предприятий целлюлозно-бумажной промышленности // ФЭС: Финансы. Экономика. Стратегия. 2018. №5. С.37–44.
2. Сосунова Л.А., Карпова Н.П. Стратегическое управление на рынке логистических услуг // Вестник Самарского государственного экономического университета. 2011. № 3 (77).
3. Зими́на Г.А., Растегаева Ф.С., Шашкова Т.Н. Методические аспекты анализа и оценки эффективности закупочной деятельности на нефтеперерабатывающих предприятиях // Международный научно-исследовательский журнал. 2015. №4 (35). Т.2. С. 22–26.
4. Лайсонс К., Джиллингем М. Управление закупочной деятельностью и цепью поставок. М.: ИНФРА-М, 2014. 795 с.
5. Кириллова Н.Л. Ключевые показатели эффективности для системы снабжения // Интернет-проект: Корпоративный менеджмент: www.cfin.ru URL: https://www.cfin.ru/management/manufact/procurement_kp_i.shtml (дата обращения: 23.08.2019).
6. Линдерс М.Р., Фирон Х.Е. Управление снабжением и запасами. Логистика. М.: Виктория-плюс, 2006. 768 с.
7. Управление закупками и поставками / Линдерс М., Джонсон Ф., Флинн А., Фирон Г. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2015. 751 с.
8. Пармендер Д. Ключевые показатели эффективности. Разработка, внедрение и применение решающих показателей. М.: ЗАО «Олимп-Бизнес», 2008. 288 с.
9. Кирнос О. В., Ткач Т. В. Организационно-экономические факторы, влияющие на логистические затраты системы управления предприятием строительного комплекса // Вестник Приднестровской государственной академии строительства и архитектуры. 2009. № 10 (139). С. 35–41.
10. Панков С.Н. Оценка эффективности закупок: опыт Тюменской области // Электронный Финансово-экономический журнал «Бюджет». 2019. №3. URL: <http://bujet.ru/article/370017.php> (дата обращения: 23.08.2019).
11. Новожилов В.В. Проблемы измерения затрат и результатов при оптимальном планировании. М.: Наука, 1972. С.81.
12. Афанесенко И.Д., Борисова В.В. Логистика снабжения. СПб.: Питер, 2010. 336 с.
13. Суржиков М.А. Макроэкономическое моделирование направлений развития международной торговли // Вестник Донского государственного технического университета. 2012. №12(2–1). С.135–141.

Поступила 17.09.19

Принята в печать 21.10.19

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-4-62-70>

DEVELOPMENT OF PROCUREMENT PERFORMANCE INDICATORS FOR INDUSTRIAL ENTERPRISES OF THE RUSSIAN FEDERATION

Anna G. Nikolaeva – Head of the Education and Methodology Department, Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, Saint Petersburg, Russia. E-mail: nik.anna77@mail.ru

Abstract. Problem Statement (Relevance): Industrial enterprises are working in the highly competitive world market having irregular demand for the products. Under the present conditions enterprises need to improve their operation to keep their positions in the market, and as any production is material-consuming, procurement becomes the most important element influencing the competitiveness of the enterprise in the market. Even small improvement of purchasing processes can become a decisive factor in the competition. To ensure efficient management and optimal strategic decision-making in the field of purchasing, it is necessary not only to analyze external environment, but also assess the purchasing activities of the organization regularly. However, at present, there is no unified set of indicators allowing us to assess procurement performance of industrial enterprises. **Objective of the research:** To develop the balanced system of procurement performance indicators for industrial enterprises of the Russian Federation. **Novelty of the re-**

search: For the first time, we propose the mechanism to make an integrated quantitative assessment of procurement performance of industrial enterprises based on the balanced scorecard. **Findings:** Applying the research performed and summarized data on procurement performance criteria and indicators proposed by both foreign and Russian authors, we developed the balanced system consisting of 29 indicators, including financial performance, business process indicators, training and development of personnel as well as the indicators focusing on satisfying the clients' requirements. **Practical Relevance:** The developed set of indicators is a complete tool used to assess procurement of any Russian enterprise and then to take efficient management decisions on purchasing based on obtained quantitative data.

Keywords: procurement, purchasing, procurement performance assessment, procurement performance indicators, industrial enterprises.

References

1. Nikolaeva A.G., Tereshkin M.V. Assessing the influence of procurement on operation performance of pulp and paper industry enterprises. *FES: Finansy. Ekonomika. Strategiya*. [FES: Finance. Economics. Strategy], 2018, no. 5, pp. 37–44. (In Russ.)
2. Sosunova L.A., Karpova N.P. Strategic management in the transportation services market. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta*. [Vestnik of Samara State University of Economics], 2011, no. 3(77). (In Russ.)
3. Zimina G.A., Rastegaeva F.S., Shashkova T.N. Methodological aspects of analysis and assessment of purchasing efficiency at oil refineries. *Mezhdunarodny nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*. [International research journal], 2015, no. 4(35), vol. 2, pp.22–26. (In Russ.)
4. Lysons K., Gillingham M. *Upravlenie zakupchnoy deyatel'nostyu i tsepyu postavok* [Purchasing and supply chain management]. Moscow: INFRA-M, 2014, 795 p. (In Russ.)
5. Kirillova N.L. Key performance indicators of the supply system. *Internet-proekt: Korporativny menedzhment: www.cfin.ru* [Internet project: Corporate management: www.cfin.ru]. Available at https://www.cfin.ru/management/manufact/procurement_kpi.shtml (Accessed: August 23, 2019).
6. Leenders M.R., Fearon H.E. *Upravlenie snabzheniem i zapasami. Logistika*. [Purchasing and supply management. Logistics.]. Moscow: Victoria-plus, 2006, 768 p. (In Russ.)
7. Leenders M., Johnson F., Flynn A., Fearon H. *Upravlenie zakupkami i postavkami* [Purchasing and supply management]. Moscow: UNITI-DANA, 2015, 751 p. (In Russ.)
8. Parmenter D. *Klyuchevye pokazateli effektivnosti. Razrabotka, vnedrenie i primeneniye reshayushchikh pokazateley*. [Key performance indicators. Developing, implementing and using winning KPIs]. Moscow: CJSC Olymp-Business, 2008, 288 p. (In Russ.)
9. Kimos O.V., Tkach T.V. Organizational and economic factors influencing logistical costs of the enterprise management system of the construction complex. *Vestnik Pridneprovskoy gosudarstvennoy akademii stroitel'stva i arkhitektury* [Bulletin of the Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture], 2009, no. 10(139), pp. 35–41. (In Russ.)
10. Pankov S.N. Procurement efficiency assessment: experience of the Tyumen Region. *Elektronny finansovoekonomicheskiy zhurnal "Byudzhet"* [Budget electronic financial and economic journal], 2019, no. 3. Available at <http://bujet.ru/article/370017.php> (Accessed: August 23, 2019).
11. Novozhilov V.V. *Problemy izmereniya zatrat i rezultatov pri optimal'nom planirovanii* [Problems of measurement of costs and results for optimal planning]. Moscow: Science, 1972, 81 p. (In Russ.)
12. Afanasenko I.D., Borisova V.V. *Logistika snabzheniya*. [Supply logistics]. St. Petersburg: Piter, 2010, 336 p. (In Russ.)
13. Surzhikov M.A. Macroeconomic modeling of guidelines for international trade development. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Vestnik of Don State Technical University], 2012, no. 12(2-1), pp. 135–141. (In Russ.)

Received 17/09/19

Accepted 21/10/19

Образец для цитирования

Николаева А.Г. Разработка показателей оценки эффективности закупочной деятельности промышленных предприятий России // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т.17. №4. С. 62–70. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-4-62-70>

For citation

Nikolaeva A.G. Development of Procurement Performance Indicators for Industrial Enterprises of the Russian Federation. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2019, vol. 17, no. 4, pp. 62–70. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-4-62-70>

ОБОСНОВАНИЕ ОРГАНИЗАЦИОННО-УПРАВЛЕНЧЕСКОГО МЕХАНИЗМА ВЫБОРА СТРАТЕГИИ РАЗВИТИЯ ЦЕМЕНТНЫХ ПРОИЗВОДСТВ НА БАЗЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ФУНКЦИОНАЛОВ

Зайцева Е.В.

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы): в статье описаны результаты аналитических исследований в области обоснования организационно-управленческих структур цементных предприятий на базе проведения интегральной оценки комплекса условий работы (технологичности горно-геологических условий цементного производства, уровня производственно-технических условий и уровня социальных условий) и результатов работы (производственно-технический уровень и финансово-экономический уровень). Интегральная оценка обеспечена соответствующей методикой, использование которой позволяет повысить объективность, надежность и достоверность принимаемых решений в сфере развития технологических систем цементных предприятий. **Цель работы:** разработка укрупненной блок-схемы алгоритма интегральной оценки технологического уклада цементных предприятий с выбором стратегии развития технологических систем. **Используемые методы:** в работе использовался метод «нормы вектора», основанный на методологических принципах теории принятия сложных решений, теории полезности, теории игр, квалиметрии, метода экспертного опроса и другие общепринятые методы и принципы. **Новизна:** к элементам новизны относится усовершенствованная методика интегральной оценки технологического уклада цементных предприятий в условиях внешней и внутренней сред функционирования. **Результат:** в статье представлен итерационный алгоритм и процедура принятия решений по структурно-выделенным группам цементных предприятий с выбором конкретной формы их развития. Результаты работы позволили сформировать ключевые направления подготовки и перечень информационных технологий, обеспечивающих технологическую готовность реализации направлений цифровизации применительно к цементным предприятиям. **Практическая значимость:** сформирован организационно-управленческий аппарат с соответствующим математическим обеспечением для выбора и обоснования стратегий развития цементных предприятий. Практическая значимость результатов исследования обусловлена реальной возможностью повысить эффективность организационно-технологических и управленческих решений на базе разработанных методологии, методики и алгоритма формирования инновационной стратегии развития горноперерабатывающих предприятий цементной отрасли. Основные положения работы использованы в холдинге «Евроцемент» при разработке и реализации планов развития промышленного производства на краткосрочную и долгосрочную перспективу.

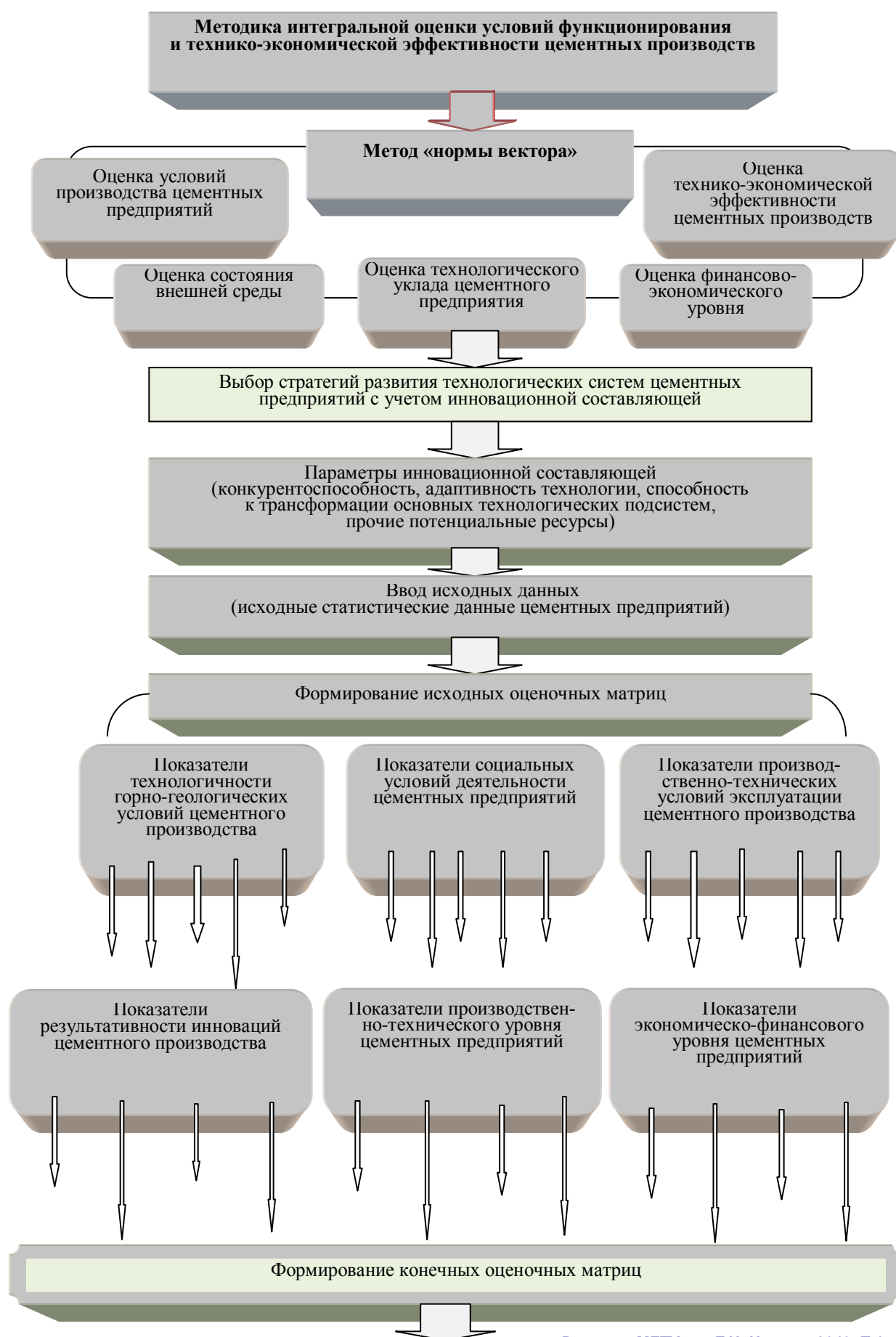
Ключевые слова: цементные предприятия, технологическая система, норма вектора, стратегия развития, интегральный функционал.

Введение

В современных условиях функционирования цементной отрасли основополагающим является вопрос о соответствии системы управления на предприятиях цементного производства современным требованиям внешней и внутренней макроэкономических сред. На цементных предприятиях наиболее детально прорабатываемыми с научной точки зрения являются вопросы не стратегического (чаще всего носят формальный характер), а оперативного управления, что связано, в основном, с недостаточной информационной поддержкой всех жизненно важных процессов управления. Уровень существующих информационных технологий явно недостаточен для интеграции производственных и управленческих

функций, реализуемых основными подразделениями цементных предприятий.

Задача принятия решения, связанная с выбором альтернативы на базе использования множества критериев, формализованно сводится к построению условно-оптимальной области, которая каждому вектору ставит в соответствие действительное число, определяющее степень предпочтительности данного решения. При этом операнд является интегральным критерием, присваивающим каждой оцениваемой альтернативе соответствующее значение эффективности. В общем понимании под интегральным критерием понимается синтетический показатель, который функционально формируется путем агрегирования (свертки) воедино всех принятых к учету частных показателей критериев. Согласно теории полезности, все они должны иметь разную важность (полезность), что объясняется неодинаковым влиянием



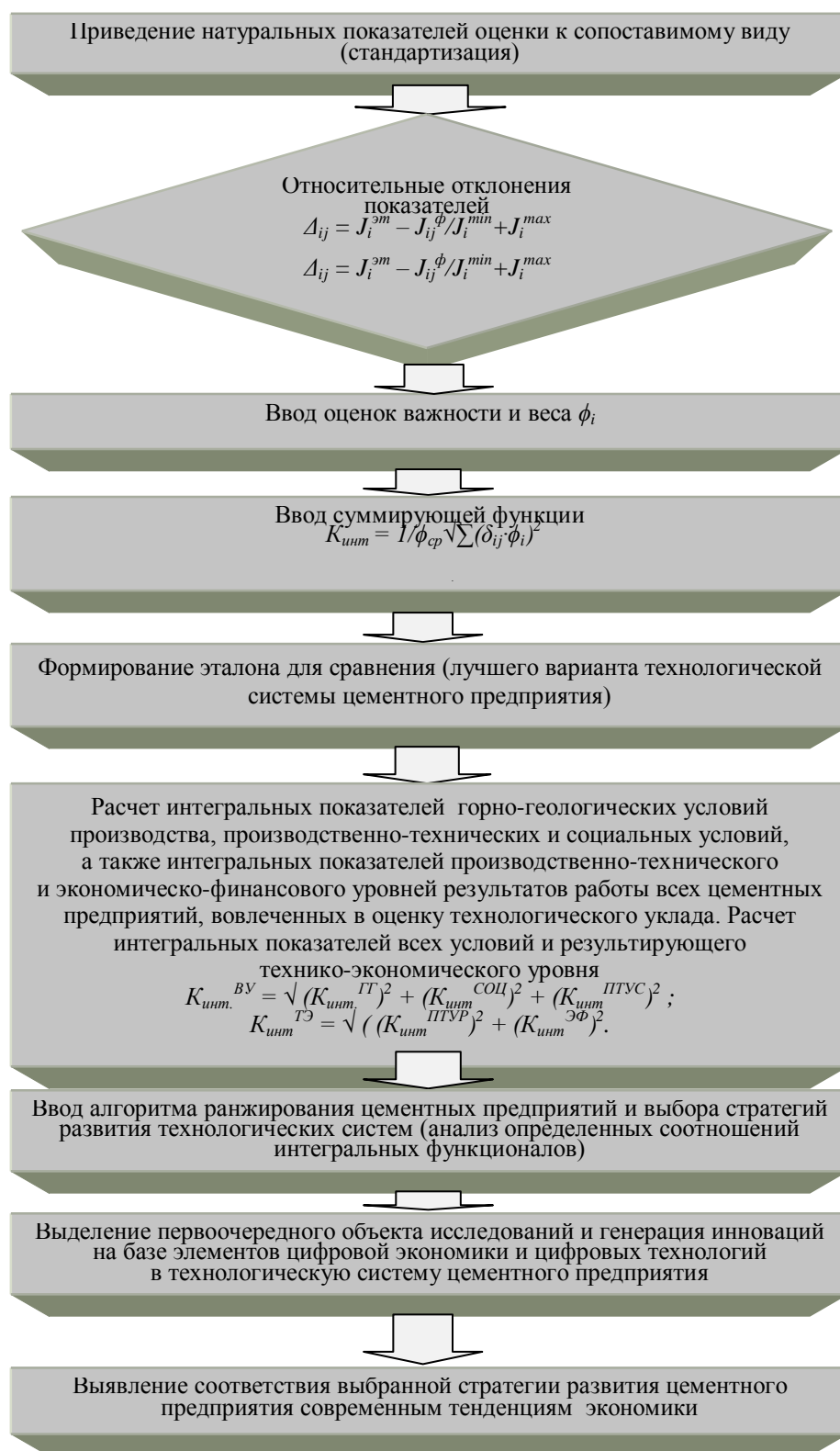


Рис.1. Укрупненная блок-схема алгоритма интегральной оценки технологического уклада цементных предприятий с выбором стратегии развития технологических систем

на конечные технико-экономические результаты производственно-хозяйственной деятельности. Далее реализуется процедура их свертки воедино с использованием суммирующей функции свертки. Перед этим все частные показатели-критерии оценки проходят процедуру приведения их к сопоставимому виду (переход от натуральных единиц измерения к относительным). В конечном итоге интегральный критерий позволяет проранжировать множество альтернатив (решений) по степени предпочтительности.

Содержание работы

Концепция выбора стратегии инновационного развития горноперерабатывающих предприятий цементной отрасли в этих условиях должна базироваться на совокупности методов и моделей, критериальных показателях теории принятия сложных решений и квалиметрии, использование которых в процессе принятия решений позволяет достигнуть требуемой объективности, надежности и достоверности с учетом динамической составляющей среды функционирования. Укрупненный алгоритм реализации операции целеполагания в этом случае выглядит следующим образом: 1 итерация – формирование исходного множества стратегий развития цементного предприятия; 2 итерация – сужение исходного множества до множества допустимых стратегий; 3 итерация – выбор оптимальной (наилучшей) стратегии. Исход этой операции напрямую зависит от множества разнообразных факторов, среди которых можно выделить подмножество управляемых, которые используются для формирования множества стратегий и на которые можно влиять, и неуправляемые, на которые влиять нельзя, и образующие комплекс условий проведения операции. Для выбора оптимальной стратегии на основе системотехники сравниваются эффективности альтернативных стратегий на основе использования критерия эффективности, под ним подразумевается правило, позволяющее количественно сопоставлять альтернативные стратегии и производить их ранжирование по степени предпочтения.

На основании введенных понятий и определений может быть сформирована модель проблемной ситуации в виде следующей системы взаимосвязанных элементов:

$$[U, Z, H, G, Y, \Psi, W, K, P], \quad (1)$$

где U – множество альтернативных стратегий развития цементных предприятий;

Z – множество значений управляемых и неуправляемых факторов;

G – множество исходов целеполагания;

Y – количественное выражение конечного результата операции;

H – модельное представление операции, выявление соответствия множества альтернативных стратегий U и управляемых и неуправляемых факторов Z множеству результатов $Y(G) \rightarrow (H: U^*A \rightarrow Y)$;

W – степень эффективности стратегии;

Ψ – оператор соответствия «результат – степень эффективности» ($\Psi: Y \rightarrow W$);

K – критерий эффективности стратегии (интегральный критерий);

P – модель предпочтений на элементах исходного множества $D = \{U, Z, G, Y, W, K\}$.

Для реализации данного методологического подхода использовались общепринятые методы теории полезности, квалиметрии, принятия сложных решений с привлечением методов экспертного опроса, что позволило сформировать укрупненную блок-схему выбора стратегий развития цементных производств (рис.1).

Процесс группирования всех вовлеченных в оценку цементных производств подразумевает формирование трех основных групп. Именно по сочетанию этих элементов, в конечном счете, должны приниматься и обосновываться решения либо по инвестированию цементных предприятий, либо по процедуре их закрытия.

Группа 1-а:

$$K_{\text{инт}}^{\text{ГТ}} \sim \min; K_{\text{инт}}^{\text{ВУ}} \sim \min; K_{\text{инт}}^{\text{Э}} \sim \min; \\ K_{\text{инт}}^{\text{П.Т.УР}} \sim \min. \quad (2)$$

Данное сочетание говорит о том, что качество (технологичность) условий и результатов работы подобных цементных производств сравнительно высоки.

В подобных условиях рекомендуется не использовать масштабные изменения в их технологической цепочке, при этом основная доля инвестиций должна затрачиваться на реализацию процедуры поддержания производственной мощности цементных производств на достигнутом уровне.

Группа 1-б:

Данное сочетание интегральных показателей говорит о низком качестве условий (технологичности) и результатов работы:

$$K_{\text{инт}}^{\text{ГТ}} \sim \max; K_{\text{инт}}^{\text{ВУ}} \sim \max; K_{\text{инт}}^{\text{ПТЭ}} \sim \max; K_{\text{инт}}^{\text{Э}} \sim \max; \\ K_{\text{инт}}^{\text{П.Т.УР}} \sim \max. \quad (3)$$

В соответствии с логикой порядка принятия решений предпринимать масштабные изменения в технологической цепочке, связанные со значи-

тельными инвестициями, у этих цементных предприятий явно нецелесообразно. В противном случае возможна даже консервация и закрытие предприятия.

Группа 1-в:

Данное сочетание интегральных показателей говорит о среднелюбоприятном уровне условий (технологичности) и результатов работы данных цементных предприятий

$$K_{инт}^{IT} \sim \text{Sredn}; K_{инт}^{BY} \sim \text{Sredn}; K_{инт}^3 \sim \text{Sredn}; K_{инт}^{IT3} \sim \text{Sredn}; \\ K_{инт}^{П,Т,УР} \sim \text{sredn.} \quad (4)$$

Но именно данные предприятия, попавшие в эту группу, безусловно должны рассматриваться как резерв совершенствования цементных производств.

Аналитические исследования показали – чтобы воплотить в жизнь концепцию инновационного развития цементного производства, необходимо подготовить цементные компании по ряду ключевых направлений, причем технологическую готовность реализации направлений цифровизации бизнес-блоков должны обеспечивать следующие информационные технологии, представленные на рис. 2.

Основными отличительными признаками цифровой структуры заявляются элементы гори-

зонтальной организации, плоской иерархии и ориентации на конкретного потребителя, осуществляемые производственные и бизнес-процессы.

Для полноценной реализации цифрового предприятия необходимо сформировать специальные уровни управления, такие как управление проектами, процессами, ИТ-технологиями, организацией и персоналом.

Чтобы избежать негативных моментов в этой сфере, необходимо пользоваться адаптированной к этим условиям специфической схемой управления. При этом управление процессами связано с анализом бизнес-процессов, который позволит составить четкую картину того, какие процессы на предприятии требуют оптимизации. Без интегрированного подхода к производству предприятия могут упустить возможность повышения эффективности, производительности, доходности и быстрой адаптации к рынку. Целью данных мероприятий является оптимизация режимов работы оборудования, оптимизация загрузки оборудования, логистическая оптимизация, повышение производительности и безопасности труда, улучшение прогнозирования спроса, повышение качества продукции и сокращение сроков вывода продукции на рынок.



Рис. 2. Информационные технологии, обеспечивающие технологическую готовность реализации направлений инновационного развития цементных предприятий

Выводы

Технология производства цемента является динамичной и саморазвивающейся производственной системой, эффективность функционирования которой предопределяется ее способностью в максимально короткие сроки адаптироваться к изменяющимся производственно-техническим условиям с обязательным выделением стратегической базовой подсистемы, в качестве которой выступает выбор и обоснование стратегии устойчивого функционирования и развития на основе системотехнического подхода.

Представленные исследования позволяют достаточно точно, объективно и надежно выделить и распределить цементные производства по представленным выше группам. Данное распределение и группирование цементных предприятий, в конечном итоге, по уровню инвестиционной привлекательности позволяет выделить те, которые способны обеспечить максимальную и скорую отдачу вложенных инвестиций с наименьшим инвестиционным риском. Основной задачей при этом заявляется задача определения адресности и приоритетности выделения инвестиций, основополагающим при этом является процесс выбора цементного предприятия как объекта инвестирования.

Предложенная интегрированная модель перехода цементных предприятий на новый технологический и организационный уклады:

- позволяет увеличивать эффективность и

продуктивность выполняемых операций в сфере реализации новых бизнес-моделей и бизнес-процессов;

- предполагает активное внедрение практических рекомендаций и результатов анализа, изучения и внедрения гибких проектных решений;
- реализует комплекс новых подходов для адаптации, эффективного управления и контроля функционирования промышленного предприятия с учетом изменяющихся условий.

Список литературы

1. Трифонов Ю.В., Ширяева Ю.С., Громницкий В.С. Анализ и интегральная оценка состояния и стратегий развития экономических систем // Креативная экономика. 2019. № 6. С. 1063–1074.
2. Яшин С.Н., Амбарцумян А.Э., Лапшина Е.Н. Интегральная оценка инновационного развития предприятия как основа принятия управленческих решений // Креативная экономика. 2018. № 2. С. 167–176.
3. Антамошкина Е.Н. Оценка продовольственной безопасности региона: вопросы методологии // Продовольственная политика и безопасность. 2015. № 2. С. 97–112.
4. Батьковский А.М., Кравчук П.В., Стяжкин А.Н. Оценка экономической эффективности производства высокотехнологичной продукции инновационно-активными предприятиями отрасли // Креативная экономика. 2019. № 1. С. 115–128.
5. Гамбеева Ю.Н. Оценка региональной конкурентоспособности (на примере российских регионов) // Российское предпринимательство. 2013. № 21. С. 33–43.

Поступила 15.11.19

Принята в печать 29.11.19

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-4-71-77>

RATIONALE FOR THE ORGANIZATIONAL AND MANAGEMENT MECHANISM TO SELECT THE CEMENT PLANT DEVELOPMENT STRATEGY USING INTEGRAL-TYPE FUNCTIONALS

Elena V. Zaitseva – PhD (Eng.),

National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russia. E-mail: msmu-prpm@yandex.ru

Abstract. Problem Statement (Relevance): The paper describes the results of analytical studies in the field of providing rationale for organizational and management structures of cement companies by conducting an integral estimation of a set of operation conditions (manufacturability of mining and geological conditions of cement production, a level of production and technical conditions and social conditions) and outputs (a production and technical level and financial and economic performance). The integral estimation is supported by the appropriate methodology used to increase impartiality, accuracy and reliability of decisions taken on the development of technological systems of cement plants. **Objective:** To devel-

op an integrated block diagram of the integral estimation algorithm for a technological structure of cement plants, including a selection of the technological system development strategy. **Methods Applied:** The vector norm method was used applying the methodological principles of the theory of complex decision making, the utility theory, the game theory, qualimetry, the expert survey method and other generally accepted methods and principles. **Novelty:** The elements of novelty include an improved method of integral estimation of the cement plant technological structure in their external and internal operational environment. **Findings:** The paper presents an iterative algorithm and a decision-making procedure for structural-

ly selected groups of cement plants with an option for a specific form of their development. The findings made it possible to form the key areas of preparation and a list of information technologies ensuring technological readiness for the digitalization at cement plants. **Practical Relevance:** The organizational and management structure with the appropriate mathematical tool was formed to select and justify cement plant development strategies. The practical relevance of the findings of the study is due to a real possibility to increase the efficiency of organizational, technological and management solutions based on the developed methodology, technique and algorithm of planning the innovative development strategy for mining and processing companies in the cement industry. The main provisions of the research are used in EUROCEMENT holding, when developing and implementing short-term and long-term industrial production development plans.

Keywords: cement plants, technological system, vector norm, development strategy, integral-type functional.

References

1. Trifonov Yu.V., Shiryayeva Yu.S., Gromnitsky V.S. Analysis and integral assessment of the state and development strategies of economic systems. *Kreativnaya ekonomika* [Creative economy], 2019, no. 6, pp. 1063–1074. (In Russ.)
2. Yashin S.N., Ambartsumyan A.E., Lapshina E.N. Integrated assessment of innovative development of the enterprise as a basis for management decisions. *Kreativnaya ekonomika* [Creative economy], 2018, no. 2, pp. 167–176. (In Russ.)
3. Antamoshkina E.N. Assessment of food security of the region: issues of methodology. *Prodovol'stvennaya politika i bezopasnost* [Food policy and security], 2015, no. 2, pp. 97–112. (In Russ.)
4. Batkovsky A.M., Kravchuk P.V., Styazhkin A.N. Evaluation of the economic efficiency of the production of high-tech products by innovation-active enterprises of the industry. *Kreativnaya ekonomika* [Creative economy], 2019, no. 1, pp. 115–128. (In Russ.)
5. Gambeeva Yu.N. Assessment of regional competitiveness (using Russian regions as an example). *Rossiiskoe predprinimatel'stvo* [Russian Journal of Entrepreneurship], 2013, no. 21, pp. 33–43. (In Russ.)

Received 15/11/19

Accepted 29/11/19

Образец для цитирования

Зайцева Е.В. Обоснование организационно-управленческого механизма выбора стратегии развития цементных производств на базе интегральных функционалов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т.17. №4. С. 71–77. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-4-71-77>

For citation

Zaitseva E.V. Rationale for the Organizational and Management Mechanism to Select the Cement Plant Development Strategy Using Integral-Type Functionals. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2019, vol. 17, no. 4, pp. 71–77. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-4-71-77>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Ганиев Изатулло Наврузович – д-р хим. наук, академик АН Республики Таджикистан, профессор кафедры «Технология химических производств», Таджикский технический университет им. М.С. Осими, Душанбе, Таджикистан. E-mail: ganiev48@mail.ru

Ганиева Наргис Изатуллоевна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Материаловедение, металлургические машины и оборудование», Таджикский технический университет им. М.С. Осими, Душанбе, Таджикистан. E-mail: n.ganieva1977@mail.ru

Герасименко Татьяна Евгеньевна – канд. техн. наук, доц., начальник отдела интеллектуальной собственности, Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), Владикавказ, РСО-Алания, Россия. E-mail: gerasimenko_74@mail.ru

Ефремова Вероника Евгеньевна – магистр, кафедра «Технология и организация строительного производства», Московский государственный строительный университет, Москва, Россия. E-mail: efremova.ronnie@yandex.ru

Зайцева Елена Вячеславовна – канд. техн. наук, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия. E-mail: mstmprgm@yandex.ru

Иброхимов Насим Файзуллоевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Материаловедение, металлургические машины и оборудование», Таджикский технический университет им. М.С. Осими, Душанбе, Таджикистан. E-mail: nasimqon@mail.ru

Конев Сергей Васильевич – канд. техн. наук, доц., кафедра «Механика», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.

Кузин Евгений Александрович – начальник управления по контролю и надзору за объектами метрополитена, Комитет государственного строительного надзора города Москвы (Мосгосстройнадзор), Москва, Россия. E-mail: eakuzin@mail.ru

Лapidус Азарий Абрамович – д-р техн. наук, профессор, кафедра «Технология и организация строительного производства», Московский государственный строительный университет, Москва, Россия. E-mail: lapidus58@mail.ru. ORCID 0000-0001-7846-5770

Медяник Надежда Леонидовна – д-р техн. наук, профессор кафедры «Химия», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.

Мешков Евгений Иванович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Металлургия цветных металлов и автоматизация металлургических процессов», Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), Владикавказ, РСО-Алания, Россия. E-mail: eimeshkov@mail.ru

Мишурина Ольга Алексеевна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Химия», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.

Миянов Андрей Гафурович – инженер, ООО «Уральская металлообрабатывающая компания», Магнитогорск, Россия.

Муллина Эльвира Ринатовна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Химия», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.

Николаева Анна Георгиевна – начальник учебно-методического управления ВШТЭ, Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: nik.anna77@mail.ru

Одиназода Хайдар Одина – д-р техн. наук, профессор, чл.-кор. АН Республики Таджикистан, ректор Таджикского технического университета им. М.С. Осими, Душанбе, Таджикистан. E-mail: haydar.odinazoda@mail.ru

Панкратьев Петр Владимирович – д-р геол.-мин. наук, профессор, Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия.

Полякова Марина Андреевна – д-р техн. наук, доц., проф. кафедры «Технологии обработки материалов», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. E-mail: m.polyakova@magtu.ru. ORCID 0000-0002-1597-8867

Попов Игорь Павлович – ст. преп. кафедры «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты», Курганский государственный университет, Курган, Россия. E-mail: ip.porow@yandex.ru

Ратникова Наталья Сергеевна – аспирант, Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия. E-mail: nata.ratnikova.96@mail.ru

Смирнова Анастасия Владиславовна – ст. преп. кафедры «Химия», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.

Топчий Дмитрий Владимирович – канд. техн. наук, доц., кафедра «Технология и организация строительного производства», Московский государственный строительный университет, Москва, Россия. E-mail: dvtopchiy0405@gmail.com. ORCID 0000-0002-3697-9201

Троценко Игорь Герасимович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Металлургия цветных металлов и автоматизация металлургических процессов», Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), Владикавказ, РСО-Алания, Россия. E-mail: itrocenko@mail.ru

Файнштейн Александр Соломонович – канд. физ.-мат. наук, доц., кафедра «Вычислительная техника и программирование», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. E-mail: swetlana@mgn.ru

Харченко Максим Викторович – канд. техн. наук, доц., кафедра «Механика», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.

Шарипова Хилола Якубовна – ст. преп., Хатлонский государственный медицинский университет, Душанбе, Таджикистан. E-mail: simran.77@mail.ru

Янсантова Миляуша Исмагиловна – аспирант, кафедра «Технология машиностроения», Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия. E-mail: milyausha.yansaitova@mail.ru