

ВЕСТНИК

Магнитогорского государственного технического
университета им. Г.И. Носова

2020. Т.18, №1

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

Издается с марта 2003 года

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Председатель редакционной коллегии
В.М. Колокольников (Россия)

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

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», 2020

Подписной индекс издания 48603 в объединенном каталоге «Пресса России», том 1.

Также подписку в оперативном режиме можно оформить и оплатить в удобной для Вас форме на подписной страничке сайта Агентства «Книга-Сервис» по ссылке:

код html: <http://www.akc.ru/itm/vestnik-magnitogorskogo-gosudarstvennogo-tehnicheskogo-universiteta-im-gi-nosova/>

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

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

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

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

Адрес редакции:

455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»

пр. К. Маркса, 45/2, оф. 402

Тел.: (3519) 22-14-93.

URL: <http://www.vestnik.mgtu.ru>

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 25.03.2020. Заказ 117. Тираж 500 экз. Цена свободная.

VESTNIK

of Nosov Magnitogorsk State Technical University

2020. Vol.18, no.1

The Journal is included in the List of Russian Peer-Reviewed Scientific Journals which are supposed to publish the major results of doctoral and PhD dissertations. 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. Khramshin (Russia),
A.G. Korchunov (Russia), O.S. Logunova (Russia),
D. Milovanovic (Serbia), K. Mori (Japan),
I. Musirin (Malaysia), A.B. Naizabekov (Kazakhstan),
M. Pietrzyk (Poland), R. Qin (UK), V.F. Rashnikov (Russia),
G.A. Rogerson (UK), V.M. Schastlivtsev (Russia),
O.N. Tulupov (Russia), J.-B. Vogt (France)

EDITORIAL STAFF

Editor-in-Chief O.N. Tulupov

First Deputy Chief Editor M.A. Polyakova

Deputy Chief Editors:

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

Executive Secretary M.V. Shubina

Editor N.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, 2020

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

Publisher 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: 25.03.2020. Order 117. Circulation: 500. Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

Разработка полезных ископаемых	4
<i>Хазин М.Л.</i>	
Роботизированная техника для добычи полезных ископаемых	4
<i>Чебан А.Ю., Секисов А.Г.</i>	
Карьерный экскаватор с рабочим оборудованием для отделения обогащенной рудной мелочи.....	16
Обработка металлов давлением	23
<i>Аль-Хузай А.С.О., Выдрин А.В., Широков В.В.</i>	
Исследование сопротивления металла пластической деформации стали марки 32Г2У в широком диапазоне изменения температур	23
Технологии обработки материалов	31
<i>Троценко И.Г., Герасименко Т.Е., Алкацев В.М., Евдокимов С.И.</i>	
Совершенствование технологии переработки отходов твердых сплавов. Часть 2. Определение оптимальных условий реализации технологии.....	31
Наноматериалы и нанотехнологии	40
<i>Щегольков А.В., Ягубов В.С.</i>	
Тепловыделения наномодифицированного композита на основе силикона с бинарный наполнителем унт-графит.....	40
Стандартизация, сертификация и управление качеством	49
<i>Полецков П.П., Алексеев Д.Ю., Кузнецова А.С., Никитенко О.А.</i>	
Анализ технических требований, предъявляемых к подкату для гибких насосно-компрессорных труб.....	49
<i>Антипова Т.Н., Олешко А.Ю.</i>	
Методические основы управления качеством продукции из волокнистых металлокомпозитов	55
<i>Черкасов Д.А.</i>	
Разработка методики оценки системы менеджмента качества предприятия с применением квалиметрических методов	63
Энергетика металлургии, энергосбережение и электротехнические комплексы	71
<i>Корнилов Г.П., Филатов А.М., Филатова О.А., Храмишин Т.Р., Храмишин Р.Р.</i>	
Исследование привода изгибо-растяжной машины непрерывно-травильного агрегата стана холодной прокатки	71
<i>Пырко С.А., Митюгло А.М., Ишметьев Е.Н.</i>	
Автономные измерительные модули для систем диагностики электродвигателей	80

CONTENTS

Mining and Mineral Processing	4
<i>Khazin M.L.</i>	
Robotic Equipment for Mining Operations.....	4
<i>Cheban A.Yu., Sekisov A.G.</i>	
Mining Excavator with the Capability to Separate Concentrated Ore Fines	16
Metal Forming.....	23
<i>Al-Khuzai A.S.O., Vydrin A.V., Shirokov V.V.</i>	
Studying Plastic Resistance of Steel Grade 32G2U in a Broad Range of Temperature Change.....	23
Material Process Engineering	31
<i>Trotsenko I.G., Gerasimenko T.E., Alkatsev V.M., Evdokimov S.I.</i>	
Optimised Waste Carbide Recycling Technology. Part 2. Finding Optimum Implementation Conditions.....	31
Nanomaterials and Nanotechnologies.....	40
<i>Shchegolkov A.V., Yagubov V.S.</i>	
Heat Generated by a Nanomodified Composite Made with Silicone and a CNT/Graphite Filler	40
Standardization, Certification and Quality Management	49
<i>Poletskov P.P., Alekseev D.Yu., Kuznetsova A.S., Nikitenko O.A.</i>	
Analysis of Technical Requirements for Semi-Finished Rolled Products for Coiled Tubing.....	49
<i>Antipova T.N., Oleshko A.Y.</i>	
Basic Procedures of Product Quality Control for Fiber Metal Composites	55
<i>Cherkasov D.A.</i>	
Development of an Assessment Methodology for the Quality Management System of an Organization Using Qualimetry Methods	63
Metallurgical Power Engineering, Energy Saving and Electrical Systems	71
<i>Kornilov G.P., Filatova O.A., Filatov A.M., Khamshin T.R., Khamshin R.R.</i>	
Studying Drives of the Tension Lev-eller on the Continuous Pickling Line of the Cold Rolling Mill.....	71
<i>Pyrko S.A., Mitioglo A.M., Ishmetyev E.N.</i>	
Autonomous Measuring Modules for Electric Motor Diagnostic Systems	80

РАЗРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

MINING AND MINERAL PROCESSING

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

УДК 622.271

DOI: 10.18503/1995-2732-2020-18-1-4-15



РОБОТИЗИРОВАННАЯ ТЕХНИКА ДЛЯ ДОБЫЧИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Хазин М.Л.

Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы): для повышения конкурентоспособности горным предприятиям следует увеличивать эффективность труда и уровень безопасности работ. Основным технологическим звеном при добыче полезных ископаемых является горнотранспортный комплекс, поэтому разработка роботизированных систем является важной задачей развития горной промышленности России. **Цель работы:** анализ направлений, проблем и целесообразности использования роботизированных технологий разработки месторождений. Оценка технико-экономической эффективности применения автоматизированных систем для добычи полезных ископаемых. **Используемые методы:** применялись методы системного анализа, математической статистики, научного обобщения показателей работы роботизированных горных машин и оборудования. **Результат:** проанализировано современное состояние, перспективы и общие направления развития роботизированного горного оборудования. Рассмотрены передовые виды зарубежной и российской автоматизированной техники, а также основные концепции и программы развития Российской Федерации в сфере роботизации. Показано, что автономные транспортные средства будут применяться все в более широких масштабах, что может в корне изменить наше представление о добыче и транспортировке горной массы. Эти машины могут работать в суровых, динамичных и неопределенных условиях, таких как арктический холод или зной пустыни, в глубоких подземных шахтах, где может быть очень жарко и влажно или высоко в горах. На сегодняшний день области применения робототехники в горнодобывающей промышленности включают автоматизированное дозирование, выемку грунта и транспортировку, картирование и геодезию, бурение и обработку взрывчатых веществ. Применение робототехники в горнодобывающей промышленности предъявляет особые требования к ее надежности и качеству, порождает многочисленные проблемы и нерешенные вопросы, которые должны быть совместно определены и решены как научными кругами, так и промышленностью. **Практическая значимость:** роботы являются ключевыми инструментами для повышения производительности, поскольку они выполняют широкий спектр ручных задач более эффективно и последовательно, чем люди. Горнодобывающая промышленность имеет большой потенциал для автоматизации, с применением которой появляется возможность для оптимизации, поскольку становится доступно больше информации, а действия могут многократно повторяться с высокой точностью. Важнейшим достоинством роботизированных систем является повышение уровня безопасности за счет вывода человека из зоны ведения горных работ. Широкое применение роботизированной техники на открытых и подземных горных работах может привести к существенным изменениям при проектировании карьеров, шахт и правил безопасности, а также способствовать разработке новых видов горных машин и оборудования, что обеспечит значительное повышение эффективности добычи полезных ископаемых.

Ключевые слова: горное дело, роботизированная техника, автоматизированные системы, карьерные машины, безопасность производства, система управления, эффективность.

© Хазин М.Л., 2020

Для цитирования

Хазин М.Л. Роботизированная техника для добычи полезных ископаемых // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т.18. №1. С. 4–15. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-1-4-15>



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

ROBOTIC EQUIPMENT FOR MINING OPERATIONS

Mark L. Khazin

Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance): To increase competitiveness, mining enterprises should increase labor efficiency and the level of work safety. A main technological link in the extraction of minerals is the mining transport complex. So, the development of robotic systems is an important task for the development of the mining industry in Russia. **Objectives:** The objectives of the paper is to analyze directions, problems and feasibility of using robotic mining technologies; to assess the technical and economic efficiency of automated systems in mining. **Methods Applied:** Methods of system analysis, mathematical statistics, scientific generalization of the performance indicators of robotic mining machines and equipment were used. **Findings:** The author analyzed the current state, prospects and general directions of development of robotic mining equipment. The advanced types of foreign and Russian automated technology, as well as the basic concepts and robotics development programs of the Russian Federation, are considered. It is shown that autonomous vehicles will be used on a larger scale, and this can fundamentally change our understanding of the extraction and transportation of rock mass. These machines can operate in harsh, dynamic and uncertain conditions, such as arctic cold or desert heat, in deep underground mines, where it can be very hot and humid or high in the mountains. Today, areas of application of robotics in the mining industry include automated dosing, excavation and transportation, mapping and geodesy, drilling and processing of explosives. The use of robotics in the mining industry places special demands on reliability and quality, gives rise to numerous problems and unresolved issues that must be jointly identified and resolved by both the scientific community and industry. **Practical Relevance:** Robots are key tools for increasing productivity as they perform a wide range of manual tasks more efficiently and consistently than humans. The mining industry has great potential for automation, giving rise to an opportunity for optimization, since more information becomes available, and actions can be repeated many times with high accuracy. The most important advantage of robotic systems is to increase the level of safety due to the withdrawal of man from the mining zone. A widespread use of robotic equipment in open and underground mining can lead to significant changes in the design of quarries, mines, and safety rules, as well as contribute to the development of new types of mining machinery and equipment, which will significantly increase the efficiency of mining.

Keywords: mining, robotic equipment, automated systems, mining trucks, production safety, control system, efficiency.

For citation

Khazin M.L. Robotic Equipment for Mining Operations. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2020, vol. 18, no. 1, pp. 4–15. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-1-4-15>

Введение

Горная промышленность находится в постоянном развитии, что обуславливает применение инновационных технологий и современного оборудования. Повышение эффективности работы горного предприятия может обеспечиваться за счет повышения производительности процесса транспортирования горной массы, экономии топлива, сокращения автопарка, уменьшения расходов на эксплуатацию и техническое обслуживание.

При разработке месторождений многие годы применялись автоматизированные системы для стационарного оборудования, а в настоящее время на рудниках, карьерах и в шахтах стали использовать автономное техническое оборудование для увеличения безопасности труда и экономичности производства.

Автоматизация горной промышленности проводится по нескольким направлениям — от

непосредственно добывающего оборудования до технологического транспорта и других технических средств. С 2016 года значительно увеличилось применение роботизированных систем в горной промышленности — автономных самосвалов, поездов, буровых установок, позволившее увеличить эффективность добычи полезных ископаемых и снизить нехватку рабочих кадров, что весьма существенно для экономически развитых стран с высоким уровнем средней заработной платы.

В последние годы производство робототехники переживает мощный подъем. В 2019 г. объем мирового рынка промышленных автоматизированных систем управления составил 16 млрд долларов, а его рост (по прогнозу Международной федерации робототехники) ожидается 10–12% в год. Автоматизация становится необходимой в отраслях, где работодатели особенно часто сталкиваются с недостатком квалифицированных кадров и возрастающими затратами на

рабочую силу. Особенно ускоренно робототехника развивается в таких областях, как здравоохранение, где миниатюрные роботы, перемещаясь по кровеносным сосудам, могут выполнять различные операции; обороноспособность, где военная техника, управляемая роботами, минимизирует потери личного состава; обрабатывающая промышленность, где роботы повышают производительность на 60–70%, и горнодобывающая отрасль.

Добыча полезных ископаемых – это практика добычи ресурсов. Сегодня международный бизнес по добыче полезных ископаемых является сильно механизированной отраслью, в которой используется мощное дизельное и электрическое оборудование. Эти машины должны работать в суровых, динамичных и неопределенных условиях, таких как арктический холод или зной пустыни, в глубоких подземных шахтах, где может быть очень жарко и влажно, или высоко в горах [1–3].

В ближайшее время основным направлением развития мировой горнодобывающей промышленности останется открытый способ разработки полезных ископаемых. Их добыча проводится практически во всех климатических зонах во все более опасных и сложных горно-геологических и природных условиях, в труднодоступных регионах, осложняемых углублением карьеров, запыленностью, загазованностью и сложностью проветривания.

Эти и другие факторы оказывают негативное влияние на здоровье персонала. При постоянном воздействии выхлопных газов дизельных двигателей горного оборудования на организм развиваются бронхиты, иммунодефицит, страдает нервная система, сосуды головного мозга и другие органы. Например, рак легких был обнаружен у горнорабочих, подвергавшихся действию выхлопных газов на протяжении 10–20 лет. Кроме того, машинисты экскаваторов и водители карьерных самосвалов постоянно подвергаются воздействию вибрации [4, 5]. Горные работы, как одна из наиболее опасных профессий в мире, связана с риском для жизни. Согласно данным Международной организации труда (ILO), всего десять лет назад число рабочих горнодобывающей отрасли составляло только один процент мировой рабочей силы, но на него приходилось восемь процентов несчастных случаев с летальным исходом.

Суровые условия Арктики и Сибири, гор и пустынь, районы с недостаточно развитой социальной инфраструктурой существенно осложняют участие человека в технологии добычи полезных ископаемых, вызывают проблемы не-

хватки квалифицированного персонала [2, 6, 7].

При наличии жесткой конкуренции между горнодобывающими компаниями, усложнения условий работы технологического транспорта, повышения интенсивности процессов добычи, ужесточения требований к охране труда и экологии особое значение приобретает роботизация технологического процесса разработки месторождений. Это позволяет повысить безопасность и производительность труда за счет оптимизации технологического процесса и исключения человеческого фактора [3, 7, 8].

Текущее состояние отрасли

Основной частью технологического процесса добычи полезных ископаемых является горно-транспортный комплекс, поэтому роботизация горных машин и оборудования на открытых и подземных горных работах служит одним из главных направлений повышения безопасности и эффективности труда. В этом направлении значительных успехов достигли основные производители карьерных самосвалов – Caterpillar, Komatsu и Hitachi, причем на рынке беспилотной большегрузной техники Caterpillar считается пионером. Компания представила первый автономный автомобиль более 20 лет назад, а сегодня количество роботизированных самосвалов и бульдозеров, работающих в горной промышленности по всему миру, исчисляется сотнями. На март 2019 года серию роботизированных самосвалов составляли Cat 789D, Cat 793F и Cat 797F грузоподъемностью 181, 227 и 363 т соответственно. Эти автономные самосвалы предоставляют постоянную телеметрию, самостоятельно реагируют на вызовы, поступающие от экскаватора, и перевозят породу к месту разгрузки. В ноябре 2018 года компания Caterpillar сообщила, что ее автономные карьерные самосвалы, оснащенные системой Cat Command, перевезли 1 млрд т горной массы.

Компания Komatsu использует более 130 роботизированных самосвалов, оснащенных автоматической транспортной системой (Autonomous Haulage Systems – AHS), перевозящих разные грузы на шести горных предприятиях в Австралии, Северной и Южной Америке. К 2018 г. роботизированные самосвалы AHS компании Komatsu перевезли более 2 млрд т горной массы и руды.

Еще в 2010 г. компания Rio Tinto создала диспетчерский центр, который удаленно контролирует 4 морских порта, 15 рудников и 43 же-

лезнодорожных состава¹. Сегодня компания Rio Tinto использует более сотни роботизированных самосвалов AHS на своих рудниках Yandicoogina и Nammuldi. Эти машины могут практически самостоятельно маневрировать по рудникам, поскольку маршрут движения заложен в их навигационную систему. Управление самосвалами осуществляется операторами из центра в Перте, находящемся в 1200 км от места добычи. В настоящее время – это пример наиболее комплексного применения автономной технологии.

Автономные самосвалы Volvo FH (в количестве 6 шт.) транспортируют известняк из карьера норвежской горнодобывающей компании Brønnø Kalk AS в близлежащий порт на участке длиной 5 км, включающем туннели. В течение 2018 года проходила тестовая эксплуатация этого проекта, а в конце 2019 года он перешел в режим коммерческой эксплуатации².

В 2016 году компании Komatsu, Volvo и Scania представили автономные карьерные самосвалы без кабины водителя, которого заменил центральный контроллер. Это позволило изменить компоновку и эргономику машины³ (рис. 1).

Основным отличием данных машин является их способность двигаться вперед и назад с равной скоростью, полный привод и управление, как вращением всеми четырьмя колесами, так и поворотом. Вследствие этого, уменьшается время на постановку машины под погрузку и разгрузку. Поскольку отсутствует необходимость в развороте автомобиля, то экономится место в призабойной и разгрузочной зонах (требуется минимум вскрышных работ). Кроме того, самосвал Komatsu IAHV способен двигаться «крабо-вым ходом».

Крупнейшая канадская нефтедобывающая компания Suncor Energy, после испытания автономных самосвалов на песчаных полях Альберты (Австралия), в 2015 году закупила 175 беспилотных машин Komatsu.

В начале 2019 года Китай представил свой автономный карьерный самосвал грузоподъемностью 110 т, рассчитанный на круглосуточную работу. Погрузка и разгрузка самосвала также осуществляются автономно. Первые самосвалы были запущены в эксплуатацию в конце 2019 г.

Тестирование своих решений компания Inner Mongolia North Heavy Industries Group Co., Ltd. провела в Объединенных Арабских Эмиратах.

ПАО «БЕЛАЗ» (Белоруссия) совместно с компанией «ВИСТ Групп» (Россия) представили беспилотный самосвал БелАЗ-7513R, который самостоятельно спускается в карьер и поднимается оттуда с грузом (рис. 2). БелАЗ-7513R может работать в трех режимах: традиционном (оператор-водитель управляет машиной из кабины самосвала), дистанционном (оператор управляет машиной с удаленного рабочего места) и автономном (оператор удаленно только контролирует бортовую систему) [7, 8]. Два роботизированных самосвала БЕЛАЗ-7513R грузоподъемностью 136 т уже работают на разрезе Абаканский (горнопромышленный холдинг ОАО «СУЭК») в Хакасии.

В июле 2018 года на полигоне БелАЗа (Жодино – Белоруссия) успешно испытали автономный фронтальный погрузчик БелАЗ-78250, управление которого осуществлялось оператором, находящимся на удалении 2500 км (в Екатеринбурге).

Фирма Built Robotics (Калифорния) разработала мини-погрузчик Bobcat, который может двигаться по рабочей площадке, преодолевая или объезжая препятствия, а также разрабатывать котлован заданных геометрических размеров. При приближении людей к погрузчику машина временно останавливается.

В 2015 году компания Rio Tinto провела испытания роботов-бурильщиков, подготавливающих скважины для закладки взрывчатки. Это автоматизированные буровые станки SKF и SKSS с расширителями скважин и погружными пневмоударниками, оборудованные датчиками GPS-позиционирования и комплексом передачи телеметрии [1, 3]. После выбора площадки для проведения работ оператором и получения соответствующей команды робот загружает взрывчатку, собирает данные с участка и передает их в диспетчерский пункт. Ожидается, что в перспективе эти роботы смогут бурить вертикальные скважины с точностью до миллиметра [9].

Компании Sandvik (Амстердам), Flanders Electric (штат Индиана) и Нидерланды являются партнерами по автоматизации буровых установок для разработки скважин. Система Flanders Ardvarc (усовершенствованное автоматическое радиоуправление с векторным вращением сверла) точно позиционирует и выравнивает буровую установку, сверлит до желаемой глубины, вытягивает долото и сбрасывает домкраты при подготовке к следующему движению. Она также

¹ Rio Tinto opens automated Pilbara Operations Centre. <https://www.australianmining.com.au/news/rio-tinto-opens-automated-pilbara-operations-centre>

² <https://venturebeat.com/2018/11/20/volvos-first-commercial-self-driving-trucks-will-be-used-in-mining/>

³ <https://www.distrelec.de/current/en/robotics/how-robots-are-changing-the-mining-sector>

контролирует окружающую территорию на наличие препятствий с помощью системы 3D-визуализации для обеспечения безопасной работы машины.

Представители компании отмечают, что автоматизация повышает производительность на 30% за счет сокращения времени простоя оборудования, поскольку обычные буровые установки, управляемые человеком, должны отключаться во время проведения взрывных работ и смены оператора.

Компания Atlas Copco в 2017 г., после проведения двухлетних испытаний в Австралии, перевела 18 буровых установок Pit Viper 271 в беспилотный режим работы. Эти буровые установки, оснащенные системой автоматизированного

бурения Atlas (ADS), в состоянии пробурить скважину глубиной 14 м в поисках железной руды. Используя системы GPS и обнаружения препятствий, буровые установки могут проверять состояние грунта, обеспечивать обратную связь, передвигаться независимо друг от друга и бурить с высокой точностью под контролем удаленного оператора. При этом один оператор может одновременно управлять тремя установками. Автономные установки Pit Viper 271 могут работать 11,5 ч при 12-часовой смене по сравнению с 8,5 ч для людей [2, 3, 9, 10].

Французская фирма Montabert также разработала роботизированную бурильную установку «Robofore», которая проводит бурение шпуров по заданной программе.



a



б

Рис. 1. Роботизированные самосвалы: *a* – Komatsu и *б* – Volvo

Fig. 1. Robotic mining truck: *a* is Komatsu and *б* is Volvo



Рис. 2. Фронтальный погрузчик БелАЗ-78250 грузоподъемностью 22 т и карьерный самосвал БЕЛАЗ-7513Р

Fig. 2. 22 t front-end loader BelAZ-78250 and mining truck BelAZ-7513R



Рис. 3. Демонтажные серийные роботы

Fig.3. Disassembling commercial robots

Одна из крупнейших в мире горнодобывающих компаний BHP Billiton начала применять автономные самосвалы и буровые установки на своих железорудных шахтах (Австралия), а также на месторождениях нефтеносных песков в Альберте (Канада).

Компания KUKA Roboter (Германия) использует автоматизированный манипулятор для установки арочных крепей. Фирма NitroNobelMec (Швеция) разработала мобильные манипуляторы EG-33 и HF-51 с дистанционным управлением для закладки взрывчатых веществ в скважины. Компания BrokkAB (Швеция) и TopTec (Германия) выпустили роботов, способных работать в ограниченном пространстве. Но роботы фирмы BrokkAB могут производить оборку заколов, дробление негабарита и бурение скважин в шахтах. Эти роботы (рис. 3) оснащены маневренным манипулятором, имеющим диапазон оборота от 270 до 360°, что позволяет производить работы в различных пространственных положениях, например горизонтальное бурение [3].

Полуавтономная система Caterpillar MINEGEM разработана для подземных горных работ. Производительность самосвала с системой MINEGEM, работающей дистанционно, существенно выше, чем у систем прямой видимости или телеуправляемых систем, поскольку в этом случае оператору не нужно перемещаться с поверхности на машину. Если машина выходит за пределы рабочей зоны или другая машина (персонал) входит в эту зону, то система MINEGEM останавливает оборудование. Данная система позволяет оператору работать в удаленном, безопасном и эргономичном рабочем месте, как на поверхности, так и под землей.

Система AutoMine от Sandvik может быть объединена со SCADA и системами планирова-

ния производства для лучшей совместимости с процессами и системой управления операциями подземных горных работ. AutoMine обеспечивает постоянную работу в течение смены; уменьшение затрат на техническое обслуживание за счет снижения ущерба и отсутствия перерывов в работе оборудования; увеличение производительности за счет контроля производственных процессов и мониторинга в реальном времени; уменьшение эксплуатационных расходов за счет снижения численности рабочего персонала.

Компания Leica Geosystems Mining, (Брисбен, Австралия) и компания «Автономные решения» (Мендон, штат Юта) сотрудничают в нескольких независимых от производителей автономных системах управления горными машинами. Например, Leica J 3 dozor autorip – это полностью автономная система контроля гусеничных и колесных бульдозеров. Беспилотные бульдозеры могут очистить и подготовить заранее заданную область и автоматически остановиться, когда работа будет завершена.

Применение робототехники в горнодобывающей промышленности уже достаточно широко и включает роботизированное дозирование, выемку грунта и транспортировку, роботизированное картирование и геодезию, а также роботизированное бурение и обработку взрывчатых веществ. В настоящее время на рынке доступны следующие автоматизированные технические средства для горной промышленности:

- самосвалы;
- погрузочно-разгрузочная техника;
- буровые установки.

Преимущества автономии

Роботизированные системы предлагают горнодобывающим компаниям ряд явных преимуществ

ществ. Первым является повышение безопасности при добыче полезных ископаемых за счет вывода человека из зоны ведения горных работ, т. е. из потенциально опасной зоны.

Горное дело весьма травмоопасно. Даже посадка и выход из кабины карьерного самосвала означает подъем (спуск) по 6-метровой лестнице, часто покрытой льдом или грязью. Вследствие однообразной работы водители утомляются или засыпают, что может привести к столкновению или съезду с дороги. Роботизация устраняет эти факторы, позволяя самосвалам точно ориентироваться на дороге, отслеживать другие транспортные средства и следовать за ними на безопасном расстоянии, обнаруживая препятствия. Движение каждого автономного карьерного самосвала к месту погрузки или разгрузки обеспечивается системой спутниковой навигации GPS. Использование лидаров, радаров, ультразвуковых датчиков и оптико-электронной системы обеспечивает точность позиционирования самосвала до 1 см. Система управления технологическим транспортом исключает возможность столкновения с обычными транспортными средствами, управляемыми водителями, в той же рабочей зоне. Если человек или другое транспортное средство окажутся вблизи от беспилотного самосвала при его движении, то датчик препятствий активируется, и самосвал останавливается в аварийном режиме. Для повышения безопасности используется ряд систем [1–3, 8, 10–12].

CDS – (система обнаружения столкновений): формирует «защитную оболочку», окружающую автомобиль. Когда границы цифровых пузырьков пересекаются – CDS подает предупреждение.

ODS – (система обнаружения препятствий): при обнаружении препятствий система останавливает самосвал с AHS.

ESB – (кнопка аварийного останова): эта система останавливает все беспилотные машины, находящиеся в эксплуатации и управляемые системой Front Runner. Центральный контроль, все автономные и пилотируемые транспортные средства в системе Front Runner оснащены системой ESB.

Вся информация поступает в центральный компьютер диспетчерского пункта. Компьютер направляет самосвал к определенному экскаватору. После того как самосвал загружен, он движется к заданной точке разгрузки. Компьютер считывает навигационную систему самосвала и выбирает лучший маршрут от А до Б, заменяя работу водителя. Каждое место разгрузки записывается, чтобы две разгрузки не сбрасывались в одну кучу.

Если нет возможности выполнить проверку состояния канала связи и передачи данных, машина также сразу останавливается. Эти системы и устройства обеспечивают безопасность движения автономных транспортных средств в любое время суток и в различных погодных-климатических условиях.

Можно отметить, что современная горнодобывающая промышленность по информационному обеспечению мало уступает космическим программам. Например, первый космический челнок имел меньшую вычислительную мощность, чем карьерный самосвал Caterpillar 797.

Второе преимущество – повышение производительности. Автономные самосвалы исключают непроизводительные простои, например, при замене экипажей обычных машин или перерыве на обед. Устранение перерывов, времени на проветривание карьеров после проведения взрывных работ и загазованности рабочей атмосферы на глубоких горизонтах позволяет автономным карьерным самосвалам работать дополнительно еще два-четыре часа в день. Робот не болеет, не устает, не раздражается, у него не бывает плохого настроения, его внимание нельзя отвлекать. Роботизированные самосвалы могут повторять маршрут движения с точностью до нескольких сантиметров все время рабочего цикла. Это позволяет уменьшить ширину технологических дорог или даже перейти к однополосной схеме движения при условии создания требуемого числа «карманов» по маршруту движения для разъездов автономных самосвалов [13].

Роботизированные самосвалы могут останавливаться в нескольких сантиметрах от заданного места, например, прямо под ковшом экскаватора, раз за разом, что сокращает время погрузки. Точный контроль скорости и маршрута самосвала обеспечивает работу машины в соответствии с заводскими спецификациями, экономии топлива, повышает срок службы шин и деталей, межремонтный период и время эксплуатации.

Кроме того, использование беспилотных машин позволяет устранить многие психологические факторы, связанные с управлением карьерными самосвалами, например при движении на крутых подъемах и спусках (уклонах) технологических дорог. Тогда единственным ограничением на величину углов уклонов дорог остается усилие сцепления колес (гусениц) внедорожной техники с покрытием дороги. Интеллектуальные системы способны заменить водителя в трудных ситуациях: на серпантинах горных разработок, особенно после дождя и снега [10, 11].

Все это обеспечивает увеличение добычи на предприятии или уменьшение автопарка.

Третье преимущество – уменьшение затрат. При разработке месторождений в отдаленных регионах возникает проблема привлечения квалифицированных кадров. Водители должны выдерживать условия скуки и изоляции, изнурительных условий (большие глубины или высоты, арктический холод или зной пустыни). Использование автоматизированных самосвалов в рамках единой оперативно-диспетчерской системы позволяет частично решить эту проблему за счет сокращения штата водителей и расходов на инфраструктуру для персонала.

Применение автономного автотранспорта обеспечивает сокращение расхода топлива на 10 до 15%; износа шин на 5–15% и расходов на техническое обслуживание на 8%. В то же время повышается производительность на 15–20% и коэффициент использования самосвала на 10–12% [1–3, 8, 10–12].

Применение автономной техники также может помочь привлечь квалифицированных специалистов, которые ранее даже бы не задумывались о работе в горной промышленности. Для разработки, запуска и обслуживания роботизированной техники необходимо новое поколение специалистов, которые выросли на видеоиграх, компьютерах и Интернете.

Возможно, что самое большое преимущество автоматизации заключается в том, что с автономным оборудованием производительность контролируется и стабильна.

Сопоставление затрат

По сравнению с традиционным горнотранспортным оборудованием затраты на автономную технику безусловно выше. Однако достаточное количество требуемой инфраструктуры (например, GPS и сети связи) уже имеется практически на любом крупном горнодобывающем предприятии.

При сравнении затрат следует учитывать, что обслуживание обычных карьерных самосвалов, стоимость которых составляет до 6 млн долларов США, является весьма дорогостоящим. В отчете, опубликованном деловым изданием «The Australian», отмечается, что расходы на содержание обычного карьерного самосвала на удаленных объектах составляют один или более миллиона долларов в год. Сюда входит зарплата водителя, составляющая до 120 000 долларов в год. А чтобы каждый самосвал работал круглосуточно, необходимо четыре водителя. К этому

следует добавить затраты на питание, жилье, обучение, медицинское обслуживание и вахтовую доставку сменного персонала в труднодоступные районы. И тогда затраты легко превысят отметку в миллион долларов.

С другой стороны, сокращение объемов технического обслуживания автономной техники, только за счет увеличения срока службы шин на 5–15%, уже обеспечивает существенную экономию. Шины карьерного самосвала могут стоить до 40 000 долларов за штуку. При крупном автопарке обеспечивается заметная экономия [3, 10, 11].

Если учитывать повышение производительности наряду со снижением трудовых и эксплуатационных затрат, то роботизация может добавить не один миллион к итоговой прибыли. Кроме того, роботизация обеспечивает значительное повышение безопасности людей при таких работах, как закладка взрывчатых веществ, перемещение под землей после добычи или разработку месторождений в местах, где люди не могут работать.

Минусы и проблемы

Анализ существующих систем автоматизации горных работ и тенденций развития технологий управления показывает, что автономные транспортные средства будут применяться все в более широких масштабах, а это может в корне изменить наше представление о добыче и транспортировке горной массы. Применение робототехники в горнодобывающей промышленности предъявляет особые требования к их надежности и качеству, порождает многочисленные проблемы и нерешенные вопросы, которые должны быть совместно определены и решены как научными кругами, так и промышленностью.

Минусы автоматизации во всех отраслях практически одинаковы.

1. Обучение персонала. Хотя автономные технологии развиваются, управляемые человеком машины будут продолжать работать наряду с роботизированными транспортными средствами. Беспилотные автотранспортные средства работают по четким логическим правилам, которые для людей могут быть неочевидны. Автономные перевозки требуют новых навыков работы по сравнению с пилотируемыми операциями.

2. Довольно распространено заблуждение в том, что человека можно просто заменить машиной. Технически это намного более сложная задача. Сразу возникает много вопросов: например, изменятся ли требования к качеству и содержанию дорог; нужно ли перепроектировать

перекрестки; нужно ли иметь одинаковое количество топливных дней и т. д.

3. Вопросы права. Технология ведения горных работ подчиняется четким нормативам, которые определяют специфику перевозки горной массы самосвалами под управлением водителей. Пока не ясно, каковы должны быть юридические требования и нормы для эксплуатации новой техники. На данный момент пробелы в законодательстве не позволяют эксплуатировать беспилотную технику в определенных условиях, например, при пересечении технологических трасс с дорогами общего пользования, и тогда управление над роботом-самосвалом берёт на себя оператор.

4. Крупные горнодобывающие корпорации все активнее внедряют автономные самосвалы, что уменьшает эксплуатационные расходы, повышает эффективность и безопасность транспортирования больших объемов горной массы и конкурентоспособность на рынке. Но любая компьютеризация привносит программную уязвимость и угрозу взлома системы.

5. Разработчики автономных систем предлагают различные системы мониторинга для отслеживания состояния основных подсистем и предупреждения о необходимости проведения технического обслуживания. Однако без человека-водителя некоторые образующиеся неисправности могут остаться просто незамеченными. Люди интуитивно ощущают окружение так, как пока еще не может современная робототехника, поскольку невозможно все предусмотреть алгоритмом. Например, необходима визуальная проверка безопасности таких операций, как заправка.

6. В случае массового внедрения автономных систем получим увеличение технической безработицы.

И тогда возникает вопрос: действительно ли внедрение автономной технологии того стоит?

Будущие разработки роботизированного оборудования

Роботизацию добычи начали рассматривать еще в 70-х годах прошлого века. Но потребовались различные технологические разработки и технические достижения, позволившие уменьшить стоимость необходимого оборудования. Это, например, высокоскоростные сети беспроводной связи, GPS-навигация, ультразвуковые, радиолокационные, лазерные и другие датчики, позволяющие обнаруживать близлежащие движущиеся и неподвижные объекты. За прошедший период были также достигнуты значительные успехи в алгоритмах управления, скоростях

обработки информации и электронике. Задача сегодняшнего дня заключается в том, чтобы поднять автоматизированное управление на уровень, соответствующий 70 % уровня квалифицированного оператора. Существующее программное обеспечение пока еще не справляется с динамически изменяющимися условиями, поэтому разрабатывается улучшение сети управления на основе решения сложных задач поведения в постоянно меняющейся среде.

Обычно выделяют четыре уровня развития данного направления.

Первый уровень – машина находится в прямой видимости, но влиять на траекторию её движения можно только с помощью пульта.

Второй уровень основан на системе управления по телеметрическим данным. Машина движется по выработке – карьеру, руднику или шахте вне пределов прямой видимости и выполняет заданную работу по радиокомандам оператора, который получает необходимую информацию от датчиков и камер.

Третий уровень – один оператор контролирует деятельность нескольких единиц техники, которые работают согласно заданной программе и, если необходимо, вносит соответствующие корректировки.

Четвёртый уровень – полная автоматизация, то есть техника работает совершенно самостоятельно. При этом все данные передаются в пункт управления, а оператор только контролирует автономные машины и, без необходимости, не вмешивается в их работу.

Примером автоматизации второго уровня может быть рудник «Удачный» (АЛРОСА). На выработке работает ПДМ, а оператор управляет ею на специальной площадке. Наиболее продвинутым в области автоматизации горного предприятия в мировом масштабе считается австралийско-британский концерн Rio Tinto, представляющий третий уровень автоматизации. Оборудование снабжено датчиками, работает в соответствии с алгоритмом и программами, а операторы контролируют его работу, находясь на расстоянии нескольких километров. Автономные самосвалы самостоятельно загружаются, транспортируют горную массу в нужное место и также самостоятельно разгружаются [14].

Дальнейшее развитие автоматизации производства в проекте Rio Tinto «Рудник будущего» направлено на то, чтобы роботы самостоятельно вели взрывные работы, бурили шахты, добывали и сортировали руду, отделяя отходы. Затем автоматические поезда и самосвалы будут самостоятельно транспортировать сырьё на обогати-

тельные и перерабатывающие предприятия. При этом вся техника, используемая в производстве, будет дистанционно управляться из Перта.

В настоящее время, в основном, проводится модернизация выпускаемых моделей, но в ближайшем будущем будут производиться самосвалы, изначально спроектированные как беспилотные. Например, все новые модели самосвалов Komatsu грузоподъемностью 300 т и более разрабатываются с учётом возможности переоборудования в автономный вариант. Легче автоматизировать электрифицированное оборудование, в том числе и транспортные средства [15].

Значительные результаты и достижения, в основном, отмечаются в зарубежных добывающих компаниях. Россия, можно сказать, пока еще находится в начале пути роботизации, когда наиболее значимые решения еще соответствуют первому уровню, но уже есть прецеденты и более существенных достижений. Российские промышленники все еще воспринимают беспилотную технику как новинку. Эта технология пока не получила распространения в России вследствие ряда причин технического и экономического характера, а также особенностей государственного регулирования. Поэтому общее число мощной внедорожной автономной техники в России пока небольшое. Кроме того, существует ещё одна значительная проблема: в России не выпускается соответствующее оборудование, поэтому требуемые компоненты приходится закупать за рубежом.

В то же время правительством РФ разработана многолетняя комплексная программа – «Национальная технологическая инициатива». На горных предприятиях России и стран СНГ с 1999 г. внедряется система оперативно-диспетчерского управления горнотранспортного комплекса «Карьер», которая разработана совместно ПАО «БелАЗ» и компанией «Вист Групп». На основе данной системы разрабатывается более современная автоматизированная (в перспективе роботизированная) система управления «Интеллектуальный карьер», которая должна существенно повысить уровень безопасности и производительности горных работ [13, 16].

Внедрение современных АСУ горнотранспортным комплексом предприятия, таких как, например, система «Иртыш», позволяет обеспечить надежное и четкое управление технологическим процессом добычи и транспортировки горной массы. Это проявляется в повышении безопасности проводимых работ, а также эффективности производства за счет снижения себестоимости продукции [17].

Однако в настоящее время ситуация в российской горной промышленности такова, что минусы преобладают над плюсами. Основными из них являются значительные финансовые вложения, не гарантирующие мгновенных дивидендов.

Заключение

Основная причина востребованности автономной техники – увеличение доли месторождений, находящихся в сложных горно-технологических условиях, длительный срок подготовки специалистов, значительная нехватка квалифицированных водителей карьерных самосвалов по всему миру и быстрая выработка человеческого ресурса на такой тяжелой работе.

То, что началось как отдаленное видение всего несколько десятилетий назад, быстро становится реальностью. Роботы становятся дешевле, гибче и автономнее, в том числе благодаря искусственному интеллекту. Некоторые роботы заменяют людей-работников; другие – работают вместе с рабочими, дополняя их. Экономическая выгода от применения роботизированной техники при разработке месторождений достаточно наглядна, а ее использование в карьерах и шахтах уже является обычным делом. Значительная эффективность этих решений подтверждается мировым опытом эксплуатации автономного оборудования.

Горнодобывающая промышленность имеет большой потенциал для автоматизации, с применением которой появляется возможность для оптимизации, поскольку становится доступно больше информации, а действия могут многократно повторяться с высокой точностью. Оптимизация технологического процесса разработки месторождений при переходе от механизации к автоматизации и роботизации создает новые возможности повышения эффективности производства и снижения затрат. Это задача значительно более высокого уровня сложности по сравнению с отдельной задачей автоматизации горных машин и оборудования.

С развитием технологий горные роботы смогут также разрабатывать месторождения в глубинах мирового океана, где низкая видимость и высокое давление делают работу для человека опасной или невозможной. Также роботы смогут вести добычу минералов на астероидах.

Поэтому для успешной и эффективной работы горнодобывающих компаний весьма важно учитывать роль роботов в технологии сегодняшнего дня и роль, которую они будут играть завтра. Внедрение такого оборудования может быть рекомендовано в качестве одного из ключевых

направлений технического перевооружения горнодобывающих предприятий. Широкое применение роботизированной техники на открытых и подземных горных работах может привести к существенным изменениям при проектировании

карьеров, шахт и правил безопасности, а также способствовать разработке новых видов горных машин и оборудования, что обеспечит значительное повышение эффективности добычи полезных ископаемых.

Список литературы

1. Atkinson R. D., 2019, Robotics and the Future of Production and Work. – Information Technology and Innovation Foundation.
2. Dadhich S., Bodin U., Andersson U., 2016, Key challenges in automation of earth-moving machines, Automation in Construction. 68, 212–222. doi.org/10.1016/j.autcon.2016.05.009
3. Marshall J. A., Bonchis A., Nebot E., Scheduling S. Robotics in mining //Springer handbook of robotics. Springer, Cham, 2016; 1549–1576. doi.org/10.1007/978-3-319-32552-1_59
4. Kachuri L., Villeneuve P. J., Parent M.-E., Johnson K. C., 2016. Workplace exposure to diesel and gaso-line engine exhausts and the risk of colorectal cancer in Canadian men. Environmental Health, 15, 1, 4–16. doi.org/10.1186/s12940-016-0088-1
5. Taxell P., Santonen T., 2017. Diesel engine exhaust: basis for occupational exposure limit value. Toxi-cological Sciences, 158, 2, 243–251. doi.org/10.1093/toxsci/kfx110
6. Трубецкой К. Н., Рыльникова М. В., Владимиров Д. Я. От системы «карьер» к новому интеллектуальному укладу открытых горных работ// Проблемы недропользования. 2019. № 3(22). С. 39–48. DOI: 10.25635/2313-1586.2019.03.039
7. Гучек Е. М., Клебанов Д. А. График 24/7 и без нервов // Уголь Кузбасса. 2018. № 1. С. 20–23.
8. Бигель Н. В. Преимущества и возможности роботизированного карьерного самосвала грузоподъемностью 130 тонн // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017. № S38. С. 53–57. doi: 10.25018/0236-1493-2017-12-38-53-57
9. Хакулов В. А., Хакулов В. В. Экскаваторы роботизированных открытых разработок будущего // Горное дело. 2016. №3(9). С. 35–42.
10. Burgard W., Franke U., Enzweiler M., Trivedi M. The mobile revo-lution-machine intelligence for autonomous vehicles (Dagstuhl Seminar 15462) // Dagstuhl Reports. – Schloss Dagstuhl-Leibniz-Zentrum fuer Informatik, 2016. Vol. 5. No. 11. doi: 10.4230/DagRep.5.11.62
11. Gölbaşı O., Dagdelen K. Equipment Replacement Analysis of Manual Trucks with Autonomous Truck Technology in Open Pit Mines, Conference Paper (PDF Available), August 2017.
12. Schoettle B., Sivak M. Potential Improvements in Safety and Efficiency with Autonomous Trucking. 2017, no. SWT-2017-19.
13. Владимиров Д. Я. Интеллектуальный карьер: Эволюция или революция? //Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. №. S1-1. С.77–82.
14. Кучумова А. Без человека в кабине // Добывающая промышленность. 2019. №2 (14). С. 92–96.
15. Хазин М. Л., Штыков С. О. Карьерный электрифицированный транспорт // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №1. С. 11–18. https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-1-11-18
16. Шевкун Е. Б., Казаков Е. А. Роботизированные системы автомобильного транспорта на открытых горных работах // Ученые заметки ТОГУ. Электронное научное издание. 2017. Т. 8. № 4. С. 460–472.
17. Маргарян С.А. Автоматизированная система оперативно-диспетчерского управления горнотранспортным комплексом «Иртыш» // Горная промышленность. 2017. №4 (134). С. 72–74.

Поступила 10.02.2020; принята к публикации 02.03.2020; опубликована 25.03.2020

Хазин Марк Леонтьевич – д-р техн. наук, профессор, Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия. E-mail: Khasin@ursmu.ru

References

1. Atkinson R.D. Robotics and the future of production and work. Information Technology and Innovation Foundation (2019).
2. Dadhich S., Bodin U., Andersson U. Key challenges in automation of earth-moving machines. Automation in Construction. 2016, 68, 212–222. doi.org/10.1016/j.autcon.2016.05.009
3. Marshall J.A., Bonchis A., Nebot E., Scheduling S. Robotics in mining. Springer handbook of robotics. Springer, Cham, 2016; 1549–1576. doi.org/10.1007/978-3-319-32552-1_59
4. Kachuri L., Villeneuve P.J., Parent M.-E., Johnson K.C. Workplace exposure to diesel and gasoline engine exhausts and the risk of colorectal cancer in Canadian men. Environmental Health. 2016, 15, 1, 4–16. doi.org/10.1186/s12940-016-0088-1

5. Taxell P., Santonen T. Diesel engine exhaust: basis for occupational exposure limit value. *Toxicological Sciences*. 2017, 158, 2, 243–251. doi.org/10.1093/toxsci/kfx110
6. Trubetskoy K.N., Rynnikova M.V., Vladimirov D.Ya. From the system “pit” to the new intellectual structure of open cast mining. *Problemy nedropolzovaniya* [Subsoil Use Issues]. 2019, no. 3(22), pp. 39–48. doi: 10.25635/2313-1586.2019.03.039
7. Guchek E.M., Klebanov D.A. 24/7 and no stress. *Ugol Kuzbassa* [Kuzbass Coal], 2018, no. 1, pp. 20–23. (In Russ.)
8. Bigel N.V. Advantages and capabilities of a robotic mining truck with a carrying capacity of 130 tons. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)* [Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)]. 2017, no. S38, pp. 53–57. doi: 10.25018/0236-1493-2017-12-38-53-57
9. Khakulov V.A., Khakulov V.V. Excavators of robotic open-cast mining of the future. *Gornoe delo* [Mining engineering], 2016, no. 3(9), pp. 35–42. (In Russ.)
10. Burgard W., Franke U., Enzweiler M., Trivedi M. The mobile revolution-machine intelligence for autonomous vehicles (Dagstuhl Seminar 15462). Dagstuhl Reports. Schloss Dagstuhl - Leibniz-Zentrum fuer Informatik. 2016, vol. 5, no. 11. doi: 10.4230/DagRep.5.11.62
11. Gölbaşı O., Dagdelen K. Equipment replacement analysis of manual trucks with autonomous truck technology in open pit mines. Conference Paper (PDF Available), August 2017.
12. Schoettle B., Sivak M. Potential improvements in safety and efficiency with autonomous trucking. 2017, no. SWT-2017-19.
13. Vladimirov D.Ya. Intelligent open pit mine: evolution or revolution? *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)* [Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)], 2015, no. S1-1, pp. 77–82. (In Russ.)
14. Kuchumova A. Without a man in the cabin. *Dobryvayushchaya promyshlennost* [Mining industry], 2019, no. 2 (14), pp. 92–96. (In Russ.)
15. Khazin M.L., Shtykov S.O. Electric mining trucks. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018, vol.16, no.1, pp. 11–18. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-1-11-18>
16. Shevkun E.B., Kazakov E.A. Robotic systems road transport in open-pit mining. *Uchenye zametki TOGU. Elektronnoe nauchnoe izdanie* [Scientific notes of PNU. Electronic scientific journal], 2017, vol. 8, no. 4, pp. 460–472. (In Russ.)
17. Margaryan S.A. An automated dispatch control system of the Irtys mining transport complex. *Gornaya promyshlennost* [Mining industry], 2017, no.4 (134), pp. 72–74. (In Russ.)

Submitted 10/02/2020; revised 02/03/2020; published 25/03/2020

Mark L. Khazin – DrSc (Eng.), Professor

Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia. E-mail: Khasin@ursmu.ru



КАРЬЕРНЫЙ ЭКСКАВАТОР С РАБОЧИМ ОБОРУДОВАНИЕМ ДЛЯ ОТДЕЛЕНИЯ ОБОГАЩЕННОЙ РУДНОЙ МЕЛОЧИ

Чебан А.Ю., Секисов А.Г.

Институт горного дела Хабаровского Федерального исследовательского центра ДВО РАН, Хабаровск, Россия

Аннотация. Актуальность и цель исследования. Усложняющиеся условия разработки месторождений твердых полезных ископаемых предопределяют необходимость совершенствования горного оборудования и технологических схем его применения. При разработке сложноструктурных месторождений в некоторых случаях вместе с некондиционными рудами в отвал отправляется значительное количество минерального сырья, содержащегося в обрабатываемом блоке. Во многих рудах в процессе взрывного или механического рыхления происходит концентрация полезных компонентов в рудной мелочи, особенно это характерно для руд с вкрапленной сульфидной минерализацией, ассоциирующей с кварцем. Выделение из некондиционных руд мелкой фракции на грохоте, а также дополнительные транспортно-перегрузочные операции требуют значительных затрат.

Цель работы. Создание карьерного экскаватора с рабочим оборудованием для отделения обогащенной рудной мелочи из некондиционной руды непосредственно в процессе выемки, при этом процесс разгрузки из ковша обогащенной рудной мелочи и оставшейся некондиционной руды для увеличения производительности оборудования должен производиться одновременно. **Результаты.** В статье предлагается конструкция усовершенствованного карьерного экскаватора и технологическая схема его применения при разработке сложноструктурного месторождения. Гидравлический карьерный экскаватор оснащен ковшом с просеивающими поверхностями, которые расположены внутри ковша на его передней стенке и открывающемся днище. Между ребрами жесткости просеивающих поверхностей находятся полости, которые соединяются со сборными коллекторами. Рудная мелочь через щели просеивающих поверхностей ссыпается в полости, а затем в коллекторы, откуда потоком воздуха транспортируется по трубопроводам к предварительному сепаратору вакуумной установки, где происходит ее накопление с периодической разгрузкой в специальное транспортное средство. Разгрузка некондиционной руды, оставшейся в ковше, производится в автосамосвалы. **Выводы.** Применение ковша предлагаемой конструкции с неподвижными просеивающими поверхностями позволит сократить время цикла экскаватора за счет совмещения процессов разгрузки рудной мелочи и крупной фракции, данный ковш может быть установлен на большинстве карьерных гидравлических экскаваторов после их минимальной модернизации. Выделение обогащенной рудной мелочи зоны некондиционных руд взорванного блока позволит увеличить коэффициент извлечения полезного ископаемого из недр и повысит производительность карьера по добыче руды, что снизит удельные расходы на добычу минерального сырья и увеличит рентабельность горного производства.

Ключевые слова: сложноструктурные месторождения, некондиционная руда, карьерный экскаватор, ковш, просеивающие поверхности, вакуумная установка, автосамосвал.

© Чебан А.Ю., Секисов А.Г., 2020

Для цитирования

Чебан А.Ю., Секисов А.Г. Карьерный экскаватор с рабочим оборудованием для отделения обогащенной рудной мелочи // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т.18. №1. С. 16–22. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-1-16-22>



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

MINING EXCAVATOR WITH THE CAPABILITY TO SEPARATE CONCENTRATED ORE FINES

Anton Yu. Cheban, Artur G. Sekisov

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

Abstract. Relevance and purpose of the study. The increasingly complicated conditions in which solid mineral deposits are developed define the need to optimize mining equipment and the ways in which it is exploited. When developing complex structure deposits, it sometimes happens that a significant amount of mineral raw materials is dumped together with substandard ores. In the case of many ores, the process of explosive or mechanical loosening results in the concentration of valuable components in ore fines. This is especially typical of ores with sulphide impregnation associated with quartz. Screening substandard ores to separate fines, as well as additional transportation and transfer operations require significant costs. **Objectives.** The objective is to design a mining excavator that would have the capability to separate concentrated ore fines from substandard ore directly during excavation. At the same time, unloading of concentrated ore fines and the remaining substandard ore should take place simultaneously for better performance. **Findings.** This paper describes an optimised excavator design, as well as application guidelines for the development of complex structure deposits. The hydraulic mining excavator is equipped with a bucket with screening surfaces located inside the bucket on its front wall and on the drop bottom. There are cavities between the screen stiffeners that are connected to collectors. The fine material goes through the openings in the screening surfaces into the cavities and then into the collectors. From the collectors it is transported with air flow through pipelines to the preliminary separator of the vacuum unit, where it accumulates and is regularly discharged into a special vehicle. The substandard ore remaining in the bucket is dumped into dump trucks. **Conclusions.** The use of the bucket of the proposed design with fixed screening surfaces will reduce the excavator cycle time due to combined unloading of ore fines and coarser material. Such bucket can be installed on most hydraulic excavators following minimum retrofitting. Separation of concentrated ore fines from the substandard ore zone of the blasted block will increase the recovery factor and the throughput, which will reduce the mining costs and make the operations more cost-effective.

Keywords: complex structure deposits, substandard ore, mining excavator, bucket, screening surfaces, vacuum unit, dump truck.

For citation

Cheban A.Yu., Sekisov A.G. Mining Excavator with the Capability to Separate Concentrated Ore Fines. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2020, vol. 18, no. 1, pp. 16–22. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-1-16-22>

Введение

В отечественной и мировой практике разработки твердых полезных ископаемых прослеживаются тенденции усложнения условий добычи, ухудшения качества минерального сырья, истощения крупных по запасам месторождений, постепенного смещения горного производства в удаленные районы с суровыми природно-климатическими условиями [1–3]. Значительно изменившиеся условия разработки месторождений твердых полезных ископаемых при возрастающих требованиях по экологической и промышленной безопасности работ определяют необходимость совершенствования как горного оборудования, так и технологических схем его применения для сохранения приемлемого уровня рентабельности горного производства [4–9]. Развитие горных технологий и технических средств позволяет осуществлять добычу полезных ископаемых как открытым, так и подземным спосо-

бом на все больших глубинах [10–14], при этом доля открытого способа в общем объеме добычи постепенно возрастает. В настоящее время в основе ряда научных исследований закладываются принципы малоотходности и ресурсосбережения, для чего целенаправленно предлагаются новые технологические схемы ведения горных работ. При этом основное внимание должно быть обращено на возможности уменьшения объемов или энергоемкости горных работ, обеспечение экономии природных ресурсов и сокращение количества получаемых отходов [15–16].

Постановка проблемы

На сложноструктурных месторождениях во многих случаях происходит не только чередование руды и пустых пород, но также изменение качественных характеристик самой руды в массиве. При этом содержание полезных компонентов от зон с максимальными значениями к неминерализованным породам понижается в основ-

ном постепенно, без какой-либо закономерности с отсутствием четких визуально наблюдаемых границ между рудами различных типов и сортов, а также пустыми породами. В зависимости от содержания полезного компонента руды могут быть кондиционными и некондиционными. При разработке сложноструктурных месторождений ведется селективная выемка горной массы, при этом пустые породы транспортируются в отвал, кондиционная руда отправляется на первичную переработку и последующее обогащение, а некондиционная руда – на склад временно некондиционных руд, а по существу в отвал. При этом во многих случаях вместе с некондиционными рудами в отвал отправляется значительное количество минерального сырья, содержащегося в отрабатываемом блоке.

Необходимо отметить, что у многих руд в процессе взрывного или механического рыхления происходит концентрация полезных компонентов в рудной мелочи [2, 17], особенно это характерно для руд с вкрапленной сульфидной минерализацией, ассоциирующей с кварцем. Таким образом, в мелких и тонких фракциях некондиционных руд содержание полезного компонента значительно превосходит среднее содержание полезного компонента, что дает возможность рентабельно перерабатывать данное минеральное сырье наряду с кондиционными рудами. При этом выделенную при выемке или грохочении мелкую продуктивную фракцию наиболее целесообразно перерабатывать отдельно от кондиционной руды кучным или кюветным выщелачиванием [18]. Однако специальное выделение рудной мелочи из некондиционных руд на грохоте, а также дополнительные транспортно-перегрузочные операции требуют значительных затрат.

Возможным решением проблемы представляется выделение обогащенной рудной мелочи непосредственно в процессе выемки некондиционной руды для исключения ее последующей сортировки и перевалок. В горном деле при массовом рыхлении массивов прочных горных пород применяется взрыв с последующей выемкой горной массы различного качества одноковшовыми экскаваторами. При разработке сложноструктурных месторождений в выемочном блоке выявляются участки пустых пород, а также кондиционных и некондиционных руд. В настоящее время разработаны автоматизированные системы управления процессом селективной выемки руды, обеспечивающие высокоточное позиционирование экскаватора в забое, необходимую траекторию движения ковша относительно зон

локализации различных типов горной массы, а также возможность идентификации качества горной массы в ковше [19]. Очевидно, что отделение рудной мелочи целесообразно вести во время перемещения горной массы в ковше от забоя к кузову транспортного средства.

Известна конструкция ковша с просеивающим приспособлением, предназначенного для фракционного разделения экскавируемого материала [20]. Ковш включает две боковые стенки, криволинейную стенку с режущей кромкой, просеивающее приспособление в виде решетчатой конструкции, шарнирно соединенное с верхней частью ковша, и пару гидроцилиндров для поворота просеивающего приспособления. При черпании материала просеивающее приспособление находится внутри ковша и прижимается к нему. После заполнения ковш перемещается к месту разгрузки, гидроцилиндры поворачивают просеивающее приспособление, в результате чего оно выдвигается наружу от ковша, чтобы обеспечить свободное прохождение мелкой фракции материала через отверстия просеивающего приспособления. После завершения просеивания оставшаяся в ковше крупная фракция выгружается в другое место разгрузки, таким образом, ковш обеспечивает немедленную сортировку набранного материала. Недостатками данной конструкции являются: раздельная разгрузка мелкой и крупной фракций из ковша, что увеличивает время цикла экскаватора; необходимость наличия в забое двух транспортных средств; потери обогащенной мелкой фракции от выдувания при погрузке и транспортировке; пыление в зоне ведения погрузочных работ.

Для выделения мелких фракций горной массы и уменьшения пыления при выемке и погрузке горной массы разработана конструкция выемочно-сортировочного комплекса, оборудованного транспортно-сортировочным агрегатом [21]. Выемочно-сортировочный комплекс осуществляет послойную отработку массива фрезерным рабочим органом. Транспортно-сортировочный агрегат состоит из скребкового конвейера и сортировочной решетки, сквозь которую просеивается мелкая фракция угля, направляемая системой пневмотранспортирования из накопителя в бункер специального транспортного средства. Крупная фракция разгрузочным конвейером комплекса направляется в автосамосвал. Недостатками выемочно-сортировочного комплекса данной конструкции являются: низкая эффективность или невозможность разработки массивов, сложенных прочными породами; трудность высокоселективной выемки

рудных тел сложной конфигурации.

Для зачистки рудной мелочи из трещин и нервностей поверхностей горных выработок после проведения взрывных и выемочных работ на рудниках России и за рубежом применяют вакуумную технологию. Так, на руднике Ирокинда ведется разработка гидротермальных убого-сульфидных золотосодержащих наклонных мало-мощных кварцевых жил, при этом зачистка рудной мелочи осуществляется вакуумными установками производства ЮАР Trans Vac SA55 E54 и Mega Vac SA55E54 [22]. Данные установки позволяют засасывать и транспортировать куски руды размером до 50 мм. Рудная мелочь всасывается через форсунку и транспортируется по гибкому трубопроводу (на расстояние до 200–300 м по горизонтали и 50–100 м по вертикали) к предварительному сепаратору, где происходит отделение рудной мелочи от транспортирующего ее воздуха. По мере заполнения бункера предварительного сепаратора происходит его автоматическая разгрузка в вагон. Оставшаяся неотделенной в предварительном сепараторе рудная пыль отделяется в коллекторе тонкой очистки. Применение вакуумной установки на руднике Ирокинда позволило на 4% повысить коэффициент извлечения полезных ископаемых из недр, срок окупаемости установок составил 4 месяца.

Целью работы является создание карьерного экскаватора с рабочим оборудованием для отделения обогащенной рудной мелочи из некондиционной руды непосредственно в процессе выемки. При этом процесс разгрузки из ковша обогащенной рудной мелочи и оставшейся некондиционной руды для увеличения производительности оборудования должен производиться одновременно.

Результаты исследований и их обсуждение

Авторами предлагается конструкция карьерного экскаватора с рабочим оборудованием для отделения во время выемочно-погрузочного процесса обогащенной полезным компонентом рудной мелочи и технологическая схема его применения. В качестве базовой машины целесообразно использование гидравлического экскаватора, так как рабочее оборудование данной машины обладает более широкими возможностями для селективной выемки пород взрывного сложноструктурного массива, в сравнении с канатными экскаваторами, за счет обеспечения необходимой траектории движения ковша. Гид-

равлический карьерный экскаватор 1 с оборудованием «прямая лопата» оснащен ковшом 2 с просеивающими поверхностями 3, 4 со щелями 5, которые расположены внутри ковша 2 на его передней стенке 6 и открывающемся днище 7 (см. рисунок).

Просеивающие поверхности 3, 4 на тыльной стороне оборудованы ребрами жесткости 8 и неподвижно присоединены к элементам ковша 2. Между ребрами жесткости 8 просеивающих поверхностей 3, 4 находятся полости 9, которые соединяются с соответствующими коллекторами 10, 11 передней стенки 6 и открывающегося днища 7 ковша 2. Коллекторы 10, 11 через трубопроводы 12, 13, установленные соответственно в боковой стенке 6 и днище 7 ковша 2, соединены с гибким трубопроводом 14 вакуумной установки 15, протянутым через рукоять 16, стрелу 17 и опорно-поворотное устройство 18. Также ковш 2 оборудован вибратором 19 для активизации процесса выделения рудной мелочи из горной массы.

В процессе выемки горной массы из взорванного блока карьерным экскаватором 1 рудная мелочь, попавшая в ковш 2, посредством силы тяжести и дополнительного вибрационного воздействия через щели 5 просеивающих поверхностей 3, 4 передней стенки 6 и поворотного днища 7 ковша 2 ссыпается в полости 9. Заполненный горной массой ковш 2 поворачивается к автосамосвалу, днище 7 открывается и производится разгрузка ковша 2. Одновременно просеивавшаяся рудная мелочь, находящаяся в полостях 9 под действием силы тяжести, ссыпается в коллекторы 10, 11, откуда потоком воздуха транспортируется по трубопроводам 12, 13 и гибкому трубопроводу 14 к предварительному сепаратору вакуумной установки 15, где происходит ее накапливание с периодической разгрузкой в специальное транспортное средство. Оставшаяся неотделенной в предварительном сепараторе рудная пыль отделяется в коллекторе тонкой очистки. Вакуумная установка 15 управляется дистанционно машинистом карьерного экскаватора 1. Перед выемкой кондиционной руды или пустой породы вакуумная установка 15 и вибратор 19 отключаются, и весь объем горной массы из ковша 2 грузится в автосамосвал, получающий соответствующее направление разгрузки.

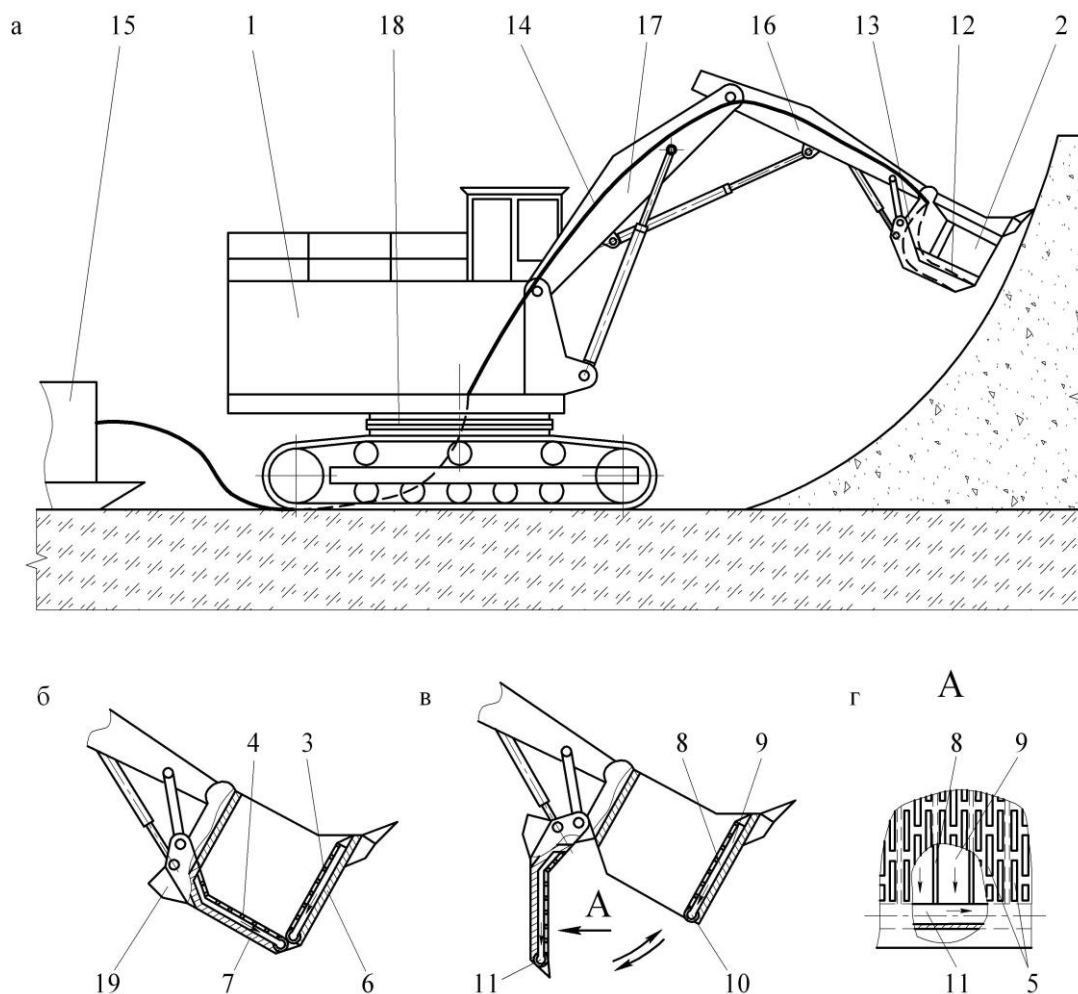


Схема выемки взорванной горной массы с отделением рудной мелочи:
а – карьерный экскаватор с рабочим оборудованием для отделения рудной мелочи;
б, в, г – схема ковша экскаватора с просеивающими поверхностями

Excavation of rock with simultaneous separation of ore fines: а – Mining excavator with the capability to separate ore fines; б, в, г – Excavator bucket with screening surfaces (a sketch)

Экскаватор предлагаемой конструкции во избежание забивания просеивающих поверхностей ковша целесообразно применять для выемки горных пород взорванных полускальных и скальных массивов невысокой влажности и не содержащих глинистых включений. Предотвращение просеивающих поверхностей от засорения в нормальных условиях работы обеспечивает вибронагрузка на ковш экскаватора. Перед проведением взрывного рыхления массива карьерный экскаватор, вакуумная установка с гибким трубопроводом и другое оборудование отводятся из зоны поражения взрывом.

Закключение

Внедрение предлагаемого технико-технологического решения позволит выделять из некондиционной руды обогащенную полезным

компонентом рудную мелочь в объеме 3–4% (от объема некондиционной руды) непосредственно во время выемочно-погрузочного процесса. Для некоторых морфолого-структурных типов руд штокверковых и жильных месторождений золота, вольфрама, молибдена, меди в обогащенной рудной мелочи может быть сосредоточено до 50–60% полезного компонента, содержащегося в некондиционном блоке. Таким образом, выделение обогащенной рудной мелочи зоны некондиционных руд взорванного блока позволит увеличить коэффициент извлечения полезного ископаемого из недр, повысит производительность карьера по добыче руды, что снизит удельные затраты на добычу минерального сырья и повысит рентабельность горного производства. Кроме того, отделение из некондиционной рудной массы мелкой фракции уменьшит пыление при

погрузке, транспортировке и складировании некондиционной руды, это улучшит экологическую обстановку в зоне ведения горных работ.

Применение ковша предлагаемой конструкции с неподвижными просеивающими поверхностями в сравнении с ковшом с поворотным просеивающим приспособлением позволит сократить время цикла экскаватора за счет совмещения процессов разгрузки рудной мелочи и крупной фракции. Ковш предлагаемой конструкции может быть установлен на большин-

стве карьерных гидравлических экскаваторов с рабочим оборудованием «прямая лопата» после их минимальной модернизации в виде монтажа гибкого трубопровода вакуумной установки. Для всасывания рудной мелочи целесообразно использовать вакуумные установки Trans Vac SA55 E54 и Mega Vac SA55E54, которые могут транспортировать мелкую фракцию на значительные расстояния, в связи с чем не потребуются их частые перестановки вслед за перемещающимся по забою экскаватором.

Список литературы

1. Условия и перспективы внедрения роботизированных геотехнологий при открытой разработке месторождений / Трубецкой К.Н., Рыльникова М.В., Владимиров Д.Я., Пыталев И.А. // Горный журнал. 2017. № 11. С.60–64.
2. Саматова Л.А., Шепета Е.Д. Комбинированные технологии переработки бедных, забалансовых вольфрамовых руд и отвалов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2013. № S4. С. 187–199.
3. Чебан А.Ю. Способ и оборудование для открытой разработки маломасштабных крутопадающих месторождений // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т. 15. № 3. С. 18–23.
4. Трубецкой К.Н. Решение проблем экологически сбалансированного освоения месторождений открытыми геотехнологиями // Горный журнал. 2018. № 6. С. 71–76.
5. Jarvie-Eggart M.E. Responsible Mining: Case Studies in Managing Social & Environmental Risks in the Developed World. Colorado: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2015. 804 p.
6. Frank U. Multi-perspective enterprise modeling: foundational concepts, prospects and future research challenges. Software & Systems Modeling. 2014, vol. 13, no. 3, pp. 941–962.
7. Чебан А.Ю. Чебан А.Ю. Добычный комплекс для открытой разработки месторождений твердых полезных ископаемых // Горное оборудование и электромеханика. 2017. № 3. С. 8–11.
8. Starke L. Breaking New Ground: Mining, Minerals and Sustainable Development. London: IIED, 2016, 480 p.
9. Wirtgen surface mining for selective limestone mining in the North Caucasus. Russia // Zement-Kalk-Gips Int. 2014, vol. 67, no. 10, pp. 18–19.
10. Каплунов Д.Р., Рыльникова М.В. Комбинированная разработка рудных месторождений. М.: Горная книга, 2012. 344 с.
11. Гладырь А.В. Система интеграции микросейсмических и геоакустических данных геомеханического контроля // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 6. С. 220–234.
12. Чебан А.Ю. Способ доработки глубокого карьера с применением фрезерных машин // Марк-шейдерия и недропользование. 2017. № 4. С. 23–29.
13. Adams M.D. Gold Ore Processing: Project Development and Operations. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2016, 980 p.
14. Gladys A.V., Miroshnikov V.I., Konstantinov A.V. Software and hardware improvement for the streltsov ore field geodynamic testing area // e3s web of conferences electronic resource. 2018. P. 02012.
15. Трубецкой К.Н., Шапарь А.Г. Малоотходные и ресурсосберегающие технологии при открытой разработке месторождений. М.: Недра, 1993. 272 с.
16. Чебан А.Ю. Совершенствование технологий открытой разработки месторождений с использованием карьерных комбайнов и отвалообразователей // Записки горного института. 2015. Т. 214. С. 23–27.
17. Санакулов К.С., Руднев С.В., Канцель А.В. О возможности отработки месторождения Учкулач с использованием технологии рентгенрадиометрического обогащения свинцово-цинковых руд // Горный вестник Узбекистана. 2011. № 1. С. 17–20.
18. Голик В.И. Практика подземного выщелачивания урановых руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2000. № 5. С. 50–52.
19. Технология формирования качества руд Тырнаузского месторождения с использованием предварительной сортировки и обогащения / Хакулов В.А., Крапивский Е.И., Блаев Б.Х., Шаповалов В.А. // Обогащение руд. 2018. № 5. С. 33–39.
20. Пат. 2042015 Российская Федерация, МПК E02F3/40. Ковш с просеивающим приспособлением / К. Модиг; заявитель и патентообладатель К. Модиг. № 5053166/03; заявл. 04.09.1992; опубл. 20.08.1995.
21. Чебан А.Ю. Селективная разработка Эльгинского угольного месторождения с применением выемочно-сортировочного комплекса // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2017. № 4. С. 247–254.
22. Павлов А.М., Семенов Ю.М. Применение вакуумной технологии при зачистке руды в условиях криолитозоны рудника «Ирокинда» // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2007. № 11. С. 24–29.

Поступила 01.10.2019; принята к публикации 14.11.2019; опубликована 25.03.2020

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

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

References

1. Trubetskoy K.N., Rylnikova M.V., Vladimirov D.Ya., Pytalev I.A. Introduction of robotic geotechnologies in open pit mining: Provisions and prospects. *Gorny Zhurnal* [Mining Journal], 2017, no. 11, pp. 60–64. (In Russ.)
2. Samatova L.A., Shepeta E.D. Combined processing of lean and waste tungsten ores. *Gorny informatsionno-analitichesky byulleten* [Mining bulletin], 2013, no. S4, pp. 187–199. (In Russ.)
3. Cheban A.Yu. Method and equipment for opencast mining of small steeply dipping deposits. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of Magnitogorsk State Technical University], 2017, vol. 15, no. 3, pp. 18–23. (In Russ.)
4. Trubetskoy K.N. Solutions to achieve sustainable development in open pit mining. *Gorny Zhurnal* [Mining Journal], 2018, no. 6, pp. 71–76. (In Russ.)
5. Jarvie-Eggart M.E. Responsible Mining: Case Studies in Managing Social & Environmental Risks in the Developed World. Colorado: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2015. 804 p.
6. Frank U. Multi-perspective enterprise modeling: foundational concepts, prospects and future research challenges. *Software & Systems Modeling*. 2014, vol. 13, no. 3, pp. 941–962.
7. Cheban A.Yu. Production Complex for Open-Cast Mining of Solid Minerals. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika* [Mining equipment and electromechanics], 2017, no. 3, pp. 8–11. (In Russ.)
8. Starke L. Breaking New Ground: Mining, Minerals and Sustainable Development. London: IIED, 2016, 480 p.
9. Wirtgen surface mining for selective limestone mining in the North Caucasus. Russia. *Zement-Kalk-Gips Int.* 2014, vol. 67, no. 10, pp. 18–19.
10. Kaplunov D.R., Rylnikova M.V. *Kombinirovannaya razrabotka rudnykh mestorozhdenij* [Combined development of ore deposits]. Moscow: Gornaya kniga, 2012, 344 p. (In Russ.)
11. Gladyr A.V. Integration of microseismic and geoaoustic monitoring data. *Gorny informatsionno-analitichesky byulleten* [Mining bulletin], 2017, no. 6, pp. 220–234. (In Russ.)
12. Cheban A.Yu. A method for developing deep open pits using milling machines. *Markshejderiya i nedropolzovanie* [Mine surveying and subsurface use], 2017, no. 4, pp. 23–29. (In Russ.)
13. Adams M. D. Gold Ore Processing: Project Development and Operations. 2nd ed. Amsterdam : Elsevier, 2016, 980 p.
14. Gladyr A.V., Miroshnikov V.I., Konstantinov A.V. Software and hardware improvement for the streltsov ore field geodynamic testing area. e3s web of conferences electronic resource. 2018, p. 02012.
15. Trubetskoy K.N., Shapar A.G. *Malootodnye i resursosberegajushhie tehnologii pri otkrytoj razrabotke mestorozhdenij: monografiya* [Low-waste and resource-saving technologies in open pit mining: monograph]. Moscow: Nedra, 1993, 272 p. (In Russ.)
16. Cheban A.Yu. Technology of open pit mining optimised through the use of surface miners and spreaders. *Zapiski gornogo instituta* [Journal of Mining Institute], 2015, vol. 214, pp. 23–27. (In Russ.)
17. Sanakulov K.S., Rudnev S.V., Kantsel A.V. On the possibility of using X-ray radiometric technique for the concentration of lead-zinc ores of the Uchkulach deposit. *Gornyj vestnik Uzbekistana* [Mining bulletin of Uzbekistan], 2011, no. 1, pp. 17–20. (In Russ.)
18. Golik V.I. The practice of in-situ leaching of uranium ores. *Gorny informatsionno-analitichesky byulleten* [Mining bulletin], 2000, no. 5, pp. 50–52. (In Russ.)
19. Khakulov V.A., Krapivskiy E.I., Blaev B.Kh., Shapovalov V.A. Building the quality of the Tyrynauz ores through pre-separation and concentration. *Obogashchenie Rud* [Beneficiation of ores], 2018, no. 5, pp. 33–39. (In Russ.)
20. Modig K. *Kovsh s proseivajushhim prisposobleniem* [Bucket with a screening device]. Patent RF, no. 2042015, 1995. (In Russ.)
21. Cheban A.Yu. Selective development of the Elginsk coal deposit using an excavation and separation complex. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle* [Bulletin of Tula State University. Earth sciences], 2017, no. 4, pp. 247–254. (In Russ.)
22. Pavlov A.M., Semenov Yu.M. Application of vacuum technology for ore stripping in the cryolitic zone of the Irokinda mine. *Gorny informatsionno-analitichesky byulleten* [Mining bulletin], 2007, no. 11, pp. 24–29. (In Russ.)

Submitted 01/10/2019; revised 14/11/2019; published 25/03/2020

Anton Yu. Cheban – Lead Researcher

Institute of Mining at the Khabarovsk Federal Research Center, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia. E-mail: chebanay@mail.ru

Artur G. Sekisov – Principal Researcher

Institute of Mining at the Khabarovsk Federal Research Center, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia. E-mail: sekisovag@mail.ru

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

METAL FORMING

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

УДК 539.374

DOI: 10.18503/1995-2732-2020-18-1-23-30



ИССЛЕДОВАНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТАЛЛА ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ СТАЛИ МАРКИ 32Г2У В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР

Аль-Кхузаи А.С.О., Выдрин А.В., Широков В.В.

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Состояние вопроса. Несмотря на важность для проектирования и расчётов процессов обработки металлов давлением такого фактора, как величина сопротивления металла пластической деформации, нахождение необходимой для его расчёта информации может быть затруднительно. И можно назвать две основные причины такому положению дел – существование множества расчётных методик и ещё большего количества марок сталей. Кроме того, как правило, методики расчёта, и опубликованные значения численных коэффициентов, необходимых для расчёта, различны для процессов холодной и горячей деформации. При этом остаётся наименее исследованный диапазон температур – примерно от 300 до 600°C. Данная статья посвящена исследованию сопротивления пластической деформации стали 32Г2У с учетом его функциональных свойств. Выбор данной марки стали обусловлен тем, что она широко применяется при производстве бесшовных труб для нефтегазовой отрасли. Особенностью исследования является то, что оно было проведено по единой методике для диапазона температур от комнатной до температур близких к температуре плавления. Такой широкий диапазон температур позволяет использовать полученные результаты при расчёте всех возможных технологических операции производства труб, как процессы горячей деформации калибровки и правки труб в термических отделах трубопрокатных цехов, формовка прямошовных сварных труб. **Методика исследования.** Для определения численных значений коэффициентов, входящих в уравнение, была проведена серия испытаний на комплексе Gleeble 3800. По полученным кривым сопротивления деформации для диапазона температур от 300 до 1200°C были определены значения коэффициента, характеризующего разупрочнение металла. При этом впервые был обнаружен факт разупрочнения металла при температурах близких к 600°C и дано физическое обоснование этого явления. **Полученные результаты.** Определены причины разупрочнения металла при температуре близкой к 600°C. По результатам испытаний была получена рекуррентная зависимость, позволяющая рассчитывать величину сопротивления деформации с учётом разупрочнения в широком диапазоне температур.

Ключевые слова: разупрочнение; микроструктура, пластическая деформация, сопротивление металла пластической деформации.

© Аль-Кхузаи А.С.О., Выдрин А.В., Широков В.В., 2020

Для цитирования

Аль-Кхузаи А.С.О., Выдрин А.В., Широков В.В. Исследование сопротивления металла пластической деформации стали марки 32Г2У в широком диапазоне изменения температур // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т.18. №1. С. 23–30. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-1-23-30>



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

STUDYING PLASTIC RESISTANCE OF STEEL GRADE 32G2U IN A BROAD RANGE OF TEMPERATURE CHANGE

Ahmed S. O. Al-Khuzai, Alexander V. Vydrin, Vyacheslav V. Shirokov

South Ural State University (SUSU), Chelyabinsk, Russia

Abstract. State of the issue. Although it is important to know such factor as a value of plastic resistance of steel, when designing and calculating metal forming processes, it may be challenging to find information relevant for its calculation. Two main reasons may be mentioned: many calculation methods and even greater steel grades. Besides, as a rule, calculation methods and published values of numerical coefficients used in calculations vary for cold and hot forming processes. The least studied range of temperatures is approximately from 300 to 600°C. This paper is devoted to studies on plastic resistance of steel grade 32G2U in view of its functional properties. This steel grade was chosen because it is widely used in manufacturing of seamless pipes for the oil and gas industry. The characteristic feature of the studies is a common methodology used for a temperature range from room temperature to temperatures close to melting temperature. Such broad temperature range contributes to the use of the obtained results, when calculating all possible pipe manufacturing operations, such as hot working, sizing and leveling of pipes in heat treatment divisions of pipe rolling shops, forming of longitudinal welded pipes. **Research methodology.** To determine values of coefficients included in the equation, the authors conducted tests applying Gleeble 3800. Using the generated strain resistance curves for a temperature range of 300 to 1200°C, the authors determined values of the coefficient characterizing steel softening. For the first time, it was found that steel is softened at temperatures close to 600°C and this phenomenon was explained in terms of physics. **Findings.** The authors determined the reasons for steel softening at temperature close to 600°C. The test results showed a recurrent dependence to calculate a value of steel resistance considering softening in a broad range of temperatures.

Keywords: softening, microstructure, plastic deformation, plastic resistance of steel.

For citation

Al-Khuzai A.S.O., Vydrin A.V., Shirokov V.V. Studying Plastic Resistance of Steel Grade 32G2U in a Broad Range of Temperature Change. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2020, vol. 18, no. 1, pp. 23–30. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-1-23-30>

Введение

Сопротивление металла пластической деформации является важнейшей характеристикой процесса пластического течения, в частности при обработке металлов давлением. От величины сопротивления металлов пластической деформации зависит, прежде всего, уровень энергосиловых параметров процесса и, следовательно, мощность, которую необходимо подвести в очаг деформации.

Величина сопротивления металлов пластической деформации зависит от типа кристаллической решетки металла, его химического состава и структуры, степени и скорости деформации, температуры металла, истории развития деформации во времени [1]. В настоящее время известно довольно много методик расчёта величины сопротивления металла деформации [2,3]. При этом, как правило, методики определения сопротивления металлов пластической деформации для случаев холодного и горячего деформирования различаются между собой. При холодной деформации считается, что сопротивление металла пластической деформации зависит только от степени деформации, и эта зависимость имеет степенной характер. При горячей деформации широкое распространение нашел метод термомеханических коэффициентов, позволяющий учесть влияние на сопротивление металла пластической деформации степени, скорости и температуры [4]. Как правило, зависимость величины сопротивления деформации определяют

отдельно для случая холодной (20–300°C) и горячей (800–1200°C) деформации [3,5,8,10–12]. Как следствие, известные методики нельзя распространить на случай теплой деформации (для сталей это диапазон температур от 300 до 800°C) и к тому же они не учитывают влияние истории нагружения.

Достаточно корректная и научно обоснованная методика определения сопротивления металла пластической деформации как функционала, учитывающего историю деформирования, представлена в работе [6]. Однако эта методика приводит к необходимости решения интегрального уравнения, что связано с существенными математическими трудностями. Еще одна попытка конструирования функционала сопротивления металла пластической деформации на основе анализа соотношения скоростей упрочнения и разупрочнения представлена в работе [7]. Но и она привела к необходимости решения интегрального уравнения. Поэтому в работе [7] на основе полученного функционала предложен рекуррентный алгоритм расчета сопротивления металла пластической деформации и методика определения входящих в него реологических коэффициентов. При этом, в частности, для определения скорости разупрочнения металла используется известная формула [13]

$$\Delta\sigma_s = \Delta\sigma_{s0} \exp\left(\frac{(-\Delta t)}{k}\right),$$

где $\Delta\sigma_s$ – величина остаточного упрочнения через промежуток времени Δt после окончания процесса деформирования; $\Delta\sigma_{s0}$ – величина упрочнения металла в конце процесса деформации; k – эмпирический коэффициент.

Эмпирический коэффициент k характеризует скорость процессов разупрочнения и с физической точки зрения представляет собой промежуток времени, в процессе которого происходит полное разупрочнение металла. В работе [7] показано, что этот коэффициент зависит от температуры. Однако следует отметить, что в настоящее время практически отсутствуют экспериментальные исследования закономерностей интенсивности разупрочнения металла. В настоящей работе сделана попытка устранить этот недостаток.

Методика исследования

Для определения численных значений коэффициента k была проведена серия испытаний на комплексе Gleeble 3800. Данный комплекс в последнее время широко применяется для исследо-

вания процессов деформации [8,9,11,12]. В качестве исследуемого материала использовалась трубная сталь 32Г2У. Данная марка стали широко применяется при производстве бесшовных труб для нефтегазовой промышленности. Для этой стали на основе экспериментальных данных были построены кривые зависимости ее сопротивления деформации от степени деформации в диапазоне температур от 20 до 1200°C. Для определения коэффициента разупрочнения использовали результаты испытаний при температурах от 300 до 1200°C, поскольку при меньших температурах разупрочнение практически не наблюдается. Кривые, описывающие зависимость величины сопротивления деформации от степени деформации для различных температур, представлены на **рис. 1**. Из рисунка видно, что с ростом температуры деформации увеличивается величина разупрочнения. Что ожидаемо, однако, из рисунка также видно, что кривые деформации для температуры 600°C отличаются от кривых деформации, полученных как при более высоких температурах, так и при более низких.

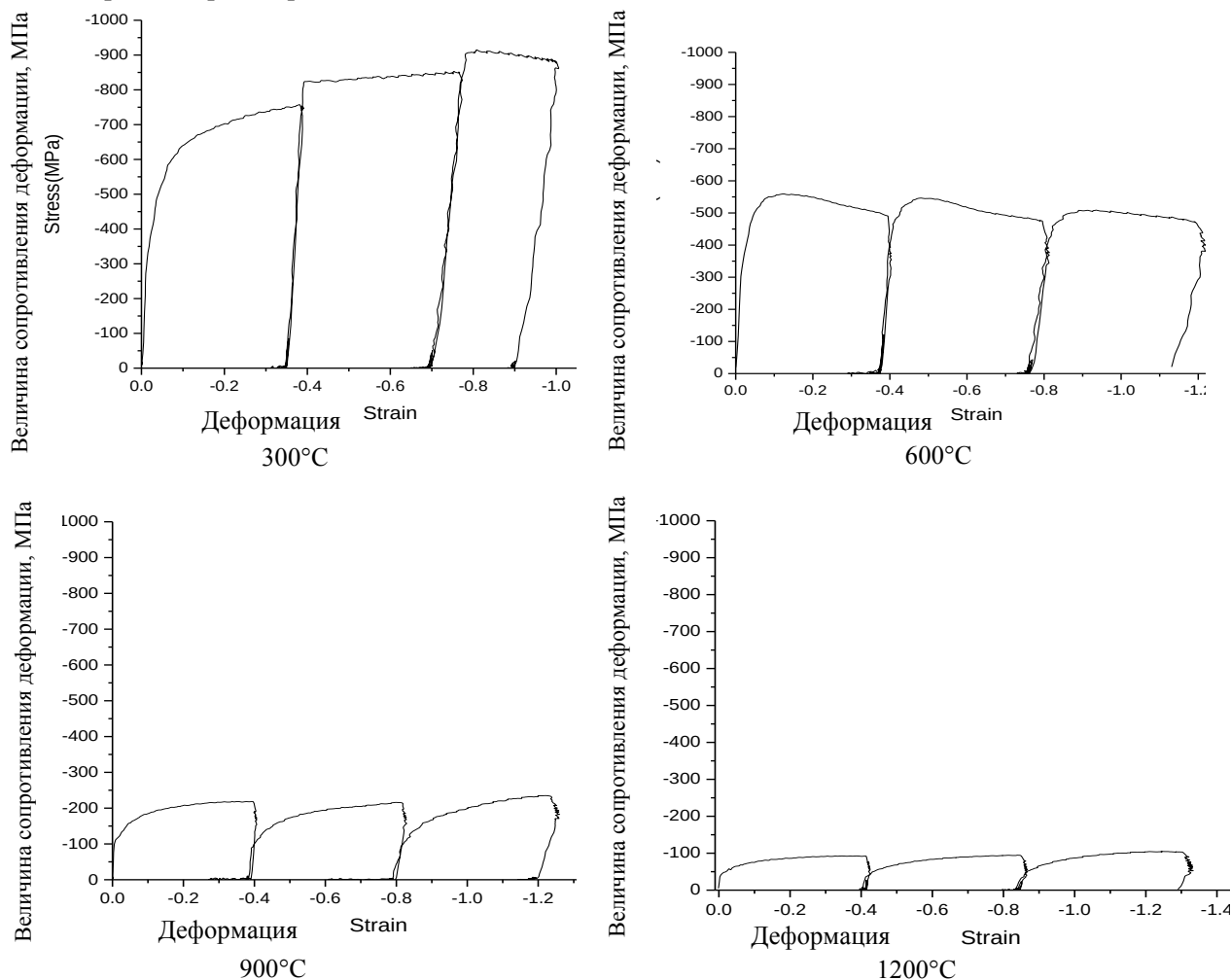


Рис. 1. Зависимость величины сопротивления деформации стали 32Г2У от величины деформации при различных температурах

Fig. 1. Variation of plastic resistance of steel grade 32G2U with respect to deformation at various temperatures

Для объяснения этого феномена было проведено исследование трансформации микроструктуры металла, которое показало, что при температуре деформации 300°C происходит только изменение формы зерен без изменения фазового состава. При температурах 900 и 1200°C, как и следовало ожидать, происходит образование аустенита. При этом отсутствие разупрочнения на кривых «деформация-напряжение» при температурах 900 и 1200°C объясняется тем, что фактически в процессе эксперимента замеряется усилие осадки, на которое влияет подпирющее действие сил трения на контактной поверхности. Несмотря на то, что в процессе эксперимента между бойком испытательной машины и деформируемым образцом подкладывались пластинки, служащие для снижения напряжений трения, микроструктурные исследования показали наличие зоны затрудненной деформации вблизи контактной поверхности, что свидетельствует о заметном влиянии сил трения на величину усилия осадки. Проведенные в последующем опыты на растяжение показали, что при температурах 900 и 1200°C происходит динамическое разупрочнение металла, которое не фиксируется при сжатии образцов из-за влияния на результаты замеров напряжений контактного трения.

Исследования микроструктуры металла*, продеформированного при 600°C, показали, что исходная структура представляет собой зерна перлита, окруженные зернами феррита (рис. 2, а). В процессе деформации зерна феррита вытягиваются в направлении течения металла, но при этом практически не происходит изменения их фазового состава. В зернах перлита пластическая деформация приводит к разрушению прослоек цементита, отдельные фрагменты которых благодаря диффузии затем коагулируют

(рис. 2, б). В результате прочностные свойства металла снижаются, несмотря на отсутствие фазовых превращений.

Полученные при проведении экспериментов на сжатие образцов из стали 32Г2У результаты были обработаны для получения коэффициентов, входящих в зависимости для расчета величины сопротивления деформации. Для этого кривые изменения величины сопротивления деформации и степени деформации представлялись в виде зависимостей от времени (рис. 3).

Величина коэффициента k определялась с использованием экспериментальных данных по формуле

$$k = \left(\frac{(-\Delta t)}{\ln \frac{\Delta \sigma_s}{\Delta \sigma_{s0}}} \right).$$

Полученные кривые показывают, что во время разупрочнения температура металла остается практически постоянной благодаря системам автоматизации установки Gleeble 3800. Это, в свою очередь, позволило определить зависимость коэффициента k от температуры.

Полученные результаты

Для получения значений эмпирических коэффициентов все экспериментальные данные были обработаны с помощью метода наименьших квадратов. В результате для стали 32Г2У с учетом влияния температуры на процесс разупрочнения было получено

$$\Delta \sigma_s = \Delta \sigma_{s0} \exp \left(\frac{(-\Delta t)}{0.098 \left(\frac{1389 - \theta}{\theta + 20} \right)} \right).$$

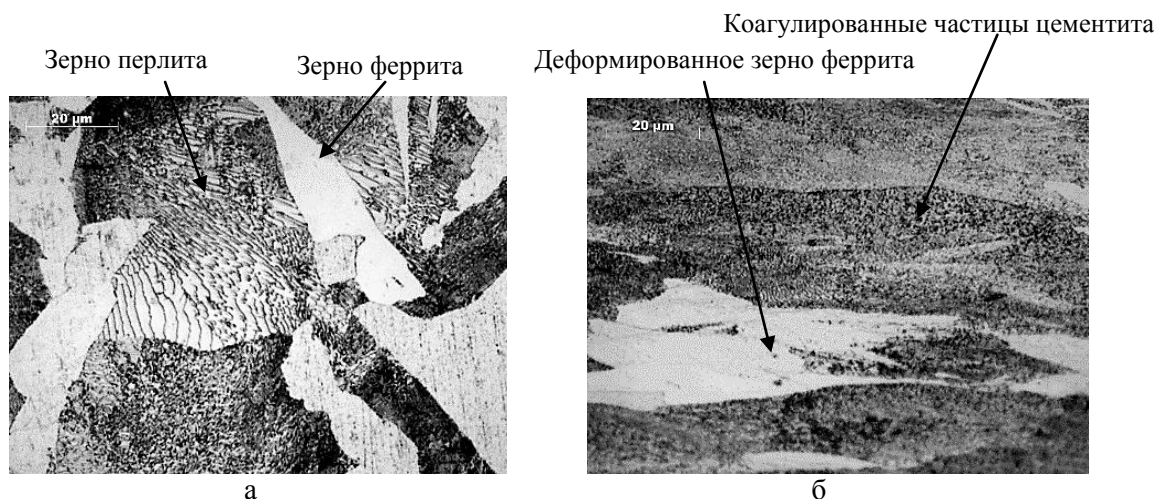


Рис. 2. Микроструктура: а – исходная; б – после деформации при 600°C
Fig. 2. Microstructure: a is an original microstructure; б is after deformation at 600°C

* Исследования проведены при научном консультировании профессора М.А. Смирнова.

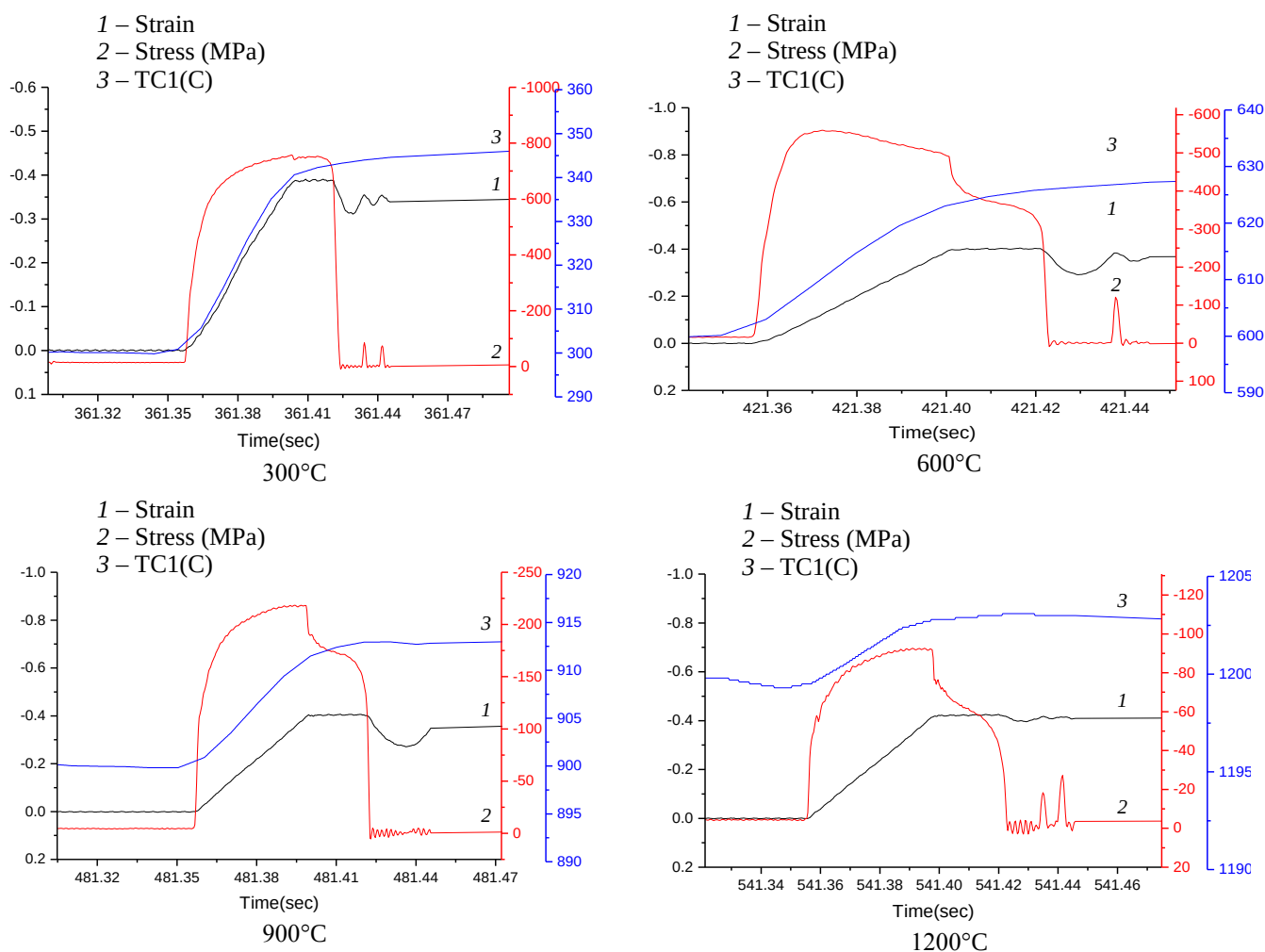


Рис. 3. Зависимости величины степени деформации (1), сопротивления деформации (2) и температуры (3) от времени
 Fig. 3. Relations between deformation degree (1), strain resistance (2), temperature (3) and time

Для определения влияния деформационной составляющей упрочнения на величину сопротивления металла пластической деформации были проведены эксперименты по растяжению образцов из стали 32Г2У при комнатной температуре. Эксперименты также проводились на комплексе Gleeble 3800. В результате была построена кривая упрочнения для металла, отобранного от гильзы после прошивки. Уравнение, описывающее кривую упрочнения, полученное с применением метода наименьших квадратов, имеет вид

$$\sigma_s = 485 + 747\Lambda^{1.27},$$

где Λ – величина деформации.

Адекватность этого уравнения полученным экспериментальным данным показана на рис. 4.

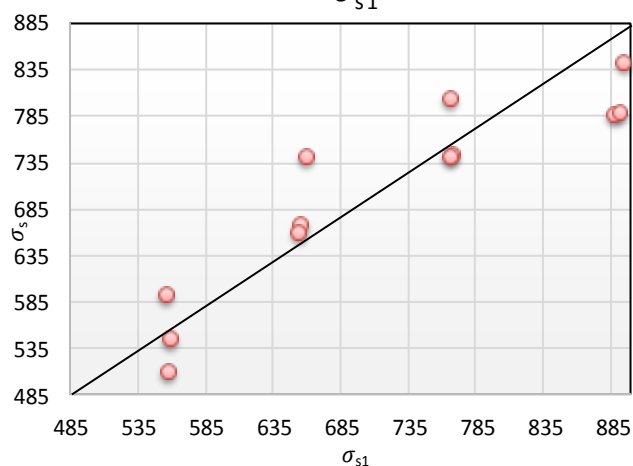


Рис. 4. Диаграмма соответствия расчетных и экспериментальных данных по определению сопротивления пластической деформации стали марки 32Г2У при комнатной температуре

Fig. 4. Diagram of conformity of the calculated and experimental data to calculate plastic resistance of steel grade 32G2U at room temperature

Чтобы построить рекуррентный алгоритм для определения сопротивления металла пластической деформации по методике работы [7], необходимо также знать влияние температуры на сопротивление металла пластической деформации в исходном состоянии, то есть характер функции $\sigma_{s0} = \Delta\sigma_{s0}(\theta)$. За основу при этом была взята зависимость, общий вид которой представлен в работе [7]. Для определения эмпирических коэффициентов, входящих в эту зависимость, применительно к стали 32Г2У были проведены эксперименты по растяжению образцов при различных температурах на комплексе Gleeble 3800. Полученные экспериментальные данные представлены на рис. 5. Уравнение регрессии, построенное путем обработки полученных экспериментальных данных с помощью метода наименьших квадратов, имеет вид

$$\sigma_{s0} = 485 \exp \left[-0.9591 \left(\frac{\theta_0 - 20}{1389 - \theta_0} \right) \right]^{0.43},$$

где θ_0 – температура стали перед деформированием.

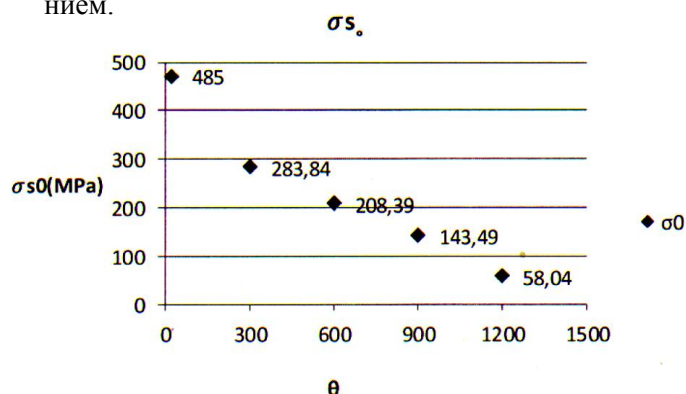


Рис. 5. Влияние температуры нагрева на сопротивление пластической деформации стали 32Г2У в недеформированном состоянии

Fig. 5. Influence of heating temperature on plastic resistance of steel grade 32G2U in a non-deformed state

В итоге получено базовое уравнение рекуррентного алгоритма определения сопротивления пластической деформации стали марки 32Г2У в виде

$$\sigma_{si} = 485 \exp \left[-0.9591 \left(\frac{\theta_i - 20}{1389 - \theta_i} \right) \right]^{0.43} \sum_{i=1}^m \left\{ 7474 \left(\Lambda_i^{1.27} - \Lambda_i^{1.27} \right) \times \right. \\ \left. \times \left(\sigma_{s(i-1)} - 485 \exp \left[-0.9591 \left(\frac{\theta_i - 20}{1389 - \theta_i} \right) \right]^{0.43} \right) \exp \left(\frac{(-\Delta t)}{0.098 \left(\frac{1389 - \theta}{\theta + 20} \right)} \right) - 1 \right\}$$

Заключение

В представленной работе выполнено комплексное исследование процессов упрочнения и разупрочнения стали 32Г2У в диапазоне изменения температуры от 20 до 1200°C. Получено рекуррентное уравнение для расчёта величины сопротивления деформации металла в диапазоне температур от 20 до 1200°C. Определена зависимость для вычисления коэффициента разупрочнения стали. При этом выявлен физический механизм разупрочнения стали при температурах тепловой деформации, который заключается в разрушении и коагуляции частиц цементита в перлитном зерне.

Полученные результаты могут быть использованы при определении технологических параметров процессов холодной прокатки труб, например на станах ХПТ, трубоэлектросварочных агрегатах (температура от 20 до 300°C), процессов калибровки и правки труб в термических отделах (температура от 300 до 700°C) и процессов горячей деформации при прошивке и раскатке гильз (температура выше 700°C).

Список литературы

1. Коликов А.П., Романцев Б.А. Теория обработки металлов давлением. М.: Изд. Дом МИСиС, 2015. 451 с.
2. Остапенко А.Л., Забира Л.А. Сопротивление деформации сталей при прокатке и методики его расчета // Чёрная металлургия. 2009. №3 (1311). С. 54–79.
3. Хензель А., Шпиттель Т. Расчет энергосиловых параметров в процессах обработки металлов давлением: справ. изд.: пер. с нем. М.: Металлургия, 1982. 360 с.
4. Зильберг Ю.В. Теория обработки металлов давлением. Днепропетровск: Пороги, 2009. 434 с.
5. Третьяков А.В., Зюзин В.И. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением. М.: Металлургия, 1973. 224 с.
6. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. Екатеринбург: Изд-во Уральского государственного технического университета – УПИ, 2001. 836 с.
7. Дукмасов, В.Г. Выдрин А.В. Математические модели и процессы прокатки профилей высокого качества. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2002. 215 с.
8. Ишимов А.С., Барышников М.П., Чукин М.В. К вопросу выбора математической функции уравнения со-

- стояния для описания реологических свойств стали 20 в процессе горячей пластической деформации // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. № 1 (49). С. 43–52.
9. E.I. POLIAK, J.J. JONAS. Initiation of Dynamic Recrystallization in Constant Strain Rate Hot Deformation. *ISIJ International*, vol. 43 (2003), no. 5, pp. 684–691.
 10. New model predicting flow curves in wide range of thermomechanical conditions of 38MnVS6 steel / Opěla P., Schindler I., Kawulok P., Vančura F., Kawulok R., Rusz S. // METAL 2016 - International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings. 25.05-27.05 2016, Brno, Czech Republic, EU. С. 458–463.
 11. Model of hot deformation resistance of the iron aluminide of the type Fe-40Al / Kawulok R., Opěla P., Schindler I., Kawulok P. // METAL 2013 - 22nd International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings 15. - 17. 5. 2013, Brno, Czech Republic, EU. С. 444–449.
 12. Hot flow stress models of the steel C45 / Opěla P., Schindler I., Kawulok P., Kawulok R., Rusz S., Petrek T., Vančura F. // *Metalurgija - Sisak then Zagreb*, т. 54, №3, с. 469–472.
 13. Аль-Кхузаи А. С.О., Выдрин А.В., Широков В.В. Анализ возможности применения универсальной феноменологической модели сопротивления металла пластической деформации // *Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением*. 2018. №4 (27). С. 61–69.

Поступила 20.12.2019; принята к публикации 21.01.2020; опубликована 25.03.2020

Аль-Кхузаи Ахмед Салим Олейви – аспирант

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: asaalkhuzai@mail.ru

Выдрин Александр Владимирович – д-р техн. наук, профессор

Южно-Уральский государственный университет

зам. генерального директора по научной работе,

ОАО «Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности», Челябинск, Россия.

E-mail: vydrinav@susu.ru

Широков Вячеслав Вячеславович – канд. техн. наук, доцент

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: shirokovvv@susu.ru

ORCID 0000-0003-1663-9362

References

1. Kolikov A.P., Romantsev B.A. *Teoriya obrabotki metallov davleniem* [Theory of metal forming]. Moscow: MISiS Publishing House, 2015, 451 p. (In Russ.)
2. Ostapenko A.L., Zabira L.A. Deformation resistance of steels during rolling and the methods of its calculation. *Chernaya metallurgiya* [Ferrous metallurgy], 2009, no. 3 (1311), pp. 54–79. (In Russ.)
3. Hensel A., Spittel T. *Kraft- und Arbeitsbedarf bildsamer Formgebungsverfahren*. Leipzig, 1978.
4. Zilberg Yu.V. *Teoriya obrabotki metallov davleniem* [Theory of metal forming]. Dnepropetrovsk: Porogi, 2009, 434 p. (In Russ.)
5. Tretyakov A.V., Zyuzin V.I. *Mekhanicheskie svoystva metallov i spлавov pri obrabotke davleniem* [Mechanical properties of metals and alloys during metal forming]. Moscow: Metallurgiya, 1973, 224 p. (In Russ.)
6. Kolmogorov V.L. *Mekhanika obrabotki metallov davleniem* [Mechanics of metal forming]. Yekaterinburg: Publishing House of Ural State Technical University – UPI, 2001, 836 p. (In Russ.)
7. Dukmasov V.G., Vydrin A.V. *Matematicheskie modeli i protsessy prokatki profiley vysokogo kachestva* [Mathematical models and processes of rolling of high-quality profiles]. Chelyabinsk: SUSU Publishing House, 2002, 215 p. (In Russ.)
8. Ishimov A.S., Baryshnikov M.P., Chukin M.V. On the issue of choosing the mathematical function of the equation of state to describe rheological properties of steel 20 in the process of hot plastic deformation. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2015, no. 1 (49), pp. 43–52. (In Russ.)
9. E.I. Poliak, J.J. Jonas. Initiation of dynamic recrystallization in constant strain rate hot deformation. *ISIJ International*, vol. 43 (2003), no. 5, pp. 684–691.
10. Opěla P., Schindler I., Kawulok P., Vančura F., Kawulok R., Rusz S. New model predicting flow curves in wide

- range of thermomechanical conditions of 38MnVS6 steel. METAL 2016 - International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings. 25.05-27.05.2016, Brno, Czech Republic, EU, pp. 458–463.
11. Kawulok R., Opěla P., Schindler I., Kawulok P. Model of hot deformation resistance of the iron aluminide of the type Fe-40Al.%Al. METAL 2013 - 22nd International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings 15. - 17.5.2013, Brno, Czech Republic, EU, pp. 444–449.
 12. Opěla P., Schindler I., Kawulok P., Kawulok R., Ruzs S., Petrek T., Vančura F. Hot flow stress models of the steel C45. Metalurgija -Sisak then Zagreb, vol. 54, no.3, pp. 469–472.
 13. Al-Khuzai A.S.O., Vydrin A.V., Shirokov V.V. Analysis of a possible application of a universal phenomenological model of metal resistance to plastic deformation] *Modelirovanie i razvitie protsessov obrabotki metallov davleniyem* [Modeling and development of metal forming processes], 2018, no. 4 (27), pp. 61–69. (In Russ.)

Submitted 20/12/2020; revised 21/01/2020; published 25/03/2020

Ahmed S. O. Al-Khuzai – Postgraduate Student

South Ural State University (SUSU), Chelyabinsk, Russia. E-mail: asaalkhuzai@mail.ru

Alexander V. Vydrin – DrSc (Eng.), Professor

South Ural State University, Deputy General Director for Research

OJSC Russian Research Institute of the Pipe Industry (RosNITI), Chelyabinsk, Russia. E-mail: vydrinav@susu.ru

Vyacheslav V. Shirokov – PhD (Eng.), Associate Professor

South Ural State University (SUSU), Chelyabinsk, Russia.

E-mail: shirokovvv@susu.ru. ORCID 0000-0003-1663-9362

ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

MATERIAL PROCESS ENGINEERING

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

УДК 621.762.002.68

DOI: 10.18503/1995-2732-2020-18-1-31-39



СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ.

Часть 2. Определение оптимальных условий реализации технологии

Троценко И.Г., Герасименко Т.Е., Алкацев В.М., Евдокимов С.И.

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

Аннотация. Постановка задачи: в связи со снижением разрабатываемых месторождений вольфрамового сырья актуальным вопросом для Российской Федерации является вторичная переработка вольфрамсодержащих отходов с использованием эффективного способа переработки отходов твердых сплавов для снижения импорта вольфрамового сырья, преимущественно из Китая. **Цель работы:** определение оптимальных условий проведения процесса, позволяющих повысить эффективность технологии переработки отходов твердых сплавов и увеличить ее коммерческую привлекательность для производителей твердосплавной продукции. **Новизна:** в результате исследований выявлены параметры процесса, влияющие на эффективность технологии, и доказана применимость разработанной технологии для переработки реальных твердосплавных отходов с получением порошка, пригодного для изготовления новых твердосплавных изделий. Выявлено, что во избежание парообразования «холостого» цинка, нагрев в реакторе деструкции целесообразно производить в атмосфере инертного газа до достижения температуры 850–950⁰С в интервале давления от 0,5 до 1 атм, а процессы дистилляции цинка и деструкции отходов твердых сплавов – при вакууме 4–5 Па в течение 5–10 мин. Такой вакуум обеспечивает защитную от окисления среду и требуемую степень отгонки цинка. **Результат:** разработанная технология переработки кусковых отходов твердых сплавов и реактор для её осуществления позволяют полностью деструктурировать твердый сплав быстрее всех известных аналогов в 4–8 раз с минимальными затратами электроэнергии. **Практическая значимость:** использование технологии в нашей стране позволит многократно эффективно перерабатывать отходы твердых сплавов, что сократит импорт вольфрамового сырья из других государств, преимущественно из Китая.

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

© Троценко И.Г., Герасименко Т.Е., Алкацев В.М., Евдокимов С.И., 2020

Для цитирования

Совершенствование технологии переработки отходов твердых сплавов. Часть 2. Определение оптимальных условий реализации технологии / Троценко И.Г., Герасименко Т.Е., Алкацев В.М., Евдокимов С.И. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т.18. №1. С. 31–39. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-1-31-39>



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

OPTIMISED WASTE CARBIDE RECYCLING TECHNOLOGY.

Part 2. Finding Optimum Implementation Conditions

Igor G. Trotsenko, Tatiana E. Gerasimenko, Vladimir M. Alkatsev, Sergey I. Evdokimov

North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technical University), Vladikavkaz, Russia

Abstract. Problem Statement: Due to a reduced number of the developed tungsten deposits, Russian Federation is facing an urgent issue related to the recycling of tungsten-containing waste by using an efficient waste carbide recycling technique in order to reduce imports of tungsten raw materials, mainly from China. **Objectives:** To find optimum conditions that would make the carbide recycling process more efficient and cost-effective for manufacturers of carbide products. **Originality:** This study helped identify the process parameters affecting the process efficiency and confirm the applicability of the developed process, which is designed to turn real carbide waste into powder that can be used to produce new carbide products. The findings show that, in order to avoid the formation of “idle” zinc, it is recommended to reach the temperatures of 850–950°C in a decomposition reactor and inert gas in the pressure range from 0.5 to 1 atm should be used for the heating process, whereas the distillation and destruction processes should take place in vacuum at 4–5 Pa for 5–10 minutes. The vacuum creates an anti-oxidation environment and ensures the required degree of distillation. **Findings:** With the help of the developed recycling process and the corresponding reactor, carbide material can be completely decomposed at the rate 4–8 times higher than through any of the known alternative techniques and with minimum power consumed. **Practical Relevance:** Implementation of this process in our country will allow us to boost the efficiency of waste carbide recycling and thus reduce the imports of tungsten raw materials from other countries, mainly from China.

Keywords: carbide materials, disposal, decomposition, waste recycling technology.

For citation

Trotsenko I.G., Gerasimenko T.E., Alkatsev V.M., Evdokimov S.I. Optimised Waste Carbide Recycling Technology. Part 2. Finding Optimum Implementation Conditions. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2020, vol. 18, no. 1, pp. 31–39. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-1-31-39>

Введение

Спечённые твёрдые сплавы широко применяются для производства инструмента [1]. Известно, что запасы вольфрама в Российской Федерации сокращаются на величину порядка 3,3 тыс. т в год [2], в связи с чем переработка отходов твёрдых сплавов является актуальной задачей, которая решается созданием техники и технологии, позволяющей снизить материальные и энергетические затраты по сравнению с переработкой природного сырья. В связи с этим, как ранее [3–7], так и в последнее время [8–20], разработкой техники и технологии утилизации кусковых отходов твёрдых сплавов занимались как российские, так и зарубежные изобретатели. Однако все известные способы имеют повышенные энергетические затраты и продолжительны по времени, что обуславливает их низкую производительность.

Для повышения эффективности процесса переработки отходов твердых сплавов на кафедре «Металлургия цветных металлов и автоматизация металлургических процессов» ФГБОУ ВО СКГМИ (ГТУ) разработан комбинированный способ утилизации кусковых отходов твёрдых сплавов на кобальтовой связке [21], конвекционными потоками при кипении цинка, и газообраз-

ным цинком в момент конденсации, который реализуют в реакторе деструкции (рис. 1) [22].

Материалы и методы исследования

Сущность способа заключается в следующем. В горячую зону реактора загружают цинк, а в холодную зону – отходы твердого сплава в соотношении цинка к отходам (1–2):1. Данный способ включает два этапа. На первом этапе осуществляют нагрев цинка в горячей зоне реактора до температуры 850–950°C в атмосфере инертного газа при давлении 0,5–1,0 атм. Затем создают в реакционной зоне вакуум 4–5 Па и выдерживают в нём цинк в течение 5–10 мин. Снижение давления в реакционной зоне приводит к образованию достаточно активных паров цинка, которые диффундируют в холодную зону, в которой размещены кусковые отходы твёрдых сплавов со структурой, изображённой на рис. 2. При этом пары цинка в процессе конденсации взаимодействуют с кобальтовой связкой, образуя расплавы, которые приводят к устранению адгезии между карбидом вольфрама и связкой, то есть происходит первичная деструкция. После охлаждения реактора продукт деструкции твёрдого сплава, представляющий собой хрупкий пористый материал, перемещают из холодной зоны в горячую и проводят второй этап. Одновременно в холодную зону помещают очередную порцию кусковых отходов твёрдых сплавов.



Рис. 1. Реактор деструкции отходов твёрдых сплавов

Fig. 1. Waste carbide decomposition reactor



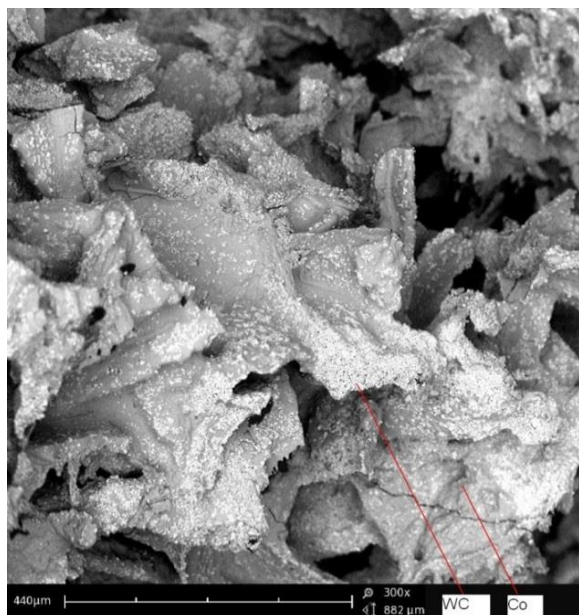
Рис. 2. Микроструктура исходного сплава ВК10, загружаемого в холодную зону реактора

Fig. 2. Microstructure of the initial alloy VK10 charged in the cold zone of the reactor

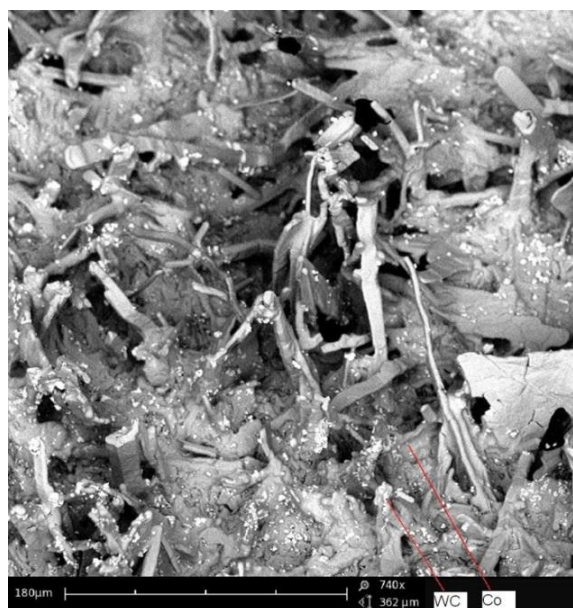
На втором этапе нагрев цинксодержащего сплава, полученного после первичной деструкции, осуществляют также в среде инертного газа при тех же режимных параметрах. При нагреве материала в горячей зоне до температуры 800–850°C сплав Co-Zn начинает расплавляться, так как массовая доля кобальта в сплаве составляет 4,8–9% (если перерабатывается ВК–10) и 9,1–

16,6% (если перерабатывается ВК–20). Помимо сплава Co-Zn в материале также присутствуют частицы свободного цинка, не вступившего в реакцию с кобальтом, имеющего более низкую температуру плавления по сравнению со сплавом Co-Zn. При резком вакуумировании реакционной зоны свободный цинк и сплав Co-Zn начинает кипеть, то есть образуются центры парообразования, количество которых постепенно увеличивается. В результате устанавливается развитое пузырьковое кипение. Цепочки из паровых пузырьков сливаются в струи пара, и при высокой тепловой нагрузке поверхность раздела струй пар-жидкость становится неустойчивой. Конвекционные потоки при кипении свободного Zn и расплава Co-Zn, соприкасаясь с кобальтом, «вымывают» его из твердого сплава. Результат воздействия конвекционных потоков хорошо виден под микроскопом (рис.3), где показана поверхность образца, на которой четко видны затвердевшие всплески кобальта и вкрапления карбида вольфрама. То есть вначале протекает процесс дистилляции сплава Co-Zn, до массовой доли цинка в сплаве примерно 64%, а затем сравнительно медленный процесс сублимации (перевод цинка из твердого состояния (из сплава Co-Zn) непосредственно без плавления в газовую фазу). Пузырьковое кипение приводит к возникновению концентрационно-капиллярной конвекции, и из сплава WC+(Co-Zn) «вымывает-

ся» на поверхность (Co-Zn), так как он имеет меньшую плотность по сравнению с зернами WC, а зерна WC перемещаются вниз.



а



б

Рис. 3. Застывшие потоки сплава после воздействия конвекционных потоков: а – VK-10; б – VK-20

Fig. 3. Solidified alloy after the impact of convection flows: a – VK-10; b – VK-20

Процессы, протекающие в горячей зоне реактора, способствуют вторичной и окончательной деструкции отходов твёрдых сплавов. Параллельно вторичной деструкции протекает пер-

вичная деструкция новой порции отходов в холодной зоне, в которую диффундируют пары цинка из горячей зоны. То есть деструкция отходов твердых сплавов (рис. 4) протекает сначала в холодной зоне (первичная деструкция) (рис. 5), затем в горячей зоне (вторичная деструкция) (рис. 6). После отгонки цинка и охлаждения получается хрупкий материал, который легко измельчается в порошок, пригодный для производства твёрдосплавных изделий. На рис. 5–6 представлены фотографии, на которых виден результат поэтапной деструкции отходов твердого сплава.



Рис. 4. Отходы твердых сплавов (наковальня для производства синтетических алмазов), загруженные в холодную зону реактора

Fig. 4. Waste carbide material (a synthetic diamond anvil) charged in the cold zone of the reactor



Рис. 5. Продукт, полученный в реакторе после первичной деструкции

Fig. 5. Product in the reactor after the first decomposition process

Одновременно осуществляется процесс дистилляции цинка, пары которого диффундируют в холодную зону и при конденсации приводят к деструкции следующей порции отходов твёрдых сплавов.



Рис. 6. Продукт, полученный в реакторе после отгонки цинка и вторичной деструкции

Fig. 6. Product in the reactor after zinc distillation and the second decomposition process

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ температурных режимов процесса после проведения экспериментальных исследований показал, что оптимальная температура вакуумной дистилляции цинка лежит в интервале 850–950°C. При температуре дистилляции ниже 850°C в горячей зоне происходит возгонка «холостых» (с низкой активностью) паров цинка. Это приводит к образованию цинковых плёнок на поверхности перерабатываемого сплава в холодной зоне, и цинк быстро переходит из газообразного в твёрдое состояние, то есть протекает процесс десублимации. Условия протекания процесса деструкции резко ухудшаются, и эффективность способа утилизации отходов твёрдых сплавов в целом снижается. При увеличении температуры от 850 до 950°C интенсивность деструкции отходов твёрдых сплавов резко увеличивается за счёт повышения активности цинка. И производительность, а также эффективность процесса утилизации существенно возрастают. При этом после осуществления способа утилизации в целом снижается ещё и остаточное содержание цинка в готовом продукте до 0,01%, что удовлетворяет требованиям производителей твёрдых сплавов. Повышение температуры выше 950°C неэффективно в связи с тем, что отсутствует улучшение показателей качества готового продукта, а расход электрической энергии на утилизацию отходов твёрдых сплавов увеличивается.

Проведенные экспериментальные исследования также показали, что нагрев цинка в атмосфере инертного газа до достижения оптимальной температуры (850–950°C) должен осуществляться именно в интервале от 0,5 до 1 атм. Такое давление обеспечивает замедление парообразования «холостого» цинка. Процессы дистилляции цинка и деструкция отходов твёрдых сплавов должны протекать при вакууме 4–5 Па. Такой вакуум обеспечивает защитную от окисления среду и требуемую степень отгонки цинка. Снижение или повышение вакуума нецелесообразно, так как сопряжено с увеличением расхода электроэнергии и продолжительности процесса.

Оптимальная продолжительность процесса деструкции твёрдого сплава 5–10 мин в связи с тем, что именно в этом временном интервале процесс протекает полностью без лишних затрат энергии. Проведение процесса дольше 10 мин нецелесообразно, так как не приводит к повышению степени деструкции отходов твёрдого сплава, а производительность при этом снижается.

При проведении серии экспериментальных исследований использовались образцы толщиной 20 мм и массой 93 г сплавов марки ВК-20 (W – 74,49%, Co – 19,8%, Собщ – 5,53%, Ссв – 0,15%, Fe – 0,03%) и ВК-10 (W – 84,49%, Co – 9,8%, Собщ – 5,53%, Ссв – 0,15%, Fe – 0,03%), которые помещали на графитовой лодочке в холодную зону реактора (250°C), а затем осуществляли их деструкцию по разработанному способу. Общая масса образцов при разовой загрузке в холодную зону реактора составляла от 20 до 50 кг. Для сравнения показателей такие же образцы были деструктурированы известным способом [10]. Результаты эксперимента представлены в **таблице**.

Данные таблицы показывают, что степень деструкции твёрдого сплава, переработанного комбинированным способом, превышает этот показатель по отношению к известному способу в 1,2–1,7 раза. Кроме того, процесс деструкции протекает в 4–8 раз быстрее, следовательно, повышается производительность, снижается расход электроэнергии почти в 2 раза и уменьшается стоимость утилизации отходов твёрдых сплавов.

Сравнительные результаты экспериментальных данных
Comparison of experimental data

Экспериментальные данные	Известный способ переработки		Разработанный комбинированный способ	
	ВК10	ВК20	ВК10	ВК20
Температура деструкции, °С	25–600	25–600	25–950	25–950
Продолжительность деструкции, мин	40	40	10	10
Общая масса загрузки, кг	20	20	20	20
Масса образца, г	93	93	93	93
Масса деструктурированного сплава, г	53	77	93	93
Степень деструкции, %	57	83	100	100
Затраты электроэнергии, кВт·ч на 1 кг перерабатываемых отходов	3,7	3,7	1,8	1,8

Экспериментальные исследования показали, что на продолжительность деструкции твёрдого сплава существенно влияют процессы как молекулярной, так и конвективной диффузии, механизмы действия которых подробно описаны в литературе [23, 24]. Значительное ускорение деструкции возможно благодаря активизации концентрационно-капиллярной конвекции за счет исключения возгонки «холостых» паров цинка. Следует отметить, что «холостые» пары (с температурой 600–850°C), попадая на твёрдый сплав, находящийся в холодной зоне, десублимируют. При этом лишь малая часть цинка участвует в деструкции, а остальная часть оседает на поверхности сплава, образуя цинковые плёнки. В этом случае дальнейшая деструкция протекает уже в горячей зоне, после перемещения в неё твёрдого сплава. Данные таблицы показывают, что в этом случае полной деструктуризации не происходит.

При осуществлении же разработанного комбинированного способа «холостые» пары цинка не образуются, и уже в холодной зоне активно протекает концентрационно-капиллярная конвекция. В результате «активные» пары цинка проникают вглубь сплава по капиллярам, где происходит экстрагирование кобальта на межзёрненных границах в расплав цинка (см. рис. 3). Диффузия цинка сопровождается растворением кобальта и образованием раствора Co-Zn, что приводит к разрушению сплава. Разрушению сплава способствует действие кристаллизационного давления из-за структурных перестроек сплава в присутствии цинка (образуется интерметаллид $\text{Co}_5\text{Zn}_{21}$).

В результате в холодной зоне получают уже частично деструктурированный сплав, который подвергают вторичной деструкции в горячей зоне реактора. В этой зоне при нагреве в вакууме выше 850°C цинк на поверхности сплава и в капиллярах начинает кипеть. Постепенно молеку-

лярная диффузия переходит в конвективную, скорость которой в 10–12 раз выше. При этом снижается диффузионное сопротивление, препятствующее взаимодействию компонентов. Процессы концентрационно-капиллярной конвекции на поверхности раздела фаз интенсифицируются и происходит окончательное разрушение твёрдого сплава.

Разработанный способ апробирован на реальных твердосплавных отходах в опытно-промышленном реакторе (см. рис. 1) [22], масса загрузки в который составила 34 кг (см. рис. 4). Проведённые эксперименты доказали применимость способа к реальным твердосплавным изделиям из сплавов ВК10 и ВК20. Установлено, что разработанный способ позволяет провести полную деструкцию за более короткое время с минимальными затратами энергии, по сравнению с существующим способом [10]. Результаты эксперимента представлены на рис. 4–6. Видно, что уже после первого этапа произошло разрушение твёрдого сплава с высокой степенью деструкции, а после второго этапа процесс деструкции полностью завершился.

Заключение

Разработан комбинированный способ утилизации кусковых отходов твёрдых сплавов на кобальтовой связке, конвекционными потоками при кипении цинка, и газообразным цинком в момент конденсации, реализуемый в реакторе деструкции. Способ осуществляют в два этапа. На первом этапе цинк нагревают в горячей зоне до температуры 850–950°C в атмосфере инертного газа при давлении 0,5–1,0 атм. Затем создают в реакционной зоне вакуум 4–5 Па и выдерживают в нём цинк в течение 5–10 мин. Пары цинка диффундируют в холодную зону, в которой размещены кусковые отходы твёрдых сплавов, где и происходит первичная деструкция. После охлаждения

реактора продукт деструкции перемещают из холодной зоны в горячую зону и проводят второй этап при тех же режимных параметрах. Одновременно в холодную зону помещают очередную порцию отходов твёрдых сплавов. Разработанный способ апробирован в промышленных условиях на реальных отходах твёрдосплавных изделий. Установлено, что на время деструкции твёрдого сплава оказывает значительное влияние концентрационно-

капиллярная конвекция на поверхности раздела фаз. Полная деструкция твёрдого сплава и ускорение этого процесса в 4–8 раз возможно за счёт создания условий, исключающих возгонку «холостых» паров цинка и десублимацию цинка на поверхности перерабатываемого сплава в холодной зоне реактора, способствующие замедлению появления и развития концентрационно-капиллярной конвекции.

Список литературы

1. Технология машиностроения. В 2-х т. Т.2. Производство машин / В.М. Бурцев, А.С. Васильев, О.М. Деев и др. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 640 с.
2. Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2016 и в 2017 годах», Москва, 2018.
3. Козин Л.Ф., Трефилов В.И. Редкометаллическая промышленность Украины. Проблемы и перспективы. Препринт / НАН Украины, ИПМ НАНУ, ИОНХ НАНУ. Киев, 1997. 74 с.
4. Борд Н.Ю., Королевич С.В., Хоняк К.В. Новая технология переработки отходов твёрдых и тяжелых сплавов // Инструмент. 1997. № 6. С. 10.
5. Зеликман А.Н., Каспарова Т.В., Биндер С.И. Получение твёрдых сплавов из регенерированных смесей WC-Co, полученных из кусковых отходов цинковым методом // Цветные металлы. 1993. № 1. С. 47–49.
6. Пат. 2101375 Российская Федерация, МПК C22B 34/36 C22B 7/00. Способ переработки кусковых отходов твёрдых сплавов / Жарков Д.В., Зыкус М.Ю., Медведев А.С., Фисенков М.В.; заявитель и патентообладатель Товарищество с ограниченной ответственностью "МИСОН". № 95122070; заявл. 25.12.1996; опубл. 10.01.1998.
7. Paul G. Barnard, Heine Kenworthy. Reclamation of refractory carbides from carbide materials [Утилизация тугоплавких карбидов из карбидных материалов]. Patent US, no. 3595484, 1971.
8. X. Liu, S. Xu, K. Wang. Recycling of WC-Co alloys [Переработка отходов WC-Co сплавов] // Non-Ferrous Metals. 2003. Vol. 55, no. 3. P. 59–61.
9. Пат. 2443507 Российская Федерация, МПК B22F 9/14 C22B 7/00 B23H 1/00. Способ переработки отходов твёрдого сплава BK8 электроэрозионным диспергированием / Дворник М.И., Ершова Т.Б.; заявитель и патентообладатель ин-т материаловедения Хабаровского научного центра Дальневосточного отделения Российской Академии Наук. № 2009133493; заявл. 07.09.2009; опубл. 2012.
10. Пат. 2276193 Российская Федерация, МПК B22F 9/14 C22B 7/00 B23H 1/00. Способ переработки кусковых отходов твёрдых сплавов / Троценко И.Г., Свистунов Н.В.; заявитель и патентообладатель Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет). № 2004134868; заявл. 29.11.2004; опубл. 2006.
11. Пат. 2189402 Российская Федерация, МПК C25C 1/06 C22B 34/36 C22B 7/00. Способ переработки отходов твёрдых сплавов / Алкацев М.И., Гуриев В.Р.; заявитель и патентообладатель Северо-Кавказский государственный технологический университет. № 2001105132; заявл. 21.02.2001; опубл. 2002.
12. Утилизация отходов твёрдого сплава методом электроэрозионного диспергирования / Агеев Е.В., Семенихин Б.А. // XV Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Современные техника и технологии», Томск, 4–8 мая 2009 г. Томск, 2009.
13. 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 твёрдых сплавов карбид вольфрама кобальт и экстракции вольфрама из вольфрамовых концентратов] // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2007. Vol. 41. No 4. P. 436–441.
14. Экологически безопасные и ресурсосберегающие способы переработки отходов твёрдых сплавов WC-Co и экстракции вольфрама из вольфрамовых концентратов / 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.
15. Колобов Г.А., Панов В.С. Новые технологии переработки отходов вольфрама и твёрдых сплавов // Металлургия (Металургия). 2013. №1. С. 65–73.
16. 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 [Способ переработки карбида вольфрама из отработанного цементированного карбида с использованием расплава цинка под давлением]. Patent KR, no. 20120028490, 2012.
17. Xiahou Bin. Method for recycling tungsten carbide and metallic cobalt through waste tungsten-cobalt cemented carbide [Способ переработки карбида вольфрама и металлического кобальта через отходы цементированно-

- го карбида вольфрама-кобальта]. Patent CN, no. 106145114, 2016.
18. Пат. 2341571 Российская Федерация, МПК C22B 7/00 C22B 9/04 C22B 34/30. Аппарат для переработки отходов твёрдых сплавов цинковым способом / Троценко И.Г., Свистунов Н.В. заявитель и патентообладатель Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет). № 2007123812; заявл. 25.06.2007; опубл. 2008.
 19. Пивоваров М.Н., Власова А.В. Новый метод переработки кусковых отходов твердых сплавов // Новая технология. 2003. № 1. С. 89–91.
 20. Панов В.С., Чувилин А.М., Фальковский В.А. Технология и свойства спечённых твёрдых сплавов и изделий из них. М.: МИСиС, 2004. 463 с.
 21. Пат. 2643291 Российская Федерация, МПК C22B 7/00 C22B 34/36. Способ переработки кусковых отходов твердых сплавов / Троценко И.Г., Герасименко Н.П.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)». № 2017112581; заявл. 12.04.2017; опубл. 2017.
 22. Пат. 2581690 Российская Федерация, МПК C22B 7/00 C22B 9/04 C22B 34/30. Реактор деструкции отходов твёрдых сплавов газообразным цинком / Троценко И.Г.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)». № 2014150159; заявл. 10.12.2014; опубл. 2016.
 23. Химический энциклопедический словарь / гл. ред. И.Л. Кнунянц. М.: Советская Энциклопедия. 1983. 792 с.
 24. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии. В 2 кн. Кн.1 / Айнштейн В.Г., Захаров М.К., Носов Г.А. и др. М.: Химия, 1999. 888 с.

Поступила 30.09.2019; принята к публикации 20.01.2020; опубликована 25.03.2020

Троценко Игорь Герасимович – канд. техн. наук, доцент

Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет),
Владикавказ, Россия. E-mail: itrocenko@mail.ru

Герасименко Татьяна Евгеньевна – канд. техн. наук, доцент, начальник отдела интеллектуальной собственности

Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет),
Владикавказ, Россия. E-mail: gerasimenko_74@mail.ru

Алкацев Владимир Михайлович – канд. техн. наук, доцент

Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет),
СКГМИ (ГТУ), Владикавказ, Россия. E-mail: avm@mail.ru

Евдокимов Сергей Иванович – канд. техн. наук, доцент

Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет),
Владикавказ, Россия. E-mail: eva-ser@mail.ru

References

1. V.M. Burtsev, A.S. Vasiliev, O.M. Deev et al. *Tekhnologiya mashinostroeniya. V 2-kh t. T.2. Proizvodstvo mashin* [Engineering technology. In 2 volumes. Vol.2. Machine building]. Moscow: MG TU im. N.E. Bauman, 2001, 640 p. (In Russ.)
2. State report “On the Status and Use of Mineral Resources of the Russian Federation in 2016 and 2017”, Moscow, 2018. (In Russ.)
3. Kozin L.F., Trefilov V.I. Rare metal industry of Ukraine. Problems and prospects. Preprint. NAN Ukrainy, IPM NANU, IONKh NANU, Kiev, 1997. 74 p. (In Russ.)
4. Bord N.Yu., Korolevich S.V., Khonyak K.V. New recycling technology for solid and heavy waste alloys. *Instrument [Tool]*, 1997, no. 6, p. 10. (In Russ.)
5. Zelikman A.N., Kasparova T.V., Binder S.I. Preparation of carbides from regenerated WC-Co mixtures obtained from lumpy waste by zinc method. *Tsvetnye Metally* [Non-ferrous metals], 1993, no. 1, pp. 47–49. (In Russ.)
6. Zharkov D.V., Zykus M.Yu., Medvedev A.S., Fisenkov M.V. *Sposob pererabotki kuskovykh otkhodov tvordykh splavov* [A method for processing lumpy carbide waste]. Patent RF, no. 2101375, 1998.
7. Paul G. Barnard, Heine Kenworthy. Reclamation of refractory carbides from carbide materials. Patent US, no. 3595484, 1971.
8. X. Liu, S. Xu, K. Wang. Recycling of WC-Co alloys. *Non-Ferrous Metals*, 2003, vol. 55, no 3, pp. 59–61.
9. Dvornik M.I., Ershova T.B. *Sposob pererabotki otkhodov tvordogo splava VK8 elektroerozionnym dispergировaniem* [A method for processing the waste VK8 carbide by electroerosion dispersion]. Patent RF, no. 2443507, 2012.
10. Trotsenko I.G., Svistunov N.V. *Sposob pererabotki kuskovykh otkhodov tvordykh splavov* [A method for processing lumpy carbide waste]. Patent RF, no. 2276193, 2006.
11. Alkatsev M.I., Guriev V.R. *Sposob pererabotki kuskovykh otkhodov tvordykh splavov* [A method for processing lumpy carbide waste]. Patent RF, no. 2189402, 2002.

12. Ageev E.V., Semenikhin B.A. Utilization of carbide waste by electroerosion dispersion. *XV Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya studentov, aspirantov i molodykh uchenykh "Sovremennye tekhnika i tekhnologii"* [15th International Conference of Students and Young Researchers "Advanced Machinery and Technology"], Tomsk, 4-8 May 2009. Tomsk, 2009. (In Russ.)
13. 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.
14. Malyshev V.V., Soloviev V.V., Lukashenko T.F. et al. Environmentally friendly and resource-saving methods for recycling waste tungsten carbide-cobalt alloys and extraction of tungsten from tungsten concentrates. *Vestnik KrNU im. M. Ostrogradskogo* [Bulletin of Ostrogradskiy Kremenchug National University], vol. 4, 2011 (69), P.1, pp. 155–159.
15. Kolobov G.A., Panov V.S. New technologies for the processing of tungsten and carbide wastes. *Zaporozhskaya gosudarstvennaya inzhenernaya akademiya. Metallurgiya* [Zaporizhia State Engineering Academy. Metallurgy], 2013, no. 1, pp. 65–73. (In Ukr.)
16. 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.
17. Xiahou Bin. Method for recycling tungsten carbide and metallic cobalt through waste tungsten-cobalt cemented carbide. Patent CN, no. 106145114, 2016.
18. Trotsenko I.G., Svistunov N.V. *Apparat dlya pererabotki otkhodov tverdykh splavov tsinkovym sposobom* [A device for processing carbide waste by zinc method]. Patent RF, no. 2341571, 2008.
19. Pivovarov M.N., Vlasova A.V. A new method for processing lumpy carbide waste. *Novaya tekhnologiya* [New technology], 2003, no. 1, pp. 89–91. (In Russ.)
20. Panov V.S., Chuvilin A.M., Falkovskiy V.A. *Tekhnologiya i svoystva spechennykh tverdykh splavov i izdeliy iz nikh* [Technology and properties of sintered hard alloys and products made with them]. Moscow: MISiS, 2004, 463 p. (In Russ.)
21. Trotsenko I. G., Gerasimenko N.P. *Sposob pererabotki kuskovykh otkhodov tverdykh splavov* [A method for processing lumpy carbide waste]. Patent RF, no. 2643291, 2018.
22. Trotsenko I.G. *Reaktor destrukttsii otkhodov tverdykh splavov gazoobraznym tsinkom* [A reactor for carbide waste decomposition with gaseous zinc]. Patent RF, no. 2581690, 2016.
23. *Khimicheskii entsiklopedicheskiy slovar* [Chemical Encyclopedic Dictionary]. Editor-in-chief: I.L. Knunyants. Moscow: Soviet Encyclopedia, 1983, 792 p. (In Russ.)
24. Aynshteyn V.G., Zakharov M.K., Nosov G.A. et al. *Obshchiy kurs protsessov i apparatov khimicheskoy tekhnologii* [General course in chemical processes and equipment]. In 2 volumes. Vol. 1. Moscow: Khimiya, 1999, 888 p. (In Russ.)

Submitted 30/09/2019; revised 20/01/2020; published 25/03/2020

Igor G. Trotsenko – PhD (Eng.), Associate Professor

North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technical University), Vladikavkaz, Russia. E-mail: itro-
cenko@mail.ru

Tatiana E. Gerasimenko – PhD (Eng.), Associate Professor, Head of the Intellectual Property Office

North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technical University), Vladikavkaz, Russia.
E-mail: gerasimenko_74@mail.ru

Vladimir M. Alkatsev – PhD (Eng.), Associate Professor

North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technical University), Vladikavkaz, Russia.
E-mail: avm@mail.ru

Sergey I. Evdokimov – PhD (Eng.), Associate Professor

North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technical University), Vladikavkaz, Russia.
E-mail: eva-ser@mail.ru

НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

NANOMATERIALS AND NANOTECHNOLOGIES

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

УДК 62-533.65

DOI: 10.18503/1995-2732-2020-18-1-40-48



ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ НАНОМОДИФИЦИРОВАННОГО КОМПОЗИТА НА ОСНОВЕ СИЛИКОНА С БИНАРНЫЙ НАПОЛНИТЕЛЕМ УНТ-ГРАФИТ

Щегольников А.В., Ягубов В.С.

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия

Аннотация. Исследования в области создания функциональных наноматериалов являются актуальными и перспективными для развития технологий, где используется преобразование электрической энергии в тепловую. В работе приведены исследования температурных режимов образцов саморегулируемых электронагревателей. Представлена методика изготовления силикона, модифицированного углеродными нанотрубками и графитом, а также технология фиксации электродов, предназначенных для подключения образцов саморегулируемых электронагревателей. Проведено исследование распределения температурного поля на поверхности электронагревателей, выполненных в виде плоских пластин с размерами $50 \times 50 \times 2$ и $60 \times 40 \times 2$ мм. Исследована динамика постоянного электрического тока, протекающего в электронагревателе, в зависимости от температуры окружающей среды. Установлено, что рабочее напряжение для устройств электронагрева зависит от концентрации углеродных наноструктур и графита. Подобраны концентрации наполнителей, содержащих углеродные наноструктуры, для нагревателей, работающих под напряжением 12 и 24 В постоянного тока. Программная обработка термограмм позволила с помощью гистограмм распределения температур проанализировать температурные режимы для нагревателей с различной концентрацией углеродных наноструктур. Представлены температурные зависимости мощности образцов электронагревателей, работающих под напряжением 12 и 24 В постоянного электрического тока. Для нагревателя, работающего под напряжением 24 В постоянного тока, мощность тепловыделений составила 3 Вт, при этом максимальная температура нагрева доходила до 70°C . Мощность образца нагревателя, работающего под напряжением постоянного тока 12 В, составляла 8,3 Вт. Температурная зависимость мощности образца электронагревателя свидетельствует о нелинейном характере зависимости сопротивления материала нагревателя от температуры и характеризует его как материал с саморегулированием температуры.

Ключевые слова: силикон, углеродные нанотрубки, нагреватель, саморегулирование, температура.

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям в рамках научного проекта по договору №13748ГУ/2018.

© Щегольников А.В., Ягубов В.С., 2020

Для цитирования

Щегольников А.В., Ягубов В.С. Тепловыделения наномодифицированного композита на основе силикона с бинарным наполнителем унт-графит // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т.18. №1. С. 40–48. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-1-40-48>



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

HEAT GENERATED BY A NANOMODIFIED COMPOSITE MADE WITH SILICONE AND A CNT/GRAPHITE FILLER

Alexander V. Shchegolkov, Viktor S. Yagubov

Tambov State Technical University, Tambov, Russia

Abstract. Research in the field of functional nanomaterials is of relevance for the future development of technologies that are based on electrical-into-thermal energy conversion. This paper describes a study that looked at the temperature regimes of pilot self-regulating electric heaters. The paper describes a technique for the manufacture of silicone modified with carbon nanotubes and graphite, as well as a method for mounting electrodes designed to connect pilot self-regulating electric heaters. A study was conducted to understand the distribution of the temperature field on the surface of electric heaters designed as flat plates with the following dimensions: 50×50×2 mm and 60×40×2 mm. The dynamics of the direct electric current flowing in the electric heater was studied in relation to the ambient temperature. It has been established that the operating voltage for electric heaters depends on the concentration of carbon nanostructures and graphite. Concentrations of fillers containing carbon nanostructures were established that would be optimum for 12 and 24 V DC heaters. Through thermogram analysis done with a special software programme, temperature distribution charts were built, and the temperature regimes were analyzed for heaters with different concentrations of carbon nanostructures. Temperature dependences of power are described for the pilot 12 and 24 V DC heaters. For the 24 V DC heater, the heat dissipation power was 3 W, while the maximum heating temperature would reach 70°C. The power of the 12 V DC pilot heater was 8.3 W. The temperature dependence of the heater power indicates a nonlinear dependence between the temperature and the material resistance and characterizes it as a self-regulating material.

Keywords: silicone, carbon nanotubes, heater, self-regulation, temperature.

This research was funded by the Innovation Promotion Foundation under the research project contract No.13748GU/2018.

For citation

Shchegolkov A.V., Yagubov V.S. Heat Generated by a Nanomodified Composite Made with Silicone and a CNT/Graphite Filler. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2020, vol. 18, no. 1, pp. 40–48. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-1-40-48>

Введение

Электронагреватели нашли широкое применение как в бытовых электроприборах – тепло-вентиляторах, электроконвекторах, так и в качестве антиобледенительных систем [1] и подогревателей нефти [2]. В основе тепловыделений при протекании электрического тока через материал электронагревателя лежит закон Джоуля-Ленца [3]. Металлические сплавы [4] являются материалами, которые могут быть эффективными при преобразовании электрической энергии в тепловую. Однако нагреватели на основе металлов имеют ряд недостатков, которые проявляются в том, что им свойственны большая масса, ненадежность при эксплуатации [5], а также необходимость использования средств автоматизированного управления. Долгое время, занимаясь поиском новых материалов, отличных от металлов, ученые выяснили, что функциональными свойствами саморегулирования обладают керамические композиты [6–10]. Однако при наличии эффекта саморегулирования такие нагреватели не в полной мере удовлетворяют всем по-

требностям при разработке систем электронагрева, что связано с их хрупкостью и дороговизной производства.

Основой нового типа нагревателей послужили углеродные материалы, такие как сажа, углеродные нанотрубки (УНТ), графит, графен или их гибриды, которые использовались в качестве наполнителей в нанокompозите для улучшения электропроводности, теплопроводности и механической прочности при одновременном снижении массы готового изделия [11]. Для создания электронагревателей наиболее востребованным электропроводящим наполнителем оказалась углеродная сажа (УС). Однако для достижения порога перколяции в композите необходимо использовать большее количество УС по сравнению с другими углеродными материалами. Порог перколяции достигается при определенном уровне наполнении композита УС, а именно в тот момент, когда между частицами УС образуется контакт [12]. Поэтому, в целях экономии, были предложены УНТ, которые легче УС и

размеры частиц УНТ меньше размеров частиц УС [13–14]. Кроме того, УНТ имеют большую удельную поверхность, что вызывает сильное взаимодействие между УНТ и полимером. Следствием этого является улучшение целого ряда параметров, таких как электропроводность, теплопроводность и механическая прочность нанокompозита по сравнению с композитом, в качестве наполнителя для которого используется УС [15,16]. Однако высокая стоимость УНТ ограничивает их применение в нагревателях. Использование графитовых чешуек в полимерной матрице затруднено из-за слабого взаимодействия с полимером, из-за отсутствия реакционной функциональной группы в базисной плоскости [17]. Как следствие, композиты, наполненные графитом, имеют слабую механическую прочность. Чтобы улучшить пропитку графита в полимерной матрице, необходимо модифицировать графит или использовать терморасширенный графит, восстановленный оксид графита или интеркалированное соединение графита [18,19]. Однако модифицированный графит может обладать низким уровнем электропроводности из-за его дефектной структуры. Решение вопросов, связанных с недостатками углеродных материалов, возможно путем применения их совмещения или создания гибридов: графит-УНТ и восстановленного оксида графита-УНТ [20,21]. В работе [21] электрические и термические свойства нагревателя были улучшены путем добавления небольшого количества УНТ в матрицу полимера, содержащего графит. С другой стороны – важное значение имеет тип полимерной матрицы, так как морфология и природа полимера лимитируют температурные режимы, и формирует максимальное и минимальное значение вводимых концентраций электропроводящей составляющей композита [22–28].

Не для всех типов нагревателей, созданных с применением углеродных наноструктур, свойственен эффект саморегулирования температуры, и в этом отношении с технической точки зрения перспективы имеют нагреватели, изготовленные из материала, который обладает положительным температурным коэффициентом сопротивления (ПТКС).

В связи с этим целью данной работы является разработка наномодифицированного полимера, который может быть использован для изготовле-

ния образцов электронагревателей, обладающих эффектом саморегулирования температуры.

Задачами данной работы являются:

- Модифицировать силиконы с помощью углеродных наноструктур и графита.
- Изготовить лабораторные образцы электронагревателей на основе наномодифицированных силиконов.
- Провести испытания образцов электронагревателей, подключенных к источнику постоянного электрического тока при отрицательных температурах.
- Исследовать распределение температурных полей на поверхности плоских образцов электронагревателей.

Материалы и методы исследования

В качестве полимерной матрицы для нагревателей использовали силиконовый компаунд «Силагерм 8030» (ООО «ЭЛЕМЕНТ 14», Москва, Россия). Компаунды состояли из компонентов А и Б, для смешения которых использовали соотношение 1/1. В качестве электропроводящей дисперсной фазы использовали МУНТ марки «Таунит» (ООО «НаноТехЦентр», Тамбов, Россия) (УНТ) и чешуйчатый графит (ЧГ) (РОСГРАФИТ, Свердловская область, Россия). Для взвешивания компонентов композита использовали аналитические весы «ОНАUS Pioneer PA» (Чанджоу, Китай) с точностью 0,00001 г. Приготовление наномодифицированных композитов производили по схеме, представленной на **рис. 1**.

Сыпучие углеродные материалы диспергировали в компоненте А. Для этого в емкость объемом 100 мл вливали расчетное количество компоненты А и вносили: УНТ и ЧГ. После чего производили смешивание в течение 20 мин при частоте вращения смесителя 1000 об/мин. Далее смесь перемешивали с помощью фторопластового гомогенизатора. Затем гомогенизированную смесь модификаторов с компонентом А смешивали с компонентом Б в течение 5 мин с частотой вращения перемешивающего устройства 5 мин. Итоговая стадия заключалась в том, что смеси композит помещали в вакуумный шкаф «ВТШ-К52-250» (Фрязино, Россия) на 10 мин под разряжение 0,1 МПа. Это позволяло убрать воздушные включения из композита, образовавшиеся во время смешивания. Вакуумированный композит формовали между двумя токоподводящими электродами по схеме, представленной на **рис. 2**.

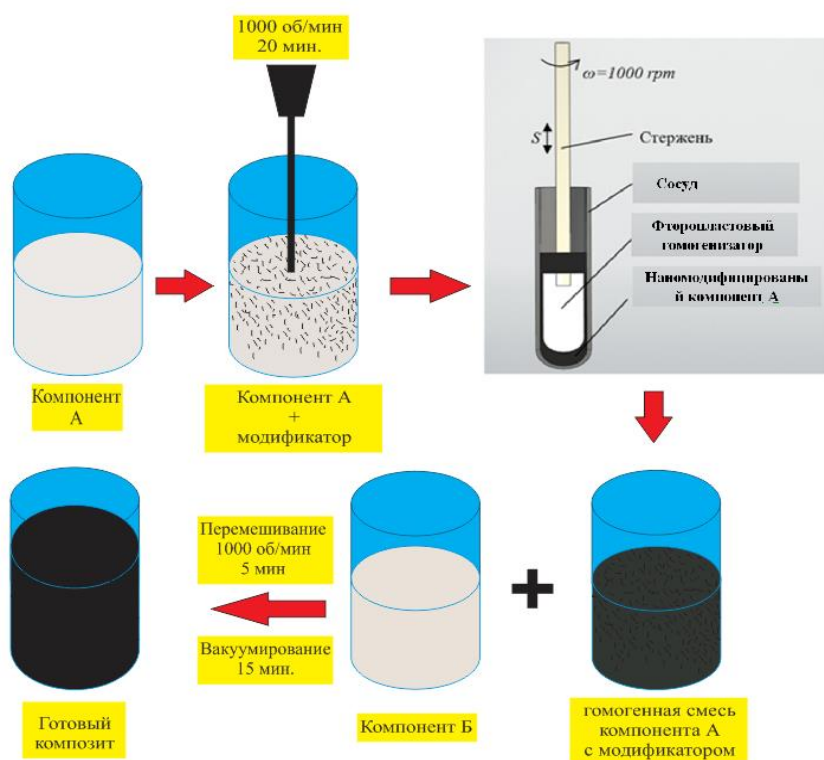


Рис. 1. Схема изготовления композита для образцов электронагревателей

Fig. 1. Composite for pilot electric heaters: Production process flow chart

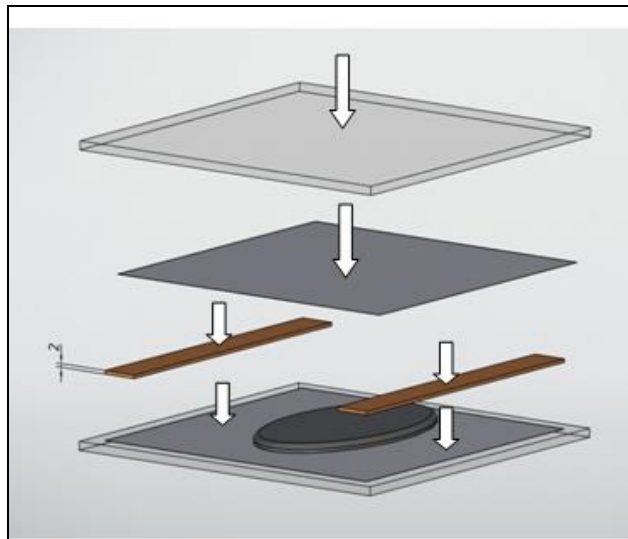


Рис. 2. Формовка наномодифицированного композита между двумя токоподводящими электродами

Fig. 2. Nanomodified composite built between two conducting electrodes

Формовка композита и электродов заключалась в том, что на нижнее стекло с размерами $200 \times 200 \times 5$ мм укладывали алюминиевую фольгу толщиной 100 мкм (ООО «Уральская

фольга», Михайловск, Россия), на которую наносили наномодифицированный композит (функциональную основу нагревателя). Толщина наномодифицированного композита обеспечивалась с помощью ограничителей в виде стеклянных пластин толщиной 2 мм. После этого композит накрывали вторым листом алюминиевой фольги. На второй лист алюминиевой фольги устанавливали идентичное первому второе стекло, на котором размещали груз массой 50 кг. Представленная технология позволяет изготавливать лабораторные образцы электронагревателей с максимальной площадью 180×180 мм.

Применение плоских стекол в качестве формообразующих поверхностей позволило изготавливать образцы нагревателей с равномерной толщиной, что являлось одним из очень важных параметров, влияющих на равномерность разогрева образцов электронагревателей.

С помощью эксперимента были подобраны концентрации модификаторов для получения лабораторных образцов электронагревателей под питающее напряжение 12–24 В постоянного электрического тока. Состав композитов представлен в **таблице**.

Поворот зерен после первого и второго отжигов

Grain rotation after the 1st and 2nd heat treatment cycles

№ п/п	Величина питающего напряжения постоянного, В	Массовое содержание модификатора
1	12	15 масс. % УНТ + 14 масс.% ЧГ
2	24	14,5 масс. % УНТ + 11 масс.% ЧГ

Для безопасности исследований все образцы электронагревателей были изолированы с помощью клейкой пленки 1 (рис. 3) «ORACAL 640» («ООО ПЛАСТТОРГ», Тамбов, Россия). Для подвода электрического напряжения к исследуемым пластинам припаивали медные электропровода 2 (см. рис. 3) с поперечным сечением 1,5 мм с помощью припоя «ПОС-60».

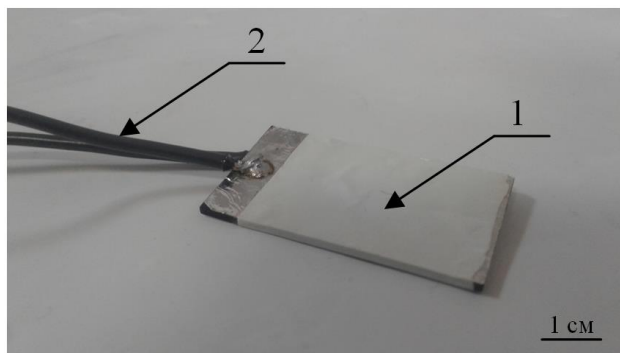


Рис. 3. Образец лабораторного электронагревателя с токоподводящими электродами

Fig. 3. A pilot laboratory electric heater with conducting electrodes

Методика подключения образцов электронагревателей к электрическому току

Для исследования нагревателей разработан автоматизированный измерительный стенд, который позволял производить исследования как на постоянном, так и на переменном электрическом токе.

В качестве регулируемого источника переменного тока использовали лабораторный автотрансформатор «Ресанта ЛАТР TDGC2-3» (Москва, Россия) с выходным напряжением от 0 до 220 В и шагом регулирования 1 В. Для измерения тока и напряжения использовали мультиметры «UNI-T UT61E» (Дунгуань, Китай) и «WH5000» (Чжанчжоу, Китай) с USB и COM интерфейсами. Это позволило в режиме реального времени производить запись замеров электрофизических параметров образцов элек-

тронагревателей на ПК на базе процессора «Intel Xeon E5450» с 12 МБ кэш-памяти и тактовой частотой 3,00 ГГц. Частота системной шины 1333 МГц. Для температурных измерений использован прибор «2ТРМ1» (ОВЕН, Москва, Россия) с двумя термопарами «ХК».

Для исследования электрофизических параметров образцов нагревателей под постоянным напряжением использовали диодный мост «GBL04-E3/51» («Vishay», США) с максимальным постоянным обратным напряжением 400 В и максимальным прямым (выпрямленный за полупериод) током 4 А.

Внешний вид измерительного стенда в работе представлен на рис. 4.



Рис. 4. Измерительный стенд

Fig. 4. Measuring bench

Методика исследования электрофизических характеристик образцов нагревателей при отрицательных температурах

Для исследования электрофизических характеристик образцов нагревателей при отрицательных температурах предназначена установка, показанная на рис. 5. Установка содержит охлаждаемую камеру 1. Получение низких температур основывалось на теплообменной системе с жидким азотом (N₂), генерированным в ожижители азота Elan2 («ООО Криотрейд инжиниринг», Москва, Россия). Жидкий азот заливали в емкость 2, изготовленную из меди. Емкость 2 имела тепловой контакт с емкостью 1, для улучшения теплопроводности использовали теплопроводящую пасту «КПТ-8» (Рязань, Россия) с теплопроводностью 0,65 Вт/м×°С. В целях снижения интенсивности испарения N₂ в окружающую среду емкость 2 закрывали крышкой 3, изготовленной из теплоизоляционного материала. С целью устранения контакта с окружающей средой камеру 1 и емкость 2 упаковывали в теплоизоляционный материал 4 – пенопласт. Корпус установки 5 изготавливали из оцинкованного металла толщиной 1,5 мм посредством клеп-

ки. Внутри камеры устанавливали температурный датчик 6, который связан с цифровым термометром, установленным на лицевой панели установки. Испытуемый образец нагревателя 8 располагали на подставке 7, установленной внутри камеры 1.

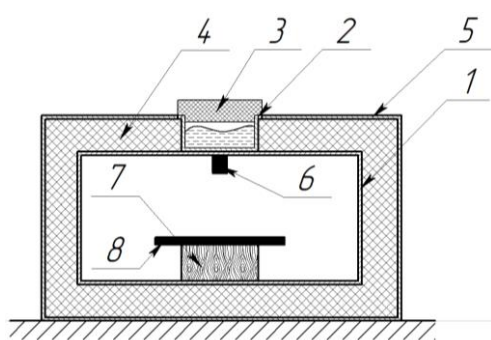
Для исследования распределения температурного поля использовали бесконтактный метод измерения, который реализован в тепловизоре «Testo 875-1» (Шварцвальд, Германия). Получаемые термограммы обрабатывали в программном обеспечении (ПО) «IR Soft 3.4». Построение графиков экспериментальных данных и их обработку производили с помощью ПО «OriginPro 2018».

Результаты и их обсуждения

Проведенные исследования позволили уста-

новить тепловую мощность образца нагревателя, работающего под напряжением постоянного тока 12 В, которая составляла 8,3 Вт. Из анализа термограммы поверхности образца нагревателя (рис. 6,а) минимальная температура нагрева составляла 87,1°C, максимальная 102°C. Среднее значение температуры 97,5°C. Согласно гистограмме распределения температур по площади, соответствующей выделенной области нагревателя (рис. 6,б), 6% площади занимают участки с температурой 98°C. Время нагрева образца нагревателя до средней температуры 102,5°C составляла 0,3 мин.

Образец нагревателя, работающий под напряжением 24 В постоянного тока, имел мощность 3 Вт, при этом максимальная температура нагрева составляла 70°C, что подтверждено термограммой на рис. 7.



а



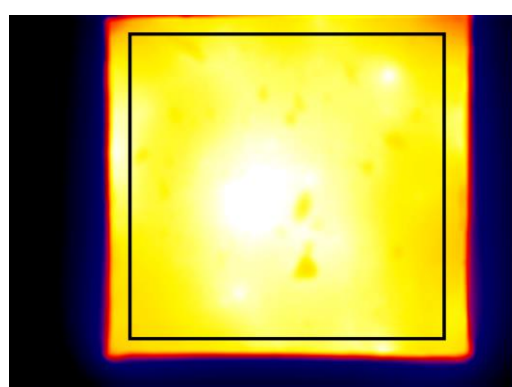
б

Рис. 5. Установка для испытания электронагревателей при отрицательных температурах:

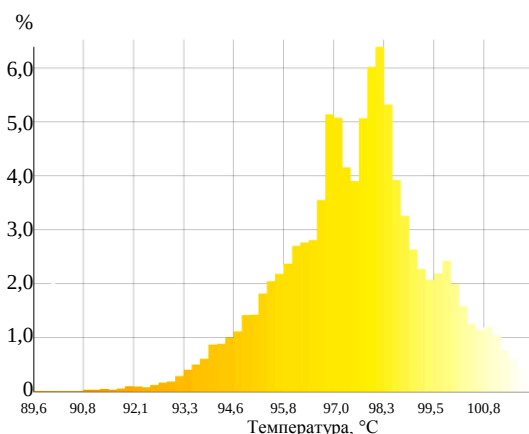
а – схема установки; б – общий вид установки

Fig. 5. A bench for testing electric heaters at subzero temperatures:

a – Sketch of the bench; b – General view of the bench



а



б

Рис. 6. Термограмма саморегулируемого нагревателя работающего под напряжением 12 В постоянного электрического тока: а – тепловизионная съемка образца нагревателя, б – гистограмма распределения температуры по площади

Fig. 6. Thermogram of the self-regulating 12 V DC heater:

a – Thermal imaging of the pilot heater, b – Temperature distribution chart

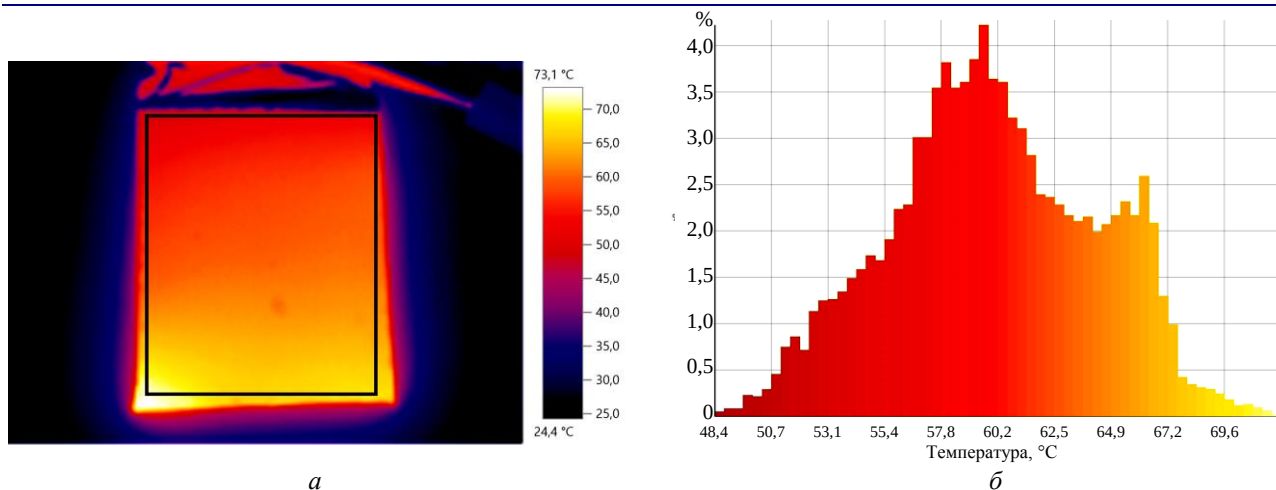


Рис. 7. Термограмма саморегулируемого нагревателя, работающего под напряжением 24 В постоянного электрического тока

Fig. 7. Thermogram of the self-regulating 24 V DC heater

Согласно анализу температуры на поверхности образца нагревателя, работающего под напряжением 24 В постоянного электрического тока (рис. 7,а), максимальная температура составляла 71,6°C, минимальная 49,6°C. Среднее значение температуры – 60,2°C. Скорость нагрева образца составляла 0,25 мин.

Из анализа гистограммы распределения температур по площади, соответствующей выделенной области нагревателя (рис. 7,б), 4,2% площади занимают участки с температурой 60,2°C. Результаты исследований образцов нагревателей при отрицательных температурах показывают, что с понижением температуры увеличивается значение мощности нагревателя, работающего под напряжением 12В постоянного электрического тока (рис. 8).

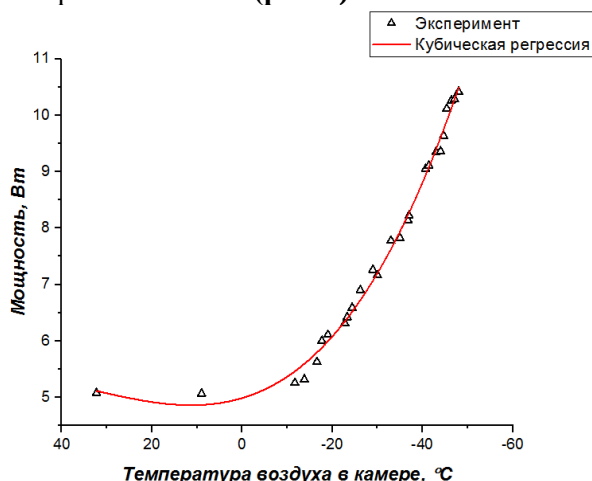


Рис.8. Температурная зависимость мощности образца электронагревателя, работающего под напряжением 12В постоянного электрического тока

Fig. 8. Temperature dependence of power in the pilot 12 V DC heater

При охлаждении образца нагревателя с 32 до минус 50°C его мощность менялась с 5 до 10,5 Вт. Данное изменение аппроксимировали кубической регрессионной моделью.

$$y = A + Bx + Cx^2 + Dx^3. \quad (1)$$

В результате обработки экспериментальных данных были определены коэффициенты A, B, C и D, значения которых подставляли в уравнение (1), тем самым получая зависимость изменения мощности нагревателя (P) от температуры (t) окружающей среды.

$$P(t) = 4,98 - 2 \times 10^{-2}t + 1,28 \times 10^{-3}t^2 - 1,28 \times 10^{-5}t^3. \quad (2)$$

Коэффициенты корреляции (R) и детерминации (R^2) равны 0,997 и 0,994 соответственно. Средняя ошибка аппроксимации ($\bar{A}$) составляет 1,68%.

Схожий рост мощности демонстрировал образец нагревателя, работающий под напряжением 24В постоянного электрического тока. При охлаждении образца нагревателя с 20 до минус 50°C его мощность возрастала с 1,5 до 8,5 Вт

Зависимость мощности нагревателя от температуры окружающей среды описывает уравнение с $R = 0,997$ и $R^2 = 0,995$ соответственно. $\bar{A} = 3,06\%$.

$$P(t) = 1,8 - 3,01 \times 10^{-2}t + 1,38 \times 10^{-3}t^2 - 1,38 \times 10^{-5}t^3 \quad (3)$$

Используя аппроксимационные зависимости (2) и (3), можно спрогнозировать значение мощности электронагревателя в температурном диапазоне от 20 до минус 50°C.

Температурная зависимость мощности образца электронагревателя свидетельствует о

нелинейном характере зависимости сопротивления материала нагревателя от температуры и характеризует его как материал с саморегулированием температуры (рис. 9).

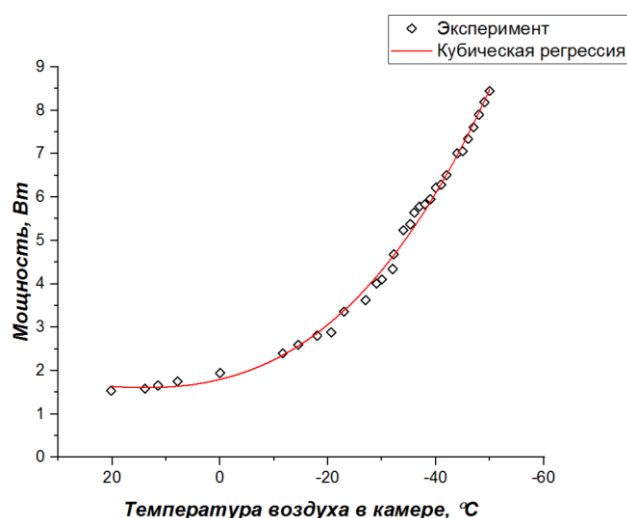


Рис. 9. Температурная зависимость мощности образца электронагревателя, работающего под напряжением 24 В постоянного электрического тока, при его охлаждении в камере

Fig. 9. Temperature dependence of power in the pilot 24 V DC heater during chamber cooling

Заключение

Проведенные исследования показали, что рабочее напряжение для электронагревателей зависит от концентрации углеродных наноструктур и графита. В ходе работы подобрано оптимальное массовое содержание углеродных наноструктур и графита в силиконе для нагревателей, работающих под напряжением 12, 24 В постоянного электрического тока. Это композиты, со-

держащие 15 масс. % углеродных наноструктур + 14 масс.% чистого графита и 14,5 масс. % углеродных наноструктур + 11 масс.% чистого графита соответственно. Согласно гистограмме распределения температур по площади, соответствующей выделенной области нагревателя, 4,2% площади занимают участки с температурой 60,2°C. Образец нагревателя, работающий под напряжением 24 В постоянного тока, имел размеры 60×40×2 мм. Мощность данных нагревателей составляла 3 Вт, при этом максимальная температура нагрева составляла 70°C. Мощность образца нагревателя работающего под напряжением постоянного тока 12 В составляла 8,3 Вт. Размер образца нагревателя составлял 50×50×2 мм. При этом в выделенной области термограммы образца нагревателя минимальная температура нагрева составляла 87,1°C, максимальная 102°C. Среднее значение температуры составляло 97,5°C. Согласно гистограмме распределения температур по площади, соответствующей выделенной области нагревателя, 6% площади занимают участки с температурой 98°C. Время нагрева образца нагревателя до средней температуры 102,5°C составляла 0,3 мин. При охлаждении образца нагревателя с 32 до минус 50°C его мощность менялась с 5 до 10 Вт.

Исследован рост мощности нагревателя при снижении температуры (при охлаждении образца нагревателя с 20 до минус 50°C его мощность возрастала 1,5 до 8,5 Вт), что является следствием эффекта саморегулирования при напряжениях 12 и 24 В постоянного электрического тока.

Список литературы

References

1. X. Yao, S.C. Hawkins, B.G. Falzon. Carbon. 136, 130 (2018). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.04.039>.
2. Z. Wang, D. Gao, B. Diao, L. Tan, W. Zhang and K. Liu. Appl. Therm. Eng. 160, 114105 (2019). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114105>.
3. J. Kang, H. Kim, K.S. Kim, S.K. Lee, S. Bae, J.H. Ahn, Y.J. Kim, J.B. Choi, B.H. Hong. Nano Lett. 11 (12) 5154 (2011). DOI: <https://doi.org/10.1021/nl202311v>.
4. K.T.L. Trinh, W. Wu, N.Y. Lee. Sensor. Actuat. B-Chem. 190, 177 (2014). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2013.08.056>.
5. T.K. Hei, J.D. Raal. AIChE J. 55 (1) 206 (2009). DOI: <https://doi.org/10.1002/aic.11685>.
6. M. Nakahara, T. Murakami. J. Appl. Phys. 45 (9), 3795 (1974). DOI: 10.1063/1.1663862.
7. D. Mächler, R. Schmidt, J. Töpfer. J. Alloy. Compd. 762, 209 (2018). DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.05.049.
8. S. Chatterjee, B.D. Stojanovic, H.S. Maiti. Mater. Chem. Phys. 78 702 (2003). DOI: [https://doi.org/10.1016/S0254-0584\(02\)00381-4](https://doi.org/10.1016/S0254-0584(02)00381-4).

9. V. Paunović, V. Mitić, V. Pavlović, M. Miljković, L. Živković. *Process. Appl. Ceram.* 4 253 (2010).
10. M.M. Vijatović Petrović, J.D. Bobić, R. Grigalaitis, B.D. Stojanović, J. Banys. *Acta Phys. Pol. A.* 124 155 (2013). DOI: 10.12693/APhysPolA.124.155.
11. J.R. Potts, D.R. Dreyer, C.W. Bielawski, R.S. Ruoff. *Polymer.* 52 (1) 5 (2011). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2010.11.042>.
12. F. El-Tantawy, K. Kamada, H. Ohnabe. *Mater. Lett.* 56 (1–2) 112 (2002). DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-577X\(02\)00401-9](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(02)00401-9)
13. A. Celzard, E. McRae, C. Deleuze, M. Dufort, G. Furdin, J.F. Mareche. *Phys. Rev. B* 53 (10) 6209 (1996). DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.53.6209>
14. S.H. Munson-McGee. *Phys. Rev. B* 43 (4) 3331 (1991). DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.43.3331>
15. S. Isaji, Y. Bin, M. Masaru. *Polymers.* 50 (4) 1046 (2009). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2008.12.033>.
16. S. Ghosh, S. Dutta, E. Gomes, D. Carroll, R. D'Agostino, J. Olson, M. Guthold, W.H. Gmeiner. *ACS Nano.* 3 (9) 2667 (2009). DOI: <https://doi.org/10.1021/nn900368b>.
17. R. Sengupta, M. Bhattacharya, S. Bandyopadhyay, A.K. Bhowmick. *Prog. Polym. Sci.* 36 (5) 638 (2011). DOI: <https://doi.org/10.1021/nn900368b>.
18. A. Yoshida, Y. Hishiyama, M. Inagaki. *Carbon.* 29 (8) 1227 (1991). DOI: [https://doi.org/10.1016/0008-6223\(91\)90040-P](https://doi.org/10.1016/0008-6223(91)90040-P).
19. G.C. Chung, H.J. Kim, S.I. Yu, S.H. Jun, J.W. Choi, M.H. Kim, J. Electrochem. Soc. 147 (12) 4391 (2000). DOI: 10.1149/1.1394076.
20. A.S. Patole, S.P. Patole, S.Y. Jung, J.B. Yoo, J.H. An, T.H. Kim. *Eur. Polym. J.* 48 (2) 252 (2012). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2011.11.005>.
21. S.R. Dhakate, S. Sharma, N. Chauhan, R.K. Seth, R.B. Mathur. *Int. J. Hydrogen Energy* 35 (9) 4195 (2010). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.02.072>.
22. S.P. Bao, G.D. Liang, S.C. Tjong. *IEEE Trans Nanotechnol.* 8 (6) 729 (2009). DOI: 10.1109/TNANO.2009.2023650.
23. J.H. Lee, S.K. Kim, N.H. Kim. *Scripta Mater.* 55 (12) 1119 (2006). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2006.08.051>.
24. Sabet M., Soleimani H. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 64 012001 (2014). DOI: 10.1088/1757-899X/64/1/012001.
25. L. Yang, S. Lia, X. Zhou, J. Liu, Y. Lia, M. Yang, Q. Yuan, W. Zhang. *Synthetic Met.* 253 122 (2019). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2019.05.008>
26. B.G. Soares, L.F. Calheiros, A.A. Silva, T. Indrusiak, G.M. Barra, S. Livi. *J. Appl. Polym. Sci.* 135 (24) 45564 (2018). DOI: <https://doi.org/10.1002/app.45564>.
27. A. Gao, F. Zhao, F. Wang, G. Zhang, S. Zhao, J. Cui, Y. Yan. *Compos. Part A-Appl. S.* 122 1 (2019). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.04.019>.
28. S.K. Jain, Y. Tadesse. *Int. J. Nanosci. Ser.* 18 (05) 1850026 (2018). DOI: <https://doi.org/10.1142/S0219581X18500266>.

Поступила 13.11.2019; принята к публикации 20.01.2020; опубликована 25.03.2020
Submitted 13/11/2019; revised 20/01/2020; published 25/03/2020

Щегольков Александр Викторович – канд. техн. наук, доцент,
Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия. ORCID 0000-0002-4317-0689

Ягубов Виктор Сахибович – аспирант
Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия. E-mail: vitya-y@mail.ru.
ORCID 0000-0003-4855-0530

Alexander V. Shchegolkov – PhD, Associate Professor
Tambov State Technical University. ORCID 0000-0002-4317-0689

Viktor S. Yagubov – Graduate Student
Tambov State Technical University. E-mail: vitya-y@mail.ru. ORCID 0000-0003-4855-0530

СТАНДАРТИЗАЦИЯ, СЕРТИФИКАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ

STANDARDIZATION, CERTIFICATION AND QUALITY MANAGEMENT

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

УДК 621.77.04

DOI: 10.18503/1995-2732-2020-18-1-49-54



АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫХ К ПОДКАТУ ДЛЯ ГИБКИХ НАСОСНО-КОМПРЕССОРНЫХ ТРУБ

Полецков П.П., Алексеев Д.Ю., Кузнецова А.С., Никитенко О.А.

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

Аннотация. С течением времени потребность в таких ресурсах, как нефть, газ и газоконденсат постоянно растет, что приводит к увеличению глубины скважин, использованию более сложных их конструкций (переход от вертикальных стволов к наклонным и горизонтальным с протяженностью более 2000 м), а также увеличению доли добычи полезных ископаемых из трудноизвлекаемых запасов. Одним из наиболее перспективных способов разработки, освоения и текущего ремонта скважины является метод, основанный на применении колонны гибких безмуфтовых металлических труб, также именуемый технологией колтюбинга. С целью оценки состояния производства проката для гибких насосно-компрессорных труб был проведен анализ технических требований отечественных и зарубежных производителей. Гарантией безотказной работы гибкой трубы в жестких условиях ее эксплуатации является использование конструкционной высокопрочной низколегированной стали с высокими показателями прочности и ударной вязкости, большой наработкой на изгиб, а также повышенной стойкостью к атмосферной коррозии. Основными зарубежными производителями гибких труб являются США, Канада и Китай. На российском рынке производство гибких труб для колтюбинговых установок представлено заводом ООО «Энгельсспецтрубмаш» (г. Узловая). Отечественные и зарубежные производители предъявляют схожие требования к уровню механических свойств подката для гибких труб, достижение которых возможно за счет применения регламентированного химического состава и специальных параметров термомеханической обработки.

Ключевые слова: гибкая насосно-компрессорная труба, безмуфтовая труба, технические требования, колтюбинг, импортозамещение.

Работа выполнена в рамках государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук и докторов наук и ведущих научных школ Российской Федерации- гранта Президента РФ (Соглашение №075-15-2020-205 от 17.03.2020 г. (вн. № МК-1979.2020.8)).

© Полецков П.П., Алексеев Д.Ю., Кузнецова А.С., Никитенко О.А., 2020

Для цитирования

Анализ технических требований, предъявляемых к подкату для гибких насосно-компрессорных труб / Полецков П.П., Алексеев Д.Ю., Кузнецова А.С., Никитенко О.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т.18. №1. С. 49–54. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-1-49-54>



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

ANALYSIS OF TECHNICAL REQUIREMENTS FOR SEMI-FINISHED ROLLED PRODUCTS FOR COILED TUBING

Pavel P. Poletskov, Daniil Yu. Alekseev, Alla S. Kuznetsova, Olga A. Nikitenko

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. In the course of time, the need for such resources as oil, gas and gas condensate is constantly growing, leading to an increase in the depth of wells, the use of more complex structures (transition from vertical shafts to inclined and horizontal ones with a length of over 2000 m), as well as an increase in a share of mining from hard-to-recover reserves. One of the most promising methods for exploiting, developing and maintaining a well is a method based on the use of a string of flexible flush-joint steel tubes, also known as the coiled tubing technology. In order to assess the state of production of steel products for coiled tubing, the authors analyzed the technical requirements of Russian and foreign manufacturers. A guarantee of a trouble-free operation of coiled tubing in severe operating conditions is the use of structural high-strength low-alloy steel with high strength and impact toughness, high flex life, as well as increased resistance to atmospheric corrosion. The main foreign manufacturers of coiled tubing are the USA, Canada and China. In Russia coiled tubing is produced by ESTM plant (the city of Uzlovaya). Russian and foreign manufacturers set similar requirements for a level of mechanical properties of semi-finished rolled products for coiled tubing, which can be achieved by using a scheduled chemical composition and special parameters of thermomechanical processing.

Keywords: coiled tubing, flush-joint tubing, technical requirements, coiled tubing technology, import substitution.

The research is completed as part of a state support program for young Russian scientists – candidates and doctors of sciences and leading research schools of the Russian Federation – the grant of the President of the Russian Federation (Agreement No. 075-15-2020-205 dated 17.03.2020 г. (in. No. MK-1979.2020.8)).

For citation

Poletskov P.P., Alekseev D.Yu., Kuznetsova A.S., Nikitenko O.A. Analysis of Technical Requirements for Semi-Finished Rolled Products for Coiled Tubing. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2020, vol. 18, no. 1, pp. 49–54. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-1-49-54>

Введение

Постоянное увеличение потребления и добычи природных запасов углеводородов предопределяет необходимость применения более новой и совершенной техники и технологии бурения скважин, поскольку традиционные методы бурения с использованием сборных насосно-компрессорных труб не позволяют достичь необходимых результатов и в достаточной степени удовлетворить растущий спрос. Данное состояние вопроса усугубляется тем, что многие из основных действующих нефтегазовых месторождений сосредоточены в районе Западной Сибири и вышли на позднюю стадию разработки с падающей добычей.

Передовой прогрессивной технологией, позволяющей повысить отдачу продуктивных пластов, является бурение с использованием колонны гибких насосно-компрессорных труб (ГНКТ) или так называемая технология колтюбинга (от англ. «coiled tubing» – труба, намотанная на катушку). Колтюбинговая технология базируется на использовании длинномерных (до 8000 м) гибких безмуфтовых труб, намотанных на барабан и претерпевающих в процессе работы мно-

гократные циклы сматывания-наматывания [1]. Она может применяться как при строительстве скважины, так и при проведении различного рода технологических операций в процессе ремонтных работ. К числу основных операций с использованием колонны гибких насосно-компрессорных труб относятся [9]:

- ликвидация парафиновых и песчаных пробок;
- промывка призабойной зоны;
- бурение горизонтальных и наклонных стволов скважины;
- проведение работ по гидроразрыву пласта;
- спуск оборудования для геофизических исследований;
- работы по установке цементных мостов и изоляции пластов;
- бурение на депрессии;
- кислотная обработка ствола скважины и др.

В процессе эксплуатации гибкая труба подвергается многократной пластической деформации – изгиб при разматывании, поворот в направляющем устройстве и ввод в инъекционную головку [10]. Помимо этого трубы подвергаются растяжению под собственным весом, испытывают воздействие высокого внутреннего

давления (до 25 МПа), а также агрессивных сред. Поэтому сталь, используемая при производстве ГНКТ, должна обладать высокой прочностью и ударной вязкостью, большой наработкой на изгиб, а также достаточной коррозионной стойкостью.

Основная часть

Основными нормативными документами, регламентирующими требования к материалам ГНКТ, являются международный стандарт API Specification 5ST, введенный американским институтом нефти и газа [2], а также стандарт ASTM A606 type 4 [3]. В соответствии с ними ГНКТ производят из конструкционной высокопрочной низколегированной стали по 5 группам прочности с пределом текучести от 480 МПа. Толщина стенки трубы может составлять от 1,9 до 7,6 мм. Основными показателями, гарантирующими безотказную работу колонны ГНКТ, являются: предел текучести (σ_T); временное сопротивление разрыву (σ_B); относительное удлинение (A_{50}), а также ограничение по верхнему пределу твердости (HRC) (табл. 1).

Помимо требований по механическим свойствам в нормативных документах оговаривается массовое содержание основных легирующих элементов в стали (табл. 2).

Также сталь должна обладать четырехкратной стойкостью к атмосферной коррозии по сравнению с обычными конструкционными углеродистыми сталями. Для обеспечения данных требований она должна содержать в своем составе медь, хром, никель и кремний. Оценка коррозионной стойкости осуществляется в соответствии со стандартом ASTM G101 и должна составлять не менее 6,0 единиц.

Требования, представленные в нормативно технической документации, дают только общее

представление об используемой при производстве гибких насосно-компрессорных труб стали. Для конкретизации химического состава и механических свойств был проведен анализ требований к подкату отечественных и зарубежных производителей.

Лидерами в производстве оборудования и гибких насосно-компрессорных труб для колтюбинга являются США и Канада, занимающие 97% мирового рынка, а также Китай, на долю которого приходится оставшиеся 3%. Среди них наиболее крупными являются: National Oilwell Varco [4], Global Tubing [5], Precision tube technology [6], Baoji Petroleum Steel Pipe Co., Ltd (BSG) [7]. С 2018 года производство ГНКТ на территории России обеспечивает компания ООО «Энгельсспецтрубмаш» (ООО «ESTM») [8]. Требования по химическому составу и механическим свойствам основного металла трубы, регламентируемые данными компаниями, представлены в табл. 3.

В качестве подката для изготовления гибких труб как зарубежными, так и отечественными производителями используется низколегированная сталь с базовой химической композицией **(0,05-0,15)C – (0,10-0,50)Si – (0,7-1,65)Mn**. Также применяется дополнительное легирование стали такими элементами как **(0,25-0,8)Cr, (0,14-0,30)Ni, (0,20-0,40)Cu** и **(0,10-0,45)Mo**. Подкат должен сочетать в себе высокие прочностные ($\sigma_T > 551$ МПа и $\sigma_B > 607$ МПа) и пластические ($\delta_{50} > 21,5$ %) свойства. Одновременно с этим ограничивается значение максимальной твердости стали HRC. Выполнение данных противоречивых требований является достаточно трудной задачей. Ее решение возможно за счет применения регламентированного химического состава и специальных параметров термомеханической обработки.

Таблица 1. Требования к механическим свойствам подката для ГНКТ в соответствии с API spec 5ST по группам прочности

Table 1. Requirements for mechanical properties of semi-finished rolled products according to API spec 5ST by grades

Группа прочности	Предел текучести, МПа	Временное сопротивление разрыву, МПа	Удлинение A_{50} , %	Твердость HRC
	Не менее			Не более
CT70	482	552	30	22
CT80	551	607	28	22
CT90	620	669	25	22
CT100	689	744	23	28
CT110	744	793	22	30

Таблица 2. Требования к химическому составу стали по группам прочности в соответствии с API spec 5ST

Table 2. Requirements for a chemical composition of steel by grades according to API spec 5ST

Группа прочности	Массовая доля химических элементов, %, не более						
	C	Mn	P	S	Si,		
СТ70	0.16	1.20	0.025	0.005	0.50		
СТ80			0.020				
СТ90		1.65	0.025				
СТ100							
СТ110							

Таблица 3. Требования отечественных и зарубежных производителей к химическому составу и механическим свойствам подката для ГНКТ

Table 3. Requirements of Russian and foreign manufacturers for a chemical composition and mechanical properties of semi-finished rolled products for coiled tubing

Номер плавки	Группа прочности	Массовая доля химических элементов в готовом прокате, %, в пределах или не более										Механические свойства			
												не менее или в пределах		не более	
		Al	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	Mo	σ_t , МПа	σ_b , МПа	A ₅₀ , %	HRC
Quality Tubing National Oilwell Varco (США)	QT-800	-	0,10-0,16	0,30-0,50	0,70-1,00	0,006	0,025	0,50-0,70	0,20	0,35	0,23	552	621	26	22
	QT-900	-	0,10-0,16	0,30-0,50	0,70-1,00	0,006	0,025	0,50-0,70	0,20	0,35	0,23	621	676	25	22
Global Tubing (США)	GT-90	0,050	0,050-0,160	0,10-0,50	0,600-1,20	0,005	0,025	0,25-0,80	0,25	0,40	0,10-0,30	621-724	669-827	25	22
Tenaris (США) Drillmerk	HS-80 W	-	0,10-0,15	0,30-0,50	0,60-0,90	0,005	0,030	0,45-0,70	0,25	0,40	-	552-621	607	28	22
	HS-90 W	0,040	0,10-0,15	0,25-0,40	0,60-0,90	0,005	0,025	0,55-0,70	0,14-0,30	0,20-0,40	0,10-0,15	621-689	669	25	22
	HS-100 W	-	0,10-0,15	0,40	1,00	0,005	0,020	0,50-0,70	0,30	0,40	0,25-0,45	689	758	23	28
Baoli Petroleum Steel Pipe (КНР)	CT-80	-	0,16	0,50	1,20	0,005	0,020	0,45-0,70	0,25	0,40	-	552	607	28	22
	CT-90	0,040	0,16	0,50	1,20	0,005	0,020	0,55-0,70	0,14-0,30	0,20-0,40	0,10-0,15	621	669	25	22
	CT-100	-	0,16	0,50	1,65	0,005	0,020	0,55-0,70	0,30	0,20-0,40	0,25-0,45	689	758	23	28
	CT-110	-	0,16	0,50	1,65	0,005	0,020	0,50-0,70	0,30	0,40	0,25-0,45	758	793	22	30
ООО «Энгельс-спецтрубмаш» (Россия)	СТ80	-	0,16	0,50	1,20	0,005	0,020	-	-	-	-	551-620	607	27,5*	22
	СТ90	-	0,16	0,50	1,20	0,005	0,020	-	-	-	-	620-689	669	25,5*	22
	СТ100	-	0,16	0,50	1,65	0,005	0,025	-	-	-	-	689	758	23,0*	28
	СТ110	-	0,16	0,50	1,65	0,005	0,025	-	-	-	-	758	793	21,5*	30

Примечание:

*при толщине стенки трубы 7,6 мм и внешнем диаметре 88,9 мм

Выводы

Выполнен анализ технических требований, предъявляемых к металлу для производства гибких насосно-компрессорных труб.

По результатам анализа можно заключить:

- конструкционная низколегированная сталь для ГНКТ должна сочетать в себе высокие характеристики прочности и пластичности, а также большую наработку на изгиб;

- необходимым является обеспечение стойкости стали к атмосферной коррозии, которая должна составлять не менее 6,0 единиц по ASTM G101;

- получение подката для гибких насосно-компрессорных труб с требуемыми высокими показателями по механическим свойствам возможно за счет применения регламентированного химического состава стали и специальных параметров термомеханической обработки.

Список литературы

1. Подземный ремонт и бурение скважин с применением гибких труб / С.М. Вайншток, А.Г. Молчанов, В.И. Некрасов, В.И. Чернобровкин. М.: Изд-во Академии горных наук, 1999. 244 с.
2. API Specification 5ST «Specification for Coiled Tubing», April 2010, effective 1 Oct 2010.
3. ASTM A606/A606M – 15. Standard Specification for Steel, Sheet and Strip, High-Strength, Low-Alloy, Hot-Rolled and Cold-Rolled, with Improved Atmospheric Corrosion Resistance.
4. NOW company. URL : <https://training.nov.com/>. (дата обращения: 15.01.2020).
5. Global tubing. URL : <https://www.global-tubing.com/>. (дата обращения: 15.01.2020).
6. Насосно-компрессорные гибкие непрерывные трубы. URL: <http://drillmerk.com/burovoo-oborudovanie/nasosno-kompressornie-gibkie-neprerivnie-trubi.html>. (дата обращения: 15.01.2020).
7. DIS Drilling industrial systems. URL : https://dis-s.ru/coil_tubing/. (дата обращения: 15.01.2020)
8. ESTM. URL : <http://estm-tula.com/about-us.html>. (дата обращения: 15.01.2020)
9. Воробьев А.Е., Малюков В.П., Куценко В.А. Применение инновационных кольтюбинговых технологий при разработке месторождений углеводородов // Вестник РУДН. 2014. №1. С. 108-116.
10. Ильиных В.Н. Совершенствование методов оценки остаточного ресурса гибких труб кольтюбинговых установок: дис. ... канд. техн. наук. Тюмень, 2013. 142 с.

Поступила 05.02.2020; принята к публикации 27.02.2020; опубликована 25.03.2020

Полецков Павел Петрович – д-р техн. наук, профессор

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

E-mail: pavel_poletskov@mail.ru

Алексеев Даниил Юрьевич – аспирант

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

E-mail: D.U.Alekseev@mail.ru

Кузнецова Алла Сергеевна – младший научный сотрудник

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

E-mail: allakuznetsova@mail.ru

Никитенко Ольга Александровна – научный сотрудник

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

References

1. Weinstock S.M., Molchanov A.G., Nekrasov V.I., Chernobrovkin V.I. *Podzemny remont i burenie skvazhin s primeneniem gibkikh trub* [Underground repair and drilling of wells using flexible pipes]. Moscow: Publishing House of the Academy of Mining Sciences, 1999, 244 p. (In Russ.)
2. API Specification 5ST “Specification for Coiled Tubing”, April 2010, effective 1 Oct 2010.
3. ASTM A606 / A606M - 15. Standard Specification for Steel, Sheet and Strip, High-Strength, Low-Alloy, Hot-Rolled and Cold-Rolled, with Improved Atmospheric Corrosion Resistance.
4. NOW company. Available at: <https://training.nov.com/> (Accessed on January 15, 2020).
5. Global tubing. Available at: <https://www.global-tubing.com/> (Accessed on January 15, 2020).
6. Tubing flexible continuous pipes. Available at: <http://drillmerk.com/burovoo-oborudovanie/nasosno-kompressornie-gibkie-neprerivnie-trubi.html>. (Accessed on January 15, 2020).
7. DIS Drilling industrial systems. Available at: https://dis-s.ru/coil_tubing/. (Accessed on January 15, 2020).

8. ESTM. Available at: <http://estm-tula.com/about-us.html>. (Accessed on January 15, 2020).
9. Vorobev A.E., Malyukov V.P., Kutsenko V.A. Application of innovative coiled tubing technologies in the development of hydrocarbon deposits. *Vestnik RUDN* [Bulletin of Peoples' Friendship University of Russia], 2014, no. 1, pp. 108-116. (In Russ.)
10. Ilinykh V.N. *Sovershenstvovanie metodov otsenki ostatochnogo resursa gibkikh trub koltyubingovykh ustanovok. Diss. kand. tekhn. nauk* [Improving methods for assessing the residual life of flexible pipes of coiled tubing plants: PhD thesis]. Tyumen, 2013, 142 p. (In Russ.)

Submitted 05/02/2020; revised 27/02/2020; published 25/03/2020

Pavel P. Poletskov – DrSc (Eng.), Professor

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: pavel_poletskov@mail.ru

Daniil Yu. Alekseev – Postgraduate Student

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: D.U.Alekseev@mail.ru

Alla S. Kuznetsova – Junior Researcher

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: allakuznetsova@mail.ru

Olga A. Nikitenko – Research Associate

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

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

УДК 658.562, 621.763

DOI: 10.18503/1995-2732-2020-18-1-55-62



МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ ИЗ ВОЛОКНИСТЫХ МЕТАЛЛОКОМПОЗИТОВ

Антипова Т.Н., Олешко А.Ю.

Технологический университет, Королев, Московская область, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы): в настоящее время производство волокнистых металлокомпози́тов приобрело устойчивый характер, в том числе благодаря восстановлению отечественного производства высокопрочных высокомодульных неметаллических армирующих волокон, что делает актуальной разработку элементов системы управления качеством с учетом особенностей технологии получения. Решение этой задачи позволит своевременно выявлять и устранять причины несоответствий и стабильно поставлять продукцию, отвечающую требованиям потребителей, используя принципиально новые подходы. **Цель работы:** разработка элементов управления качеством продукции из металлических композиционных материалов, армированных волокнами на основе рациональных параметров технологических операций для получения изделий с заданными свойствами. **Используемые методы:** при разработке концептуальной модели управления качеством и процессно-ориентированной модели технологии изготовления продукции из волокнистых металлокомпози́тов использованы методы системного и процессного подходов и моделирования. **Новизна:** к элементам новизны относятся методические основы управления качеством продукции из волокнистых металлокомпози́тов, отраженные в разработанной концептуальной модели управления, которая позволяет обосновать рациональные управляющие воздействия (параметры технологических операций) и на основе информации обратной связи выстроить структуру мониторинга производства изделий. **Результат:** полученные результаты теоретического исследования являются развитием работ в области управления качеством продукции из металлокомпози́та, армированного волокнами. **Практическая значимость:** обоснованы основные предварительные и окончательные операции, последовательность их выполнения и рациональные параметры технологических режимов, с учетом особенностей получения продукции из волокнистых металлокомпози́тов.

Ключевые слова: управление качеством продукции, контроль, системный и процессный подходы, модели, волокнистый металлокомпози́т.

© Антипова Т.Н., Олешко А.Ю., 2020

Для цитирования

Антипова Т.Н., Олешко А.Ю. Методические основы управления качеством продукции из волокнистых металлокомпози́тов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т.18. №1. С. 55–62. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-1-55-62>



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

BASIC PROCEDURES OF PRODUCT QUALITY CONTROL FOR FIBER METAL COMPOSITES

Tatyana N. Antipova, Alexey Y. Oleshko

University of technology, Korolev, Moscow Region, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance): Currently, the production of fiber metal composites has acquired a stable character, including due to the restoration of domestic production of high-strength high-modulus non-metallic reinforcing fibers, which makes it relevant to develop elements of the quality control system taking into account the peculiarities of the production technology. By solving this task, we can timely identify and eliminate the causes of nonconformities and consistently deliver products that meet the requirements of consumers, using fundamentally new approaches. **Objectives:** Development of quality control elements for products made of metal composite materials reinforced with fibers based on rational parameters of technological operations to obtain products with specified properties. **Methods Applied:** When developing a conceptual model of quality control and a process-oriented model of manufacturing technology for fiber metal composite products, the authors used the methods of system and process approaches and modeling. **Originality:** The elements of novelty include the basic procedures of quality control of fiber metal composite products, reflected in the developed conceptual control model, which allows us to justify rational control actions (parameters of technological operations) and build a structure of the production monitoring using feedback information. **Findings:** The obtained results of the theoretical study are the development of studies in the field of quality control of products made of metal composite reinforced with fibers. **Practical Relevance:** The paper contains a rationale for the main preliminary and final operations, their sequence and rational parameters of process parameters taking into account the manufacturing peculiarities of products from fiber metal composites.

Keywords: product quality control, control, system and process approaches, models, fiber metal composite.

For citation

Antipova T.N., Oleshko A.Y. Basic Procedures of Product Quality Control for Fiber Metal Composites. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2020, vol. 18, no. 1, pp. 55–62. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-1-55-62>

Введение

Продукция из композиционных материалов на металлической основе, армированная высокопрочными высокомодульными не металлическими волокнами, является перспективным классом изделий в конструкционных материалах. Такие металлокомпози́ты по удельной прочности и жесткости в 2–3 раза превосходят традиционные конструкционные металлические материалы – стали, алюминиевые и титановые сплавы, что определяет высокую эффективность применения продукции на их основе в части снижения веса конструкций [1–5]. Основными потребителями этой продукции являются предприятия, производящие ракетно-космическую технику, руководствующиеся в своей деятельности требованиями к системам менеджмента качества организаций ГОСТ Р 56518-2015 [6].

Однако, как показывает многолетняя практика получения продукции из металлокомпози́тов, несоответствия данного класса выявляются прежде всего на стадии жизненного цикла изделия – производство [7]. Отличительной особенностью технологии является одновременное получение композиционного материала и изготов-

ление из него изделия, когда при одних и тех же технологических параметрах необходимо обеспечить выполнение требований заказчика к продукции по физико-механическим свойствам материала и геометрическим размерам.

Проблема обеспечения потребителей продукцией из металлокомпози́тов с заданными свойствами пока решается только за счет наличия контрольных операций, позволяющих в ходе технологического процесса отделить некачественную продукцию, без системного подхода к управлению качеством. Решение этих задач позволит актуально выявлять и устранять причины и следствия несоответствий продукции из волокну́стого металлокомпози́та, и обеспечивать стабильные поставки изделий, отвечающие требованиям потребителей.

Методы исследований

Для решения поставленных задач, а именно разработки процессно-ориентированной модели технологии изготовления, иерархически организованной информационной подсистемы получения и концептуальной модели управления качеством продукции из волокну́стого металлокомпози́та, в качестве методологической основы

приняты методы системного и процессного подходов, концептуальные основы Всеобщего управления качеством (TQM-Total quality management), экспериментальные исследования, моделирования [8–10].

Результаты исследования и их обсуждение

В результате изучения всех этапов получения композиционных материалов, используя системный и процессный подходы [10], а также причинно-следственную диаграмму Исикавы, описано последовательное проведение операций по изготовлению продукции из рассматриваемого класса композитов и факторов, воздействующих на качество промежуточной и конечной продукции (рис. 1).

Процессно-ориентированная модель получения металлокомпозитов рассматриваемого класса состоит из двух блоков, последовательно исполняемых технологических процессов: изготовление полуфабрикатов и получение на их основе изделия путём сборки и последующей консолидации заготовки. Каждый из двух блоков представляет собой комплекс технологических операций.

На первой стадии производства приобретаются основные и вспомогательные исходные материалы. Исходные характеристики качества материалов являются факторами, обуславливающими качество конечного изделия.

Первая технологическая операция по формированию равномерного распределения армирую-

щих волокон представляет собой начальную стадию переработки исходного материала и может быть самостоятельным полуфабрикатом. Волокно является основным компонентом, определяющим прочностные характеристики изделия. Назначение операции – создать упорядоченный ряд волокон, при определённых параметрах, которые оказывают воздействие на технико-экономические характеристики изделий [11, 12].

Вторая технологическая операция предназначена для добавления матричного материала по параметрам, отклонения от которых оказывают существенное влияние на прочностные характеристики конечного изделия. В результате данной операции формируется промежуточный полуфабрикат волокно-матрица.

Следующая технологическая операции включают в себя сборку многослойной заготовки полуфабриката. Правильность исполнения данной операции в значительной мере зависит от человеческого фактора, который практически не поддаётся формализации и автоматизации. Кроме того, на данной операции качество вспомогательного исходного материала может оказывать большое влияние на выполнение последующих операций.

Завершающей технологической операцией, которая окончательно формирует полуфабрикат в изделие, является консолидация заготовки. Параметры консолидации в значительной степени оказывают влияние на качество прочностных характеристик готового изделия.



Рис. 1. Процессно-ориентированная модель технологии изготовления продукции из волокнистых металлокомпозитов

Fig. 1. A process-oriented model of a process flow of products from fiber metal composites

Процессно-ориентированная модель представляет собой систему, элементами которой являются процессы (технологические операции) получения продукции из волокнистых металлокомпозитов. Система производства рассматриваемого класса металлокомпозитов – это множество взаимосвязанных элементов, каждый из которых прямо или косвенно связан с любым другим элементом.

В соответствии с теоретическими положениями системного подхода изменение хотя бы одного элемента гарантирует качественное изменение всей системы. Таким образом, качество работы системы является свойством целого, которое в свою очередь определяется качеством работы её частей и характером связей между ними, не являясь простой суммой этих качеств [9].

На рис. 2 представлена классическая блок-схема управления, которую предлагается рассматривать как основополагающую для разработки модели управления качеством продукции из волокнистого металлокомпозита. При построении дан-

ной модели были учтены особенности технологии получения композиционных материалов.

Объект управления предлагается представить как совокупность элементов, полученных в результате проведения каждой технологической операции. Каждый элемент характеризуется рядом параметров $X_1, X_2 \dots X_i$.

В блоке принятия решений обосновывается комплекс управляющих воздействий и характеристики – параметры технологических операций. В результате последовательных управляющих воздействий каждый элемент объекта изменяет или приобретает новые свойства, которые следует характеризовать соответствующими численными параметрами. Совокупность параметров по каждому элементу объекта управления является информационной основой мониторинга или межоперационного контроля.

Неотъемлемой частью системы управления является информационная подсистема получения продукции из композиционных материалов, которая имеет иерархическую структуру (рис. 3).

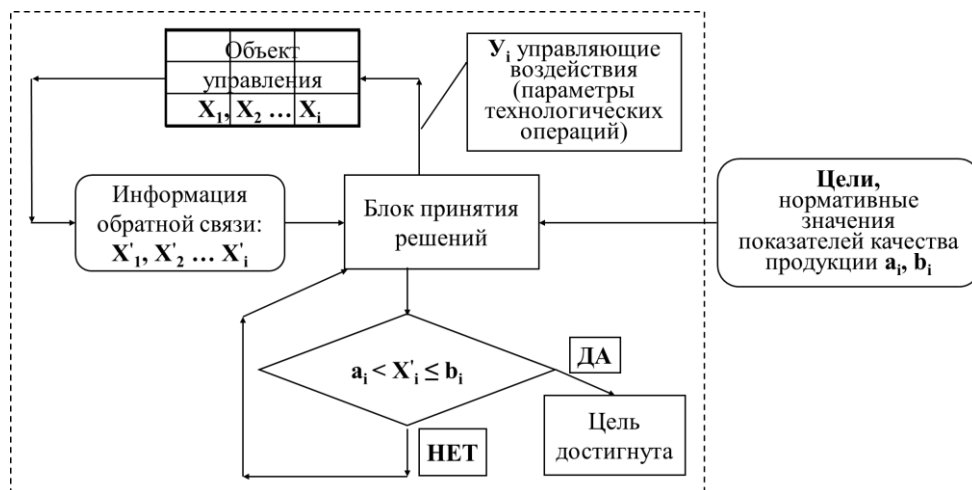


Рис. 2. Блок-схема управления качеством продукции

Fig. 2. Product quality control structure diagram



Рис. 3. Иерархически организованная информационная подсистема получения продукции из композиционных материалов

Fig. 3. A hierarchical information subsystem of manufacturing products from composite materials

Особенность иерархической организации любой системы заключается в том, что при движении вверх по иерархии моделируемый объект не просто является совокупностью соответствующих элементов нижнего уровня, а приобретает принципиально новые качественные свойства, отсутствующие на предыдущем уровне, реализуя принцип целостности [13].

Предлагается выделить два уровня информационной подсистемы: уровень заказчика и технологический уровень.

Первый уровень информационной подсистемы отражает требования заказчика к объекту разработки, то есть реализует принцип приоритета критериев более высокого уровня управления.

В соответствии с ГОСТ Р 56518-2015 [6] требования заказчика (потребителя) – это набор критериев, формализующих цели в виде показателей качества продукции, где в роли заказчика выступает государственный орган, или организация, который совместно с государственным заказчиком осуществляет заказы в той части, которая является их интересом, участвует в выдаче технических заданий (исходные данные) на создание продукции или составных частей, и(или) выполнение процессов (услуг) [6], для волокнистых металлокомпози- тов в основном – это предприятия ракетно-космической отрасли.

Выбор основных показателей качества продукции из металлокомпозита, армированного волокнами, обусловлен необходимостью учета специфики условий эксплуатации изделий в жесткостных конструкциях, а также экономического эффекта для потребителя [14–16].

На **рис. 4** представлены обобщенные свойства продукции из металлокомпозита, армированного волокнами.

Данная структура включает:

- физические показатели, такие как плотность (г/см^3), коэффициент линейного термического расширения ($\cdot 10^{-6}$, град^{-1}), диапазон рабочих температур ($^{\circ}\text{C}$) и др.;

- механические показатели, такие как прочность на растяжение (МПа), модуль упругости (МПа), ударная прочность (кДж/м^2) и др.;

- показатели технологичности, такие как трудозатраты (ч), степень механизации (%), степень автоматизации (%) и др.;

- экономические показатели, такие как себестоимость (руб.), годовой экономический эффект (руб.), удельные капитальные вложения (руб.) и др., сопряженные с показателями технологичности.

Перечисленные показатели качества следует рассматривать как обобщенные свойства продукции из волокнистого металлокомпозита, которые необходимы для оценки полученных результатов формирования продукции и служат источником информации о конечном объекте управления для получения обратной связи с системой управления, в зависимости от требований заказчика они могут варьироваться.

Второй уровень информационной подсистемы соответствует конкретному предприятию, производящему продукцию из композиционных материалов, и включает комплекс параметров технологических операций и показатели качества исходных материалов.

Для получения волокнистых металлокомпозитов предлагается выделить три основные группы исходных материалов с показателями качества, влияющими на свойства конечной продукции [11]:

- армирующие волокна: прочность на растяжение (МПа), модуль упругости (МПа), диаметр (мкм), количество заводских склеек на таре поставщика (шт.);

- матричный материал: соответствие марки сплава, химический состав, состояние поставки, геометрические размеры (мм);

- вспомогательный материал: геометрические размеры (мм), отсутствие поверхностных дефектов.

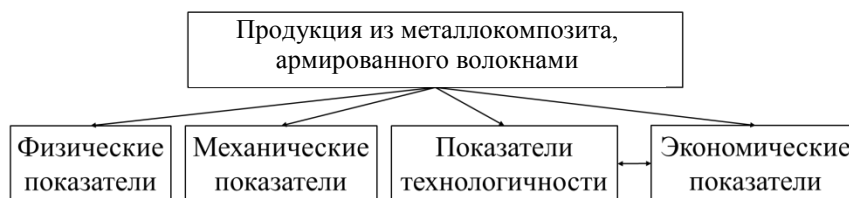


Рис. 4. Структура показателей качества продукции из волокнистого металлокомпозита

Fig. 4. A structure of quality indicators of products from fiber metal composites

После завершения всех технологических операций формируется конечная продукция из волокнистого металлокомпозита, которая характеризуется количественными показателями качества и должна соответствовать требованиям заказчика. Процедура соответствия качества продукции требованиям заказчика определяется следующей формулой:

$$a_i < X'_i \leq b_i, \quad (1)$$

где X'_i – i -й показатель качества продукции из волокнистого металлокомпозита; a_i и b_i – конечные значения допустимого интервала варьирования численного значения данного показателя.

Развивая теоретические положения управления качеством, разработана концептуальная модель управления качеством продукции из металлокомпозита, армированного волокнами (рис. 5).

Данная модель состоит из основных блоков, каждый из которых представляет собой набор соответствующих ему функциональных элементов:

- объект управления – продукция из волокнистого металлокомпозита, являющаяся совокупностью элементов (армирующие волокна, матричный материал, полуфабрикат и др.);
- блок принятия решений, где обосновывается, в том числе экспериментально, комплекс управляющих воздействий;
- управляющие воздействия – параметры

технологических операций, такие как температура, давление, время и др.;

- информация обратных связей – данные (полученные в процессе мониторинга или межоперационного контроля) о продукции из волокнистого металлокомпозита или его элементов, изменяемых или приобретаемых новые характеристики (габаритные размеры, шаг выкладки, физико-механические свойства и др.).

Движение элементов объекта управления по технологическим операциям сопровождается двумя обязательными процессами: управляющих воздействий и снятия информации об изменении свойств элементов объекта управления. При этом если информация обратной связи входит в диапазон нормативных значений (технологической и/или технической документации), то элементы объекта управления продолжают движение по технологическим процессам. Если нет, то элементы объекта управления возвращаются на предыдущие операции для корректировки свойств путём повторного управляющего воздействия либо отбраковки. Таким образом, после последовательных управляющих воздействий формируется волокнистый металлокомпозит с показателями качества (физическими, механическими и др.), соответствующими требованиям потребителя (заказчика).

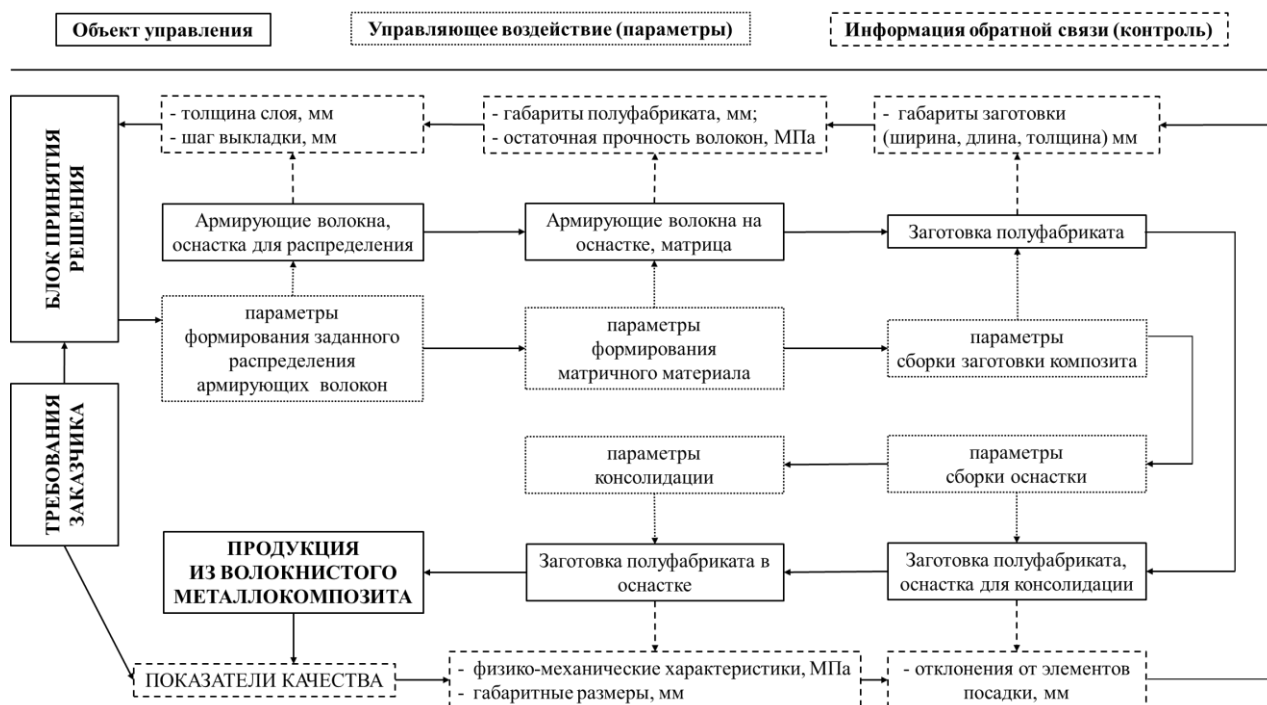


Рис. 5. Концептуальная модель управления качеством продукции из волокнистого металлокомпозита

Fig. 5. A conceptual model of quality control of products from fiber metal composites

Разработанная концептуальная модель управления качеством продукции из композиционных материалов позволяет планировать экспериментальные исследования для обоснования рациональных управляющих воздействий и на основе информации обратной связи выстроить структуру мониторинга производства изделий.

Заключение

На основе проведённых теоретических исследований по управлению качеством и технологии изготовления композиционных материалов с использованием системного и процессного подходов разработана процессно-ориентированная модель технологического процесса производства волокнистых металлокомполитов, которая позволяет определять основные предварительные и окончательные операции, последовательность их выполнения и особенно-сти получения продукции. Модель служит осно-

вой для обоснования модели управления качеством продукции из волокнистого металлокомполита.

Сформулирована иерархически организованная информационная подсистема получения продукции из композиционных материалов, которая позволяет учитывать принцип приоритета критериев более высокого уровня управления (требования потребителя/заказчика), ряд функциональных элементов (технологических операций) и качество исходных материалов.

Разработана концептуальная модель управления качеством продукции из волокнистого металлокомполита, которая представляет собой целостную систему и дает возможность установить системные связи между назначением изделия и его свойствами, а также между показателями качества продукции и техническими возможностями процесса производства данного изделия.

Список литературы

1. Власенко А.В., Скрыбин В.В. Применения перспективных композиционных материалов для проектов ракетно-космической техники // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2016. Т. 1. № 1. С. 71–73.
2. ГОСТ Р 58016-2017. Композиты керамические. Карбидкремниевые композиты, армированные карбидкремниевым волокном. Классификация. М.: Стандартинформ, 2017. 15 с.
3. Композиционные материалы в авиастроении // Зарубежное военное образование. 2014. URL: <http://zvo.su/VVS/kompozicionnye-materialy-v-aviastroenii.html> (дата обращения: 25.12.2017).
4. Тимофеева А.Н., Шайдуров В.С., Чернов В.М. Система автоматического регулирования механическими колебаниями композиционных элементов конструкций // Конструкции из композиционных материалов. 2008. №3. С. 68–71.
5. Kyle-Henney S., Flitcroft S., Shatwell R., Gibbon D., Voss G., Harkness P. Silicon carbide monofilament reinforced titanium composites for space structures a new material option, University of Glasgow School of engineering. 6 (2012).
6. ГОСТ Р 56518-2015. Техника космическая. Требования к системам менеджмента качества организаций, участвующих в создании, производстве и эксплуатации. М.: Стандартинформ, 2015. 41 с.
7. ГОСТ Р 56136-2014. Управление жизненным циклом продукции военного назначения. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2015. 16 с.
8. Богатеев Г.Г., Коробков А.М. Контроль качества изделий из композиционных материалов: учеб. пособие. Казань: Методическая комиссия инженерного химико-технологического института КГТУ, 2018. 29 с.
9. Гайдес М.А. Общая теория систем: (системы и системный анализ). М.: Глобус-пресс, 2005. 201 с.
10. ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Системы менеджмента качества. Требования. М.: Стандартинформ, 2015. 32 с.
11. Антипова Т.Н., Олешко А.Ю. Концептуальные положения системы управления качеством производства боралюминиевых трубчатых элементов ферменных конструкций космических аппаратов // Информационно-технологический вестник. 2016. №3. С. 108–113.
12. Neubauer E., Wulz H.G., Edmaier Ch., Agote I., Merstallinger A., Mozdzen G., Liedtke V., Stelzer N., Liedtke V., Gamsjäger N. Metal matrix composites (MMCS) as high performance metallic material. Financial, management and administrative proposal, Aerospace and advanced composites. 102 (2013).
13. Исаев, В.Г., Антипова Т.Н. Концептуальные положения управления качеством системы производства композиционных материалов для ракетно-космической техники // Информационно-технологический вестник. 2017. № 4(14). С. 30–38.
14. ГОСТ 4.200-78. Система показателей качества продукции. Строительство. Основные положения. М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. 7 с.
15. Разработка структуры нормативного документа на металлопродукцию на основе принципа опережающей стандартизации / Снимщиков С.В., Полякова М.А., Лимарев А.С., Харитонов В.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т.17. №1. С. 86–93. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-1-86-93>.

16. Цыганов А.В. Иерархическая декомпозиция качества процесса контрейлерных перевозок // Качество в обработке материалов. 2018. №2(10). С. 46–49.

Поступила 10.02.2020; принята к публикации 02.03.2020; опубликована 25.03.2020

Антипова Татьяна Николаевна – д-р техн. наук, профессор

Технологический университет, Королев, Московская область, Россия. Email: antipova@ut-mo.ru

Олешко Алексей Юрьевич – аспирант

Технологический университет, Королев, Московская область, Россия. Email: korolev2005-06@mail.ru

References

1. Vlasenko A.V., Skryabin V.V. Application of advanced composite materials for designing rocket and space equipment. *Aktualnye problemy aviatsii i kosmonavтики* [Relevant problems of aviation and cosmonautics], 2016, vol. 1, no 1, pp. 71–73. (In Russ.)
2. GOST R 58016-2017. Ceramic composites. Silicon carbide composites reinforced with silicon carbide fiber. Classification. Moscow: Standartinform, 2017, 15 p.
3. Composite materials in the aircraft industry. *Zarubezhnoe voennoe obozrenie* [Foreign military review], 2014. Available at: <http://zvo.su/VVS/kompozicionnye-materialy-v-aviastroenii.html> (Accessed on December 25, 2017).
4. Timofeeva A.N., Shaidurov V.S., Chernov V.M. An automatic control system for mechanical oscillations of composite elements of structures. *Konstruktsii iz kompozitsionnykh materialov* [Composite materials structures], 2008, no. 3, pp. 68–71. (In Russ.)
5. Kyle-Henney S., Flitcroft S., Shatwell R., Gibbon D., Voss G., Harkness P. Silicon carbide monofilament reinforced titanium composites for space structures a new material option. The University of Glasgow, School of Engineering, 6 (2012).
6. GOST R 56518-2015. Space products. Requirements for quality management systems of organizations participating in development, production and operation. Moscow: Standartinform, 2015, 41 p.
7. GOST R 56136-2014. Life cycle management for military products. Terms and definitions. Moscow: Standartinform, 2015, 16 p.
8. Bogateev G.G., Korobkov A.M. *Kontrol kachestva izdeliy iz kompozitsionnykh materialov: uchebnoe posobie* [Quality control of products made of composite materials: textbook]. Kazan: Methodical Committee of the Institute of Engineering, Chemistry and Technology of KSTU, 2018, 29 p. (In Russ.)
9. Gaides M.A. *Obshchaya teoriya sistem: (sistemy i sistemnyi analiz)* [General systems theory: (systems and system analysis)]. Moscow: Globus-press, 2005, 201 p. (In Russ.)
10. GOST R ISO 9001-2015. Quality management systems. Requirements. Moscow: Standartinform, 2015. 32 p.
11. Antipova T.N., Oleshko A.Yu. Conceptual provisions of the quality control system for production of boron/aluminium tubular elements of trussed structures of spacecraft. *Informatsionno-tekhnologicheskii vestnik* [Information technology bulletin], 2016, no. 3, pp. 108–113. (In Russ.)
12. Neubauer E., Wulz H.G., Edtmaier Ch., Agote I., Merstallinger A., Mozdzen G., Liedtke V., Stelzer N., Liedtke V., Gamsjäger N. Metal matrix composites (MMCS) as high performance metallic material. Financial, management and administrative proposal, Aerospace and advanced composites. 102 (2013).
13. Isaev V.G., Antipova T.N. Conceptual provisions of quality management of the system of production of composite materials for rocket and space equipment. *Informatsionno-tekhnologicheskii vestnik* [Information technology bulletin], 2017, no. 4(14), pp. 30–38. (In Russ.)
14. GOST R 4.200-78. Product-quality index system. Building. Basic principles. Moscow: IPK publishing house of standards, 2003, 7 p.
15. Snimshchikov S.V., Polyakova M.A., Limarev A.S., Kharitonov V.A. Development of a structure of norms for steel products based on a principle of advanced standardization. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2019, vol. 17, no. 1, pp. 86–93. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-1-86-93>.
16. Tsyganov A.V. Hierarchical decomposition of the quality of piggyback transportation. *Kachestvo v obrabotke materialov* [Quality in materials treatment], 2018, no. 2(10), pp. 46–49. (In Russ.).

Submitted 10/02/2020; revised 02/03/2020; published 25/03/2020

Tatyana N. Antipova – DrSc (Eng.), Professor

University of Technology, Korolev, Moscow Region, Russia. Email: antipova@ut-mo.ru

Alexey Yu. Oleshko – Postgraduate Student

University of Technology, Korolev, Moscow Region, Russia. Email: korolev2005-06@mail.ru

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

УДК 658.562.6

DOI: 10.18503/1995-2732-2020-18-1-63-70



РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА ПРЕДПРИЯТИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ КВАЛИМЕТРИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

Черкасов Д.А.

Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, Орёл, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы): В данной статье описана ситуация в области систем менеджмента качества в настоящее время, отмечены основные недостатки. На основе анализа ряда существующих методик оценивания в статье была изложена разработанная автором методика оценки системы менеджмента качества с применением квалиметрических методов. Также отмечена целесообразность применения методов квалиметрии при оценке систем качества. **Цель работы:** разработать методику оценки системы менеджмента качества организации, которая имеет широкую сферу применения, соответствует существующим стандартам и регламентам и учитывает все стороны деятельности предприятия. **Используемые методы:** при разработке методики оценки были применены различные методы квалиметрии. Также были затронуты методы системного анализа и статистические методы. **Новизна:** новизна проведенного исследования заключается в том, что была разработана методика, которая производит оценку системы менеджмента качества на основе анализа всей совокупности компонентов, составляющих сферу деятельности организации. Таким образом, учитываются рекомендации, закрепленные в основополагающих концепциях по качеству, имеющихся в настоящее время, таких как системы Исигавы, TQM и т.п. **Результат:** в данной статье представлена готовая методика оценки системы менеджмента качества на основе методов квалиметрии. Приведен список показателей, составляющих базис для проведения процесса оценки. Также даны все основные формулы для расчета показателей, изложены основные рекомендации по проведению процесса оценки. **Практическая значимость:** предложенная методика позволяет провести комплексную оценку системы менеджмента качества на любом типе предприятий с учетом всех установленных законодательных норм.

Ключевые слова: показатели качества, система менеджмента качества, квалиметрия, оценка, критерий оценки.

© Черкасов Д.А., 2020

Для цитирования

Черкасов Д.А. Разработка методики оценки системы менеджмента качества предприятия с применением квалиметрических методов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т.18. №1. С. 63–70. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-1-63-70>



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

DEVELOPMENT OF AN ASSESSMENT METHODOLOGY FOR THE QUALITY MANAGEMENT SYSTEM OF AN ORGANIZATION USING QUALIMETRY METHODS

Dmitry A. Cherkasov

Turgenev Orel State University, Orel, Russia

Abstract. Problem statement (Relevance): This paper describes the current situation with quality management systems and states their main weak points. By analyzing a range of existing assessment methodologies, the author describes in the paper his QMS assessment methodology created by applying qualimetry methods. He also states the feasibility of qualimetry methods in assessing the quality systems. **Objective of the research:** To develop the assessment methodology for the quality management system of an organization, which has a broad application, corresponds to the existing standards and rules, and considers all the sides of the organization's activities. **Methods applied:** When developing the assessment methodology, the author applied various qualimetry methods, including the system analysis and statistic methods. **Novelty of the research:** The novelty of the research is that the methodology was created to score the quality management system by analyzing all components included in a scope of the organization's activities. Therefore, it considers the recommendations stated in currently applicable fundamental quality concepts, such as the Ishikawa diagram, TQM, etc. **Findings:** This paper presents a completed assessment methodology of the quality management system based on qualimetry methods. It contains a list of indicators forming a basis for assessment. Main calculation formulas are also provided and main recommendations on an assessment process are given. **Practical relevance:** The proposed methodology is used to make an overall assessment of the quality management system in any type of organizations, following all existing legal standards.

Keywords: quality indicators, quality management system, qualimetry, score, assessment criterion.

For citation

Cherkasov D.A. Development of an Assessment Methodology for the Quality Management System of an Organization Using Qualimetry Methods. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2020, vol. 18, no. 1, pp. 63–70. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-1-63-70>

Введение

В современном мире производство становится все более и более сложным. Происходит усложнение применяемых машин и агрегатов, а также самих технических и технологических систем. В подобных условиях возможный отказ или неисправность какого-либо одного элемента может привести к краху всей деятельности предприятия. Из-за сложности систем проведение мероприятий по ремонту и восстановлению становится все более затруднительным и затратным. Поэтому в настоящее время главный приоритет в области управления смещается в область обеспечения качества деятельности предприятия, и основным инструментом, призванным способствовать руководству в этом вопросе, – система менеджмента качества (СМК).

Говоря теоретически, СМК – это совокупность структур организации, методик управления, процессов и ресурсов, направленных на достижение необходимого уровня качества [1–5].

Она обеспечивает руководство всеми необходимыми инструментами по управлению качеством в организации. Построение любой СМК базируется на двух принципах: системном и процессном подходах. Первый подразумевает рассмотрение предприятия как целостной системы взаимодействующих элементов с определенными входами и выходами [6]. Второй принцип подразумевает рассмотрение всей деятельности как набора взаимосвязанных процессов. Применение подобных принципов дает возможность декомпозировать любую сложную систему на более простые и мелкие элементы, которыми легче управлять. Деление всей деятельности на отдельные процессы дает возможность отследить пошагово каждый вид работ и своевременно устранить все недостатки [7]. В итоге это позволяет проводить более успешную политику в области качества.

Основные направления в развитии систем менеджмента качества на предприятиях в настоящее время задаются системой международных

стандартов ИСО 9000. Они включают в себя основные требования к построению СМК. В нашей стране также идет работа по стандартизации данной области, основанная на упомянутых выше стандартах ИСО. Кроме того, на построение систем менеджмента качества влияют различные отраслевые стандарты и регламенты, обусловленные спецификой конкретной отрасли.

Однако, если обратиться к отечественной практике, то можно наблюдать достаточно большой процент случаев, когда организация не обеспечивает необходимый уровень качества, либо внедрение СМК не дает результатов [8–11]. По статистике, в среднем 80% проектов по внедрению СМК являются неуспешными. Конечно, большую роль здесь играют различные институциональные факторы, связанные с сознанием управляющего персонала. Но основным фактором является отсутствие четко регламентированной методики оценки самой СМК и мероприятий по обеспечению качества в стандартах и регламентах. Стандарты серии ИСО 9000 определяют лишь общие контуры того, как необходимо строить политику в области качества. Из-за этого зачастую руководство не имеет возможности дать адекватную оценку СМК, понять, есть ли успех в области обеспечения качества, в каком направлении развиваться. Поэтому достаточно остро встает вопрос о разработке универсальной методики оценки эффективности всей системы менеджмента качества.

Существует достаточно много подходов к тому, как оценить систему качества и само качество продукции или услуги. Наиболее перспективным является подход, основанный на квалитметрических методах. Сама квалитметрия – это научная область, занимающаяся вопросами количественной оценки свойств и параметров какого-либо объекта или системы [12–15]. Привлекательность квалитметрии для оценки качества обусловлена тем, что данная научная дисциплина разрабатывалась изначально именно для этих целей. Применение квалитметрических методов дает возможность вычислить показатели, легко поддающиеся анализу и сопоставлению. Количественные показатели гораздо легче рассчитать, чем качественные. Также квалитметрия располагает методами унификации разнородных показателей качества, сведения их к единой форме, что тоже является очень существенным при оценке качества сложноструктурированных систем с множеством разнотипных свойств. По этим причинам построение методики оценки эффективности и результативности СМК на базе

квалитметрических методов представляется наиболее целесообразным.

В настоящее время существует ряд методик, разработанных для конкретных типов предприятий на государственном уровне, в основном связанных с наиболее приоритетными областями экономики. Также существует ряд авторских методик, разработанных в последнее время. Проведя их анализ, нами было выявлено, что предложенные методики являются достаточно грамотными, однако не дают полного охвата всех сторон деятельности предприятия и, кроме того, не являются достаточно универсальными по своей сути [16–21]. В частности, не уделяется внимание оценке экономической эффективности СМК. Также не уделено внимание процессу сведения всех показателей к единому виду, что играет довольно существенную роль на тех предприятиях, где показатели качества выражаются в разных шкалах измерения. Поэтому, чтобы устранить данные недостатки, необходимо разработать новую, более универсальную методику.

Методы исследования

Разработка любой методики по оценке СМК начинается с раскрытия основных организационных положений процесса оценки. Здесь подразумевается цель, методы оценки, ответственность руководства, частота проведения. В имеющихся материалах подобные темы изложены достаточно подробно, также об этом указано в основополагающих нормативных документах. По этой причине при проведении данного исследования было решено остановиться именно на самом процессе оценки и связанными с ним процессами.

В общем виде процесс оценки состоит из следующих этапов:

- определение показателей качества;
- вычисление весовых коэффициентов;
- сбор данных;
- расчет показателей, приведение данных к единому виду и оценка СМК.

Как правило, многие показатели, характеризующие СМК, обладают схожей природой. Поэтому их определение целесообразно выполнять по группам, отражающим различные аспекты предприятия. Основываясь на главных подходах в области качества, нами были предложены следующие группы показателей:

- 1) показатели соответствия СМК регулирующей документации;
- 2) показатели по потребителю;
- 3) показатели по персоналу;
- 4) показатели по поставщикам;

- 5) показатели по продукту/услуге;
- 6) показатели по инфраструктуре;
- 7) экономические показатели;
- 8) показатели соответствия СМК разработанной на предприятии документации.

Последовательность данных групп отражает их значимость для предприятия в области обеспечения качества.

Сбор данных лучше всего осуществлять с применением статистических методов, для чего необходимо разработать различные формы опросников. Также необходимо наличие документальной фиксации всех бизнес-процессов.

Применение квалиметрических методов для оценки качества любого объекта подразумевает расчет определенных количественных показателей. Однако при проведении мероприятий по оценке СМК не всегда бывает возможно оценить какой-либо показатель количественно. Например, степень удовлетворенности потребителей можно оценить лишь по определенной шкале. По этой причине необходимо свести к единому представлению все показатели. Для этих целей необходимо проводить предусмотренное квалиметрией нормирование данных критериев оценки.

Для выяснения степени соответствия каких-либо показателей плановым удобно применять циклограмму качества, представленную на рисунке. Ее использование также поможет при сведении воедино разнотипных показателей, в частности, для качественного выражения количественного расхождения параметров. Именно на описанных выше методах и будет основан процесс оценки СМК в излагаемой методике.

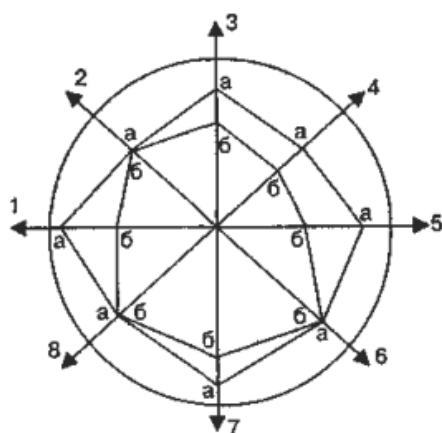


Рис. 1. Циклограмма качества: оси 1–8 – показатели качества; а – желаемые значения; б – реальные значения

Fig. 1. Cyclogram of quality: axes 1–8 – quality parameters; а – desired values; б – actual values

Степень соответствия определяется как разность фигур а и б.

Результаты исследования и их обсуждение

Используя ранее изложенные группы показателей, нами были разработаны критерии оценки СМК, приведенные в табл. 1. Их список может быть расширен исходя из специфики организации.

Дадим некоторые комментарии по таблице. Показатели, характеризующие наличие / отсутствия чего-либо, считаются по принципу «1 – есть, 0 – отсутствует». Экономические показатели высчитываются как изменения в прибыли/издержках при внедрении и выполнении СМК. Показатель степени исполнения положений СМК является сборным и детализируется на каждом предприятии отдельно на критерии, характеризующие прописанные в документации положения.

Следующим шагом идет расчет весовых коэффициентов. Для этого существует множество методов, но самым подходящим для целей данного исследования является метод балльных экспертных оценок. Для этого необходимо выбрать группы экспертов, которые будут проставлять свои оценки весомости показателей по определенной шкале. Наиболее подходящей здесь является десятибалльная. После сбора оценок расчет показателей весомости производится по следующей формуле [22]:

$$\alpha = \frac{S_i}{\sum_{j=1}^n S_j}, \quad (1)$$

где α – показатель весомости;

S_i – среднее арифметическое оценок экспертов по i – показателю.

Расчеты ведутся как внутри групп показателей, так и по всем группам показателей одинаково.

Далее необходимо определить меру согласованности экспертов. Для этих целей применяют формулу коэффициента конкордации

$$X = \frac{12T}{n^2(m^3 - m)}, \quad (2)$$

где X – значение коэффициента конкордации;

T – сумма квадратов отклонений суммы экспертных оценок по i -критерию от среднего арифметического оценок;

n – число экспертов;

m – число критериев.

Мнения считаются согласованными при значении $X > 0,5$.

Таблица 1. Показатели оценки качества СМК

Table 1. QMS assessment indicators

Категория показателя	Наименование показателя
Показатели соответствия СМК регулирующей документации	- наличие необходимой по стандарту документации; - степень задокументированности процессов; - разработка всех необходимых процедур; - степень соответствия отраслевым стандартам; - наличие инструментов проверки качества продукции; - степень полноты регистрируемых данных по качеству
Показатели по потребителю	- степень удовлетворенности потребителя; - степень соответствия ожиданиям потребителя; - удельный вес постоянных клиентов в общей массе клиентов; - динамика числа претензий и жалоб; - процент возврата продукции
Показатели по персоналу	- наличие квалификации у работников; - степень укомплектованности штата; - уровень текучести кадров; - степень удовлетворенности работников; - уровень расходов на переобучение персонала, от общей доли расходов на персонал
Показатели по поставщикам	- уровень сертифицированности поставщиков; - уровень рейтинга поставщиков; - уровень брака в поставках
Показатели по продукту/услуге	- степень соответствия стандартам и регламентам; - процент брака в продукции; - процент стандартизированных и унифицированных комплектующих; - процент ремонта/оказания услуг сервиса продукции, в общей доли реализованной продукции; - уровень эргономичности изделий; - отношение числа патентов на изделия к общему числу видов продукции
Показатели по инфраструктуре	- уровень безопасности рабочей среды; - динамика частоты ремонта оборудования; - доля сертифицированных средств труда; - степень комфортности рабочей среды; - степень обеспеченности рабочей среды
Экономические показатели	- степень влияния СМК на прибыль; - степень влияния СМК на затраты; - уровень затрат на осуществление мероприятий по обеспечению качества; - уровень потерь при несоблюдении СМК
Показатели соответствия СМК разработанной на предприятии документации	- степень выполнения поставленных целей; - степень информированности работников о СМК; - степень исполнения положений СМК; - оценка качества выполнения процесса руководителем процесса

Следующий этап – сбор данных. Для этого необходима полная задокументированность всей деятельности. Сбор осуществляется следующими способами:

- для показателей, связанных с документами, – путем анализа документации;
- для показателей, характеризующих количественные свойства, – путем применения статистических методов сбора;
- для показателей, характеризующих состояние и внешний вид, – путем осмотра и наблюдения. Фиксация производится по балльным шкалам;

- для показателей, характеризующих степень удовлетворения, – путем применения анкет. Форму анкет каждая организация разрабатывает сама, исходя из своей специфики деятельности. Рекомендуется избегать вопросов с развернутым ответом, а использовать балльные шкалы. Только в анкетах, связанных с потребителями, допустимы развернутые ответы (например, что понравилось / не понравилось).

Следующий этап – расчет значений показателей. Дополнительные расчеты требуются для показателей, характеризующих проценты от общего числа, удельный вес, степень влияния и т.п.

Критерии, сводящиеся к определению удельного веса какого-либо события/свойства в общей массе, рассчитываются по формуле

$$R = \frac{Y}{O}, \quad (3)$$

где R – значение критерия;

Y – зарегистрированное число событий/свойств;

O – общее число событий/свойств.

Показатели степени влияния СМК на прибыль и затраты вычисляются по следующим формулам:

$$R_i = 1 - \left(\frac{IZt}{IZp} \right); \quad (4)$$

$$Rp = \left(\frac{Pt}{Pp} \right) - 1, \quad (5)$$

где R_i и R_p – показатели степени влияния СМК на издержки и прибыль соответственно;

IZt и Pt – издержки и прибыль текущего периода;

IZp и Pp – издержки и прибыль предыдущего периода.

При получении отрицательных значений степень влияния равна 0.

Следующий этап – приведение данных критериев к единому виду или их нормализация. Большинство представленных выше критериев подразумевают итоговое значение в диапазоне от 0 до 1. Однако есть ряд показателей, где осуществляется экспертная оценка по балльной шкале. Для их нормализации следует использовать следующую формулу:

$$Y_i = \frac{P_i - \min P_i}{\max P_i - \min P_i} \quad (6)$$

где Y_i – нормализованное значение;

P_i – ненормализованное значение;

$\min P_i$ и $\max P_i$ – минимальное и максимальное значения в шкале.

Далее идет сам процесс оценки СМК. Для

этого сначала вычисляется значение по каждой группе критериев, после итоговое значение оценки СМК.

Для вычислений в группах формула

$$R_g = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot R_i. \quad (7)$$

Для вычисления итоговой оценки формула

$$R_{СМК} = \sum_{g=1}^n \alpha_g \cdot R_g, \quad (8)$$

где R_g и $R_{СМК}$ – значение показателя по группе и значение итоговой оценки;

α_i и α_g – весовые коэффициенты i -показателя и группы показателей;

R_i – значение i -критерия оценки.

Состояние СМК после вычислений оценивается по **табл. 2**.

Таблица 2. Характеристика состояния СМК по значению оценки

Table 2. Description of the QMS state by an assessment value

Значение показателя оценки $R_{СМК}$	Состояние СМК
$0,8 < R_{СМК} < 1$	Отличное
$0,6 < R_{СМК} < 0,8$	Хорошее
$0,3 < R_{СМК} < 0,6$	Удовлетворительное
$0 < R_{СМК} < 0,3$	Неудовлетворительное

Заключение

По итогам проведенного исследования получена готовая методика оценки системы менеджмента качества предприятия, основанная на положениях квалиметрии. Квалиметрические подходы позволяют получить сопоставимые, точные, ясные и простые результаты оценки. Благодаря этому полученная методика легко может быть автоматизирована средствами персональных компьютеров. Она может быть доработана под нужды конкретного предприятия. Таким образом, результаты исследования могут служить основанием для дальнейших научных исследований и разработок в данной области.

Список литературы

1. ISO 9004:2018. Менеджмент для достижения устойчивого успеха организации. Подход на основе менеджмента качества. 04.2018. 59 с.
2. ГОСТ Р ИСО 9000-2015. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. Введ. 2015-11-01. М.: Стандартинформ, 2015. 48 с.
3. ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Системы менеджмента качества. Требования. Введ. 2015-11-01. М.: Стандартинформ, 2015. 23 с.
4. Варжапетян А. Менеджмент качества. Принятие решений о качестве, управляемом заказчиком. 2-е изд. М.: Вузовская книга, 2017. 360 с.

5. Гродзенский С.Я. Менеджмент качества: учеб. пособие. М.: Проспект, 2015. 200 с.
6. Трусова С. В., Тараконова Л.К. Системный подход к совершенствованию менеджмента организаций в современных условиях // Молодой ученый. 2016. №12. С. 1476–1478.
7. Бабанский А.В. Системы непрерывного улучшения продуктов и процессов. Минск: ИП «Экоперспектива», 2009. 237 с.
8. Нежникова Е.В. Проблемы создания и функционирования систем менеджмента качества // Фундаментальные исследования. 2013. № 6-4. С. 958–962.
9. Белоруков А.Э., Василенок А.В., Усик Н.И. Важность системы менеджмента качества на предприятии // Научный журнал НИУ ИТМО. 2016. №4. С. 70–77.
10. Макалов В.И. Проблемы систем менеджмента качества российских организаций в современных условиях // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2015. С. 16–24.
11. Горбунова О.И., Кородюк И.С. Система менеджмента качества предприятий: проблемы внедрения и особенности российского опыта // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2013. №12. С. 317–320.
12. Квалиметрия: методы количественного оценивания качества различных объектов (курс лекций и практических занятий): учеб. пособие / под общ. и науч. ред. д.э.н., профессора Г.В. Астратовой. Сургут: РИО СурГПУ, 2014. 160 с.
13. Азгальдов Г.Г., Костин А.В., Садовов В.В. Квалиметрия: первоначальные сведения. Справочное пособие с примером для АНО «Агентство стратегических инициатив по продвижению новых проектов»: учеб. пособие. М.: Высш. шк., 2011. 143 с.
14. Подольская М.Н. Квалиметрия и управление качеством: лабораторный практикум. Ч. 1. Экспертные методы. Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2011. 80 с.
15. Лашко А.Г. Сущность квалиметрического подхода как научной парадигмы // Современная педагогика: электрон. науч. журн. 2016. № 11. URL: <http://pedagogika.snauka.ru/2016/11/6236> (дата обращения: 22.10.2019).
16. Горьканова А.В. Методический подход к оценке результативности системы менеджмента качества предприятия // Студенческий электрон. науч. журн. 2019. № 6(50). С. 39–43.
17. Матухнов О.С. Сравнительный анализ подходов к оценке эффективности смк на российских предприятиях // Вестник Саратовского государственного социально-экономического университета. 2011. С. 208–211.
18. Искандерова Р.Р. Методика оценки результативности СМК предприятия // Молодой ученый. 2015. №5. С. 278–280.
19. Система добровольной сертификации «Военный Регистр». Методика оценки результативности системы менеджмента качества организации. М., 2012. 17 с.
20. Шмелева А.Н. Качество продукции и качество менеджмента: как оценить? Качественные инструменты оценки операционной эффективности СМК предприятий // Российское предпринимательство. 2010. № 9–1. С. 88–93.
21. Шмелева А.Н. Оценка операционной эффективности системы менеджмента качества. Количественные подходы к оценке операционной эффективности СМК предприятия // Российское предпринимательство. 2010. № 9–2. С. 57–63.
22. Рязанова А.А. Методы экспертного анализа для определения значимости показателей конкурентоспособности качества высшего образования // Современная конкуренция. 2012. №2(32). С. 10–115.

Поступила 18.11.2019; принята к публикации 27.01.2020; опубликована 25.03.2020

Черкасов Дмитрий Алексеевич – магистр 2 курса

Орловский государственный университет имени Ивана Сергеевича Тургенева, Орёл, Россия,

E-mail: chda485@yandex.ru. ORCID 0000-0002-2762-9939

References

1. ISO 9004:2018 Quality management. Quality of an organization. Guidance to achieve sustained success. 04.2018. 59 p.
2. GOST R ISO 9000-2015 Quality management systems. Main provisions and glossary. Introduced on 01.11.2015. Moscow: Standartinform, 2015, 48 p. (In Russ.)
3. GOST R ISO 9001-2015 Quality management systems. Requirements. Introduced on 01.11.2015. Moscow: Standartinform, 2015, 23 p. (In Russ.)
4. Varzhapetyan A. *Menedzhment kachestva. Prinyatie resheniy o kachestve, upravlyaemom zakazchikom* [Quality management. Taking decisions about quality managed by a customer]. 2nd ed. Moscow: University book, 2017, 360 p. (In Russ.)
5. Grodzenskiy S.Ya. *Menedzhment kachestva: uchebnoe posobie* [Quality management: learning aid]. Moscow: Prospect, 2015, 200 p. (In Russ.)
6. Trusova S.V., Tarakanova K.L. A system approach to improvement of quality management of organizations in cur-

- rent conditions. *Molodoy uchenyi* [Young Scientist], 2016, no.12, pp. 1476-1478. (In Russ.)
7. Babanskiy A.V. *Sistemy nepreryvnogo uluchsheniya produktov i protsessov* [Systems of continuous improvement of products and processes]. Minsk: IP Ekoperspektiva, 2009, 237 p. (In Russ.)
 8. Nezhnikova E.V. Problems of creation and functioning of quality management systems. *Fundamentalnye issledovaniya* [Basic Research], 2013, no. 6–4, pp. 958–962. (In Russ.)
 9. Belorukov A.E., Vasilenok A.V., Usik N.I. Importance of the quality management system in the organization. *Nauchnyi zhurnal NIU ITMO* [Scientific journal of NUST ITMO], 2016, no. 4, pp. 70–77. (In Russ.)
 10. Makolov V.I. The problems of quality management systems of Russian organizations in current conditions. *Natsionalnye interesy: priority i bezopasnost* [National interests: priorities and security], 2015, pp. 16–24. (In Russ.)
 11. Gorbunova O.I., Korodyuk I.S. The quality management system of organizations: problems of introduction and features of Russian experience. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2013, no. 12, pp. 317–320. (In Russ.)
 12. Astratova G.V. *Kvalimetriya: metody kolichestvennogo otsenivaniya kachestva razlichnykh obektov. Ucheb. posobie* [Qualimetry: methods of quantitative assessment of the quality of different objects (lectures and practical training): learning aid]. Surgut: RIO SurSPU, 2014, 160 p. (In Russ.)
 13. Azgaldov G.G., Kostin A.V., Sadovov V.V. *Kvalimetriya: pervonachalnye svedeniya. Spravochnoe posobie s primerom dlya ANO «Agentstvo strategicheskikh initsiativ po prodvizheniyu novykh proektov»: ucheb. posobie* [Qualimetry: initial data. The guide with an example for ANO Agency for Strategic Initiatives to Promote New Projects: learning aid]. Moscow: Higher school, 2011, 143 p. (In Russ.)
 14. Podolskaya M.N. *Kvalimetriya i upravlenie kachestvom: laboratornyi praktikum. Ch. 1. Ekspertnye metody* [Qualimetry and quality management: laboratory practice. P.1. Expert methods]. Tambov: Publishing House of FSBEI HPE TSTU, 2011, 80 p. (In Russ.)
 15. Lashko A.G. The essence of a qualimetry approach as a scientific paradigm. *Sovremennaya pedagogika: elektron. nauchn. zhurn.* [Modern Pedagogy: Electronic Academic Journal]. 2016, no. 11. Available at: <http://pedagogika.snauka.ru/2016/11/6236> (Accessed: 22.10.2019). (In Russ.)
 16. Gorkanova A.V. A methodological approach to assessment of efficiency of the quality management system of a company. *Studencheskiy elektron. nauchn. zhurn.* [The Student Electronic Academic Journal], 2019, no. 6(50), pp. 39–43. (In Russ.)
 17. Matukhnov O.S. A comparative analysis of approaches to assessment of QMS efficiency in Russian organizations. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo sotsialno-ekonomicheskogo universiteta* [Vestnik of Saratov State Socio-Economic University], 2011, pp. 208–211. (In Russ.)
 18. Iskanderova R.R. The performance assessment methodology of QMS of a company. *Molodoy uchenyi* [Young Scientist], 2015, no. 5, pp. 278–280. (In Russ.)
 19. The voluntary certification system “Military Register”. *Metodika otsenki rezultativnosti sistemy menedzhmenta kachestva organizatsii* [Methods of assessment of QMS performance in a company]. Moscow, 2012, 17 p. (In Russ.)
 20. Shmeleva A.N. The quality of products and the quality of management: how to assess? The quality tools of assessment of the operational efficiency of companies’ quality management system. *Rossiyskoe predprinimatelstvo* [Russian Entrepreneurship], 2010, no. 9–1, pp. 88–93. (In Russ.)
 21. Shmeleva A.N. Assessment of operational efficiency of the quality management system. Quantitative approaches to the assessment of operational efficiency of the company’s quality management system. *Rossiyskoe predprinimatelstvo* [Russian Entrepreneurship], 2010, no. 9–2, pp. 57–63. (In Russ.)
 22. Ryazanova A.A. The expert analysis methods used to determine a value of competitiveness indicators of the quality of higher education. *Sovremennaya konkurentsia* [Modern competition], 2012, no. 2(32), pp. 106–115. (In Russ.)

Submitted 18/11/2019; revised 27/01/2020; published 25/03/2020

Dmitry A. Cherkasov – Master’s Degree Student

Turgenev Orel State University, Orel, Russia, E-mail: chda485@yandex.ru. ORCID 0000-0002-2762-9939

ЭНЕРГЕТИКА МЕТАЛЛУРГИИ, ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ

METALLURGICAL POWER ENGINEERING, ENERGY SAVING AND ELECTRICAL SYSTEMS

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

УДК 621.982.47

DOI: 10.18503/1995-2732-2020-18-1-71-79



ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИВОДА ИЗГИБО-РАСТЯЖНОЙ МАШИНЫ НЕПРЕРЫВНО-ТРАВИЛЬНОГО АГРЕГАТА СТАНА ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ

Корнилов Г.П., Филатов А.М., Филатова О.А., Храмшин Т.Р., Храмшин Р.Р.

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

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы): в статье проведен анализ формирования натяжений изгибо-растяжной машины (ИРМ) непрерывно-травильного агрегата широкополосного стана холодной прокатки ПАО «ММК». Разработаны математические модели для выявления взаимосвязи действующих электроприводов ИРМ через полосу и сложные планетарные редукторы. **Цель работы:** обеспечение стабильной работы ИРМ за счет корректного задания установок моментов и скоростей электроприводов при различных сортаментах полосы. **Используемые методы:** сбор и обработка экспериментальных данных по распределению натяжения в ИРМ и смежных натяжных станциях путем осциллографирования моментов и скоростей электроприводов; математическое моделирование скоростных и силовых параметров на валах привода ИРМ. **Новизна** заключается в разработке математического описания фактического удлинения полосы в зависимости от диаметров роликов натяжной станции; математическая модель связывает натяжение полосы с заданной толщиной полосы, нагрузками главного привода и привода удлинения. **Результат:** установлено, что фактическое удлинение полосы может меняться в широком диапазоне от 1,5 до 3,1%. Некоторое среднее значение величиной в 2,3% может быть достигнуто при изменении диаметров роликов в достаточно узком диапазоне. Установлено, что изменение диаметра на 1 мм вызывает изменение фактического удлинения приблизительно на 0,1%. На основе анализа изменения заднего и переднего натяжения полосы в функции загрузки двигателей главного привода и привода удлинения получены формулы для расчета натяжения полосы на участке ИРМ. Установлено, что натяжение полосы перед ИРМ напрямую определяется нагрузкой привода удлинения. **Практическая значимость:** полученные зависимости для расчета скоростных и силовых параметров электропривода позволяют скорректировать задания на скорости электроприводов ИРМ таким образом, чтобы поддерживать заданное удлинение и избежать недопустимых нагрузок элементов планетарной передачи при различных сортаментах полосы.

Ключевые слова: непрерывно-травильный агрегат, изгибо-растяжная машина, натяжение полосы, планетарные передачи, электропривод, математическая модель, привод удлинения.

© Корнилов Г.П., Филатов А.М., Филатова О.А., Храмшин Т.Р., Храмшин Р.Р., 2020

Для цитирования

Исследование привода изгибо-растяжной машины непрерывно-травильного агрегата стана холодной прокатки / Корнилов Г.П., Филатов А.М., Филатова О.А., Храмшин Т.Р., Храмшин Р.Р. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т.18. №1. С. 71–79. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-1-71-79>



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

STUDYING DRIVES OF THE TENSION LEVELLER ON THE CONTINUOUS PICKLING LINE OF THE COLD ROLLING MILL

Gennadiy P. Kornilov, Olga A. Filatova, Anatoliy M. Filatov, Timur R. Khramshin, Rifkhat R. Khramshin

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance): The paper analyzes tension formation on the tension leveller (TL) of the continuous pickling line of the wide-strip cold rolling mill at PJSC MMK. Mathematical models were developed to identify a relation between the operating electric drives of TL and the parameters of strips and complex planetary gear-boxes. **Objectives:** To ensure a steady operation of TL due to a correct setting of electric drive torque and speed parameters for various strip grades. **Methods Applied:** Collection and processing of experimental data on the distribution of strip tension in TL and adjacent tension stations by oscillographic testing of torques and speeds of electric drives; mathematical modelling of speed and power parameters on the drive shafts of TL. **Novelty:** It lies in the development of a mathematical description of the actual strip elongation depending on a bridle roll diameter; the mathematical model shows a relation between strip tension and the set strip thickness, between loads of the main drive and the lengthening drive. **Findings:** It was found that the actual strip elongation can vary in a wide range from 1.5% to 3.1%. Some average value of 2.3% can be achieved by changing roll diameters in a fairly narrow range. It was found that a change in diameter of 1 mm causes a change in the actual elongation of approximately 0.1%. By analyzing changes in back and front strip tension in the function of the main drive motor load and the lengthening drive, the authors worked out the formulas to calculate the strip tension on the TL section. It is established that the load of the lengthening drive directly determines the strip tension before entering TL. **Practical Relevance:** The resulting dependencies used to calculate speed and power parameters of electric drives make it possible to correct the set speed of electric drives of TL to maintain the specified elongation and avoid unacceptable loads of planetary gear elements for various strip grades.

Keywords: continuous pickling line, tension leveller, strip tension, planetary gear, electric drive, mathematical model, lengthening drive

For citation

Kornilov G.P., Filatova O.A., Filatov A.M., Khramshin T.R., Khramshin R.R. Studying Drives of the Tension Leveller on the Continuous Pickling Line of the Cold Rolling Mill. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2020, vol. 18, no. 1, pp. 71–79. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-1-71-79>

Введение

Непрерывно-травильный агрегат (НТА) находится в самом начале технологической линии цеха холодного проката. В процессе прохождения через НТА осуществляются следующие процессы: размотка полосы, ломка окалины, сварка концов, снятие грата, травление, промывка, сушка и намотка в рулоны. Одним из компонентов НТА является изгибо-растяжная машина, предназначенная для взрыхления поверхностной окалины и правки профиля полосы [1, 3, 4]. Сор-тамент обрабатываемых полос достаточно широк, максимальная толщина полосы достигает 4 мм. Стабильная работа ИРМ оказывает существенное влияние на работу всего агрегата НТА [2, 5, 7, 10]. Изгибо-растяжная машина изготовлена и поставлена для широкополосного стана холодной прокатки итальянской фирмой Techint. Особенностью ее конструкции (рис. 1) является применение планетарных редукторов в электроприводах натяжных станций (НС). Спустя не-продолжительное время эксплуатации обнару-жен ряд поломок в элементах планетарной пере-

дачи. Основными факторами, вызвавшими по-добную ситуацию, на наш взгляд, могут быть следующие обстоятельства: недостаточный за-пас прочности механического оборудования; некорректная настройка электроприводов при наличии сложной планетарной передачи [6,11].

Целью настоящей статьи является обеспечение стабильной работы ИРМ за счет корректного зада-ния установок моментов и скоростей электропри-водов, при различных сортаментах полосы.

Достижение поставленной цели требует ре-шения следующих задач:

1. Вывод формул, связывающих частоту вращения электроприводов со скоростью полосы на роликах ИРМ.
2. Анализ влияния неравенства диаметров роликов на величину фактического удлинения.
3. Расчет моментов установленных электроприводов в зависимости от натяжения полосы в ИРМ.
4. Анализ изменения заднего и переднего натяжения полосы в функции загрузки двигате-лей главного привода и привода удлинения.

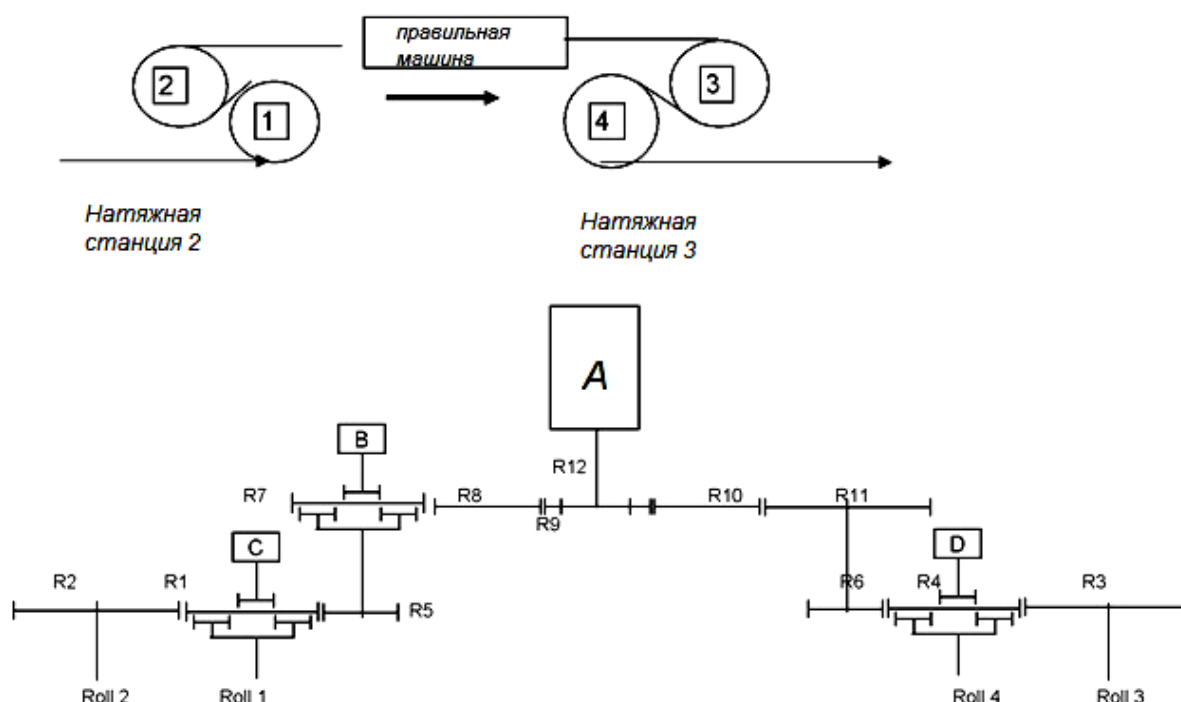


Рис. 1. Схема расположения зубчатых колес редукторов ИРМ:

A – двигатель главного привода; B – двигатель привода удлинения; C – двигатель НС №2; D – двигатель НС №3; 1 – ролик, связанный через планетарный редуктор с двигателем C; 2 – ролик, который расположен на входе в ИРМ; 3 – ролик, расположенный на выходе из ИРМ; 4 – ролик, связанный через планетарный редуктор с двигателем D

Fig. 1. A layout diagram of gear wheels of gearboxes on TL

A is a main drive motor; B is a lengthening drive motor; C is a motor of bridle roll unit 2; D is a motor of bridle roll unit 3; 1 is a roll related to motor C via the planetary gearbox; 2 is a roll located on the section when the strip enters TL; 3 is a roll located on the section when the strip exits TL; 4 is a roll related to motor D via the planetary gearbox

Методы исследования

Планетарная передача состоит из центральной шестерни, внешнего колеса и промежуточного колеса с тремя сателлитами. Самым быстходным является вал центральной шестерни, самым тихоходным – внешнее колесо. Промежуточный вал занимает среднее положение по скорости между ними. Замечательным свойством планетарной передачи является тот факт, что скорость промежуточного вала равна сумме скоростей двух других валов, взятых с коэффициентами, равными передаточным отношениям.

В ИРМ указанное свойство планетарной передачи используется для более точного задания скорости ролика, расположенного до кассет. Действительно, если электропривод роликов выполнить индивидуальным – без связи через планетарный редуктор, то для обеспечения удлинения в 1,0% потребовалось бы регулировать скорость с точностью в 0,1%. Для этого необходим электропривод с диапазоном регулирования скорости 1:1000, что обеспечить практически

весьма затруднительно. В случае, когда используется связь электроприводов через планетарную передачу, требуемый диапазон снижается в 10 раз, т.е. 1:100. Главный электропривод задает 90% скорости заднего ролика, оставшиеся 10% добавляет привод удлинения, причем для изменения удлинения на 0,1% потребуется изменить скорость привода удлинения на 10%.

Таким образом, использование планетарной передачи позволяет снизить требования к электроприводу в отношении точности регулирования скорости.

Рассмотрим более подробно физические основы планетарной передачи. На **рис. 2**, а условно показаны передаточные отношения между центральным и промежуточным валами и внешней шестерней.

Здесь обозначено: $i = \frac{Z_{\text{внешн}}}{Z_{\text{центр}}}$ – передаточное

число, как отношение числа зубьев внешнего колеса к числу зубьев центральной шестерни. Поясним сказанное численным примером. Пла-

нетарная передача НС №3 имеет следующие числа зубьев: $Z_{\text{внешн}} = 72$ (внешнее зубчатое колесо), $Z_{\text{центр}} = 18$ (центральная шестерня).

Передаточное число $i = \frac{72}{18} = 4$, остальные передаточные число показаны на рис. 2,б.

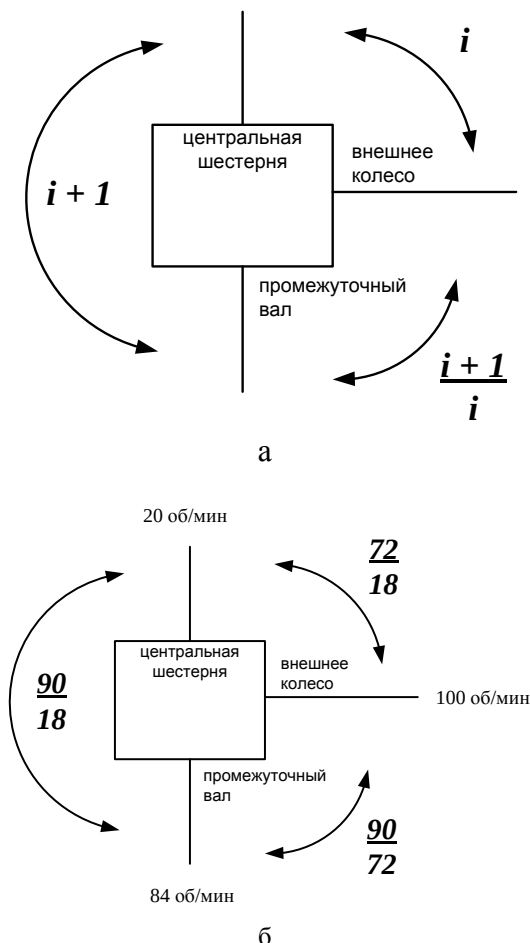


Рис. 2. Передаточные отношения (а) и частоты вращения (б) в планетарном редукторе НС №3

Fig. 2. Gearing ratios (a) and rates of rotation (b) in the planetary gearbox of bridle roll unit 3

Пусть частота вращения центральной шестерни составляет 20 об/мин, частота вращения внешнего колеса 100 об/мин, тогда промежуточный вал будет вращаться со скоростью

$$n_{\text{пром.вал}} = \frac{n_{\text{центр}}}{5} + \frac{n_{\text{внешн}}}{1,25} = \frac{20}{5} + \frac{100}{1,25} = 4 + 80 = 84 \text{ об / мин} \quad (1)$$

где $n_{\text{центр}}$ – частота вращения центральной шестерни, об/мин;

$n_{\text{внешн}}$ – частота вращения внешнего зубчатого колеса, об/мин.

Обратимся теперь к соотношениям между моментами, приложенными к планетарной передаче. Важным свойством данного типа передачи является следующее: если хотя бы один момент на валу равен нулю, то равны нулю и два оставшихся момента; если известен момент на одном валу, то момент на любом другом валу определится через него и передаточное отношение, связывающее эти два вала. Расставим моменты, приложенные к передаче, в возрастающем порядке: наименьший момент прикладывается к валу центральной шестерни, средний по величине момент – к внешнему колесу, наибольший момент – к промежуточному валу. Пусть на валу центральной шестерни действует момент величиной 10 кН·м, тогда к внешнему колесу будет прикладываться момент $10 \cdot 4 = 40$ кН·м, к промежуточному валу – $10 \cdot 5 = 50$ кН·м, где 4 и 5 – передаточные числа между соответствующими валами. На рис. 3 показано распределение моментов применительно к НС №3.

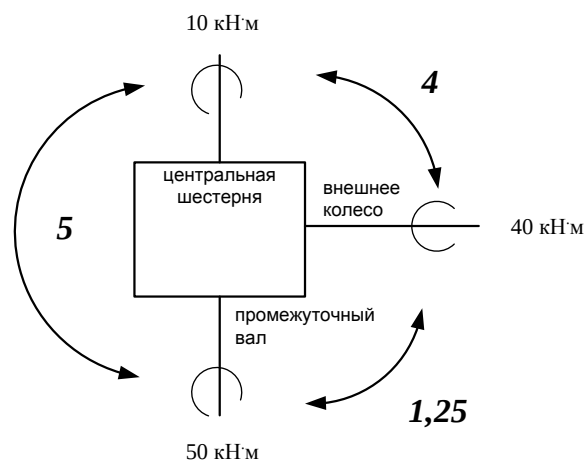


Рис. 3. Соотношения между моментами в планетарном редукторе НС №3

Fig.3. Relations between torques in the gearbox of bridle roll unit 3

На первом этапе работы проведены сбор и обработка экспериментальных данных по распределению натяжения в ИРМ и смежных натяжных станциях путем осциллографирования моментов и скоростей электроприводов. Разработана математическая модель для выявления взаимосвязи действующих электроприводов через полосу и сложные планетарные редукторы [9].

Анализ осциллограмм, полученных при различных сортаментах полосы, показал, что фак-

тическое удлинение полосы изменяется в диапазоне от 2,6–2,9%, в то время как величина заданного удлинения составляет 1,2%. Установлено, что столь существенная разница вызвана тем, что в задании на скорости главного привода и привода удлинения не учтены фактические диаметры роликов 2 и 3 натяжных станций.

Для определения точных настроек электроприводов необходимо определить связь их частоты вращения со скоростью полосы на роликах ИРМ. По известным значениям количества зубьев колес зубчатых и планетарных передач привода ИРМ были рассчитаны передаточные отношения скорости двигателя А и скоростей роликов 1–4 (табл. 1) и передаточные отношения, связывающие скорости двигателей В, С, D и А (табл. 2).

Таблица 1. Передаточные отношения скорости двигателя А и скоростей роликов 1–4

Table 1. Gearing ratios of speed of motor А and speed of rolls 1-4

Ролик	Двигатель А
1	22,259
2	20,150
3	18,683
4	19,617

Таблица 2. Передаточные отношения, связывающие скорости двигателей В, С, D и А

Table 2. Gearing ratios showing relations between speed of motors В, С, D and А

i	Значение
i_{A-B}	9,1409
i_{A-C}	20,150
i_{A-D}	18,683

Умножив передаточные отношения из табл. 1 на 9,1409, получим столбик для двигателя В, умножив на 6,6474, получим столбик для двигателя С, умножив на 12,4433, получим столбик для двигателя D. Расчет полученных передаточных отношений представлен в табл. 3.

Введем обозначения:

V_1, V_2, V_3, V_4 – линейная скорость полосы (м/мин) на 1-м, 2-м, 3-м и 4-м ролике соответственно;

D_1, D_2, D_3, D_4 – диаметры (м) роликов 1-го, 2-го, 3-го и 4-го соответственно,

n_A, n_B, n_C, n_D – частота вращения (об/мин) двигателя А, В, С и D соответственно.

Скорость полосы на 3-м ролике определяется только частотой вращения n_A главного привода

$$V_3 = n_A \cdot \frac{D_3}{5,9469}. \quad (2)$$

Скорость полосы на 4-м ролике с учетом планетарной передачи НС №3 рассчитывается как сумма

$$V_4 = n_A \cdot \frac{D_4}{6,2443} + n_D \cdot \frac{D_4}{77,6994}. \quad (3)$$

Скорость полосы на 2-м ролике зависит от скоростей двигателей А и В

$$V_2 = n_A \cdot \frac{D_2}{6,4140} + n_B \cdot \frac{D_2}{58,6297}. \quad (4)$$

Скорость полосы на 1-м ролике определится как сумма трех слагаемых, зависящих от скоростей двигателей А, В и С:

$$V_1 = n_A \cdot \frac{D_1}{7,0853} + n_B \cdot \frac{D_1}{64,7658} + n_C \cdot \frac{D_1}{47,0988}. \quad (5)$$

Расчетные соотношения для определения скоростей электродвигателей сведены в табл. 4. Здесь $E\%$ – расчетное удлинение полосы.

Анализ влияния неравенства диаметров роликов на величину фактического удлинения

Проанализируем, как неучёт фактических диаметров роликов сказывается на удлинении полосы. Расчет скоростей электродвигателей выполнен по формулам, заложенным в контроллере (без учета диаметров), а величину удлинения подсчитаем с учетом неравенства диаметров роликов. Результаты расчета (табл. 5) показывают, что при заданной величине в 1,2% фактическое удлинение составляет 2,64%, причем скорость полосы не оказывает влияния на величину фактического удлинения.

Фактическое удлинение полосы $E_{23}\%$ определяется через скорости 2-го и 3-го ролика по следующей формуле:

$$E_{23}\% = \frac{V_3 - V_2}{V_2} \cdot 100. \quad (6)$$

Для нахождения удлинения по вышепредставленным формулам необходимо знать скорости роликов. Последние предлагается определять через скорости двигателей ИРМ, которые уже имеются в системе управления. Связь между скоростью ролика и двигателя устанавливают формулы, которые были получены ранее, и приведены в табл. 4.

Структурная схема расчета удлинения $E_{23}\%$ показана на рис. 4. Заметим, что в качестве сигналов по скорости предпочтительно брать сигналы обратных связей, а не заданий на скорость.

Таблица 3. Передаточные отношения между скоростями двигателей и роликов

Table 3. Gearing ratios of speeds of motors and rolls

Ролик	Двигатель А	Двигатель В	Двигатель С	Двигатель Д
1	22,259	203,468	147,965	276,978
2	20,150	184,191	133,947	250,736
3	18,683	170,777	124,192	232,476
4	19,617	179,316	130,402	244,100

Таблица 4. Формулы задания скоростей электродвигателей (с учетом диаметров)

Table 4. Formulas used to set motor speed (with regard to diameters)

$nA = 5,9469 \cdot \frac{V3}{D3}$
$nB = 58,6297 \left(\left(1 - \frac{E\%}{100} \right) - \frac{D2}{D3} \frac{5,9469}{6,4140} \right) \frac{V3}{D2}$
$nC = 47,0988 \cdot 5,9469 \cdot \frac{V3}{D3} \cdot \left(\frac{D2 / D1}{6,4140} - \frac{1}{7,0853} \right) +$ $+ 47,0988 \cdot 58,6297 \left(\left(1 - \frac{E\%}{100} \right) - \frac{D2}{D3} \frac{5,9469}{6,4140} \right) \frac{V3}{D2} \cdot \left(\frac{D2 / D1}{58,6297} - \frac{1}{64,7658} \right)$
$nD = \left(77,6994 - 73,9995 \frac{D4}{D3} \right) \cdot \frac{V3}{D4}$

Таблица 5. Влияние диаметров роликов на удлинение

Table 5. Impact of roll diameters on elongation

Заданное удлинение	%	1.2	1.2	1.2
Линейная скорость полосы (здание)	м/мин	300	200	100
Диаметр 3-го ролика (контроллер)	мм	1250	1250	1250
Диаметр 3-го ролика (фактический)	мм	1245	1245	1245
Диаметр 2-го ролика (фактический)	мм	1227	1227	1227
Частота вращения двигателя А	об/мин	1427.3	951.5	475.8
Частота вращения двигателя В	об/мин	854.8	569.9	284.9
Линейная скорость на 2-м ролике (факт.)	м/мин	290.93	193.95	96.98
Линейная скорость на 3-м ролике (факт.)	м/мин	298.80	199.20	99.60
Фактическое удлинение	%	2.64	2.64	2.64

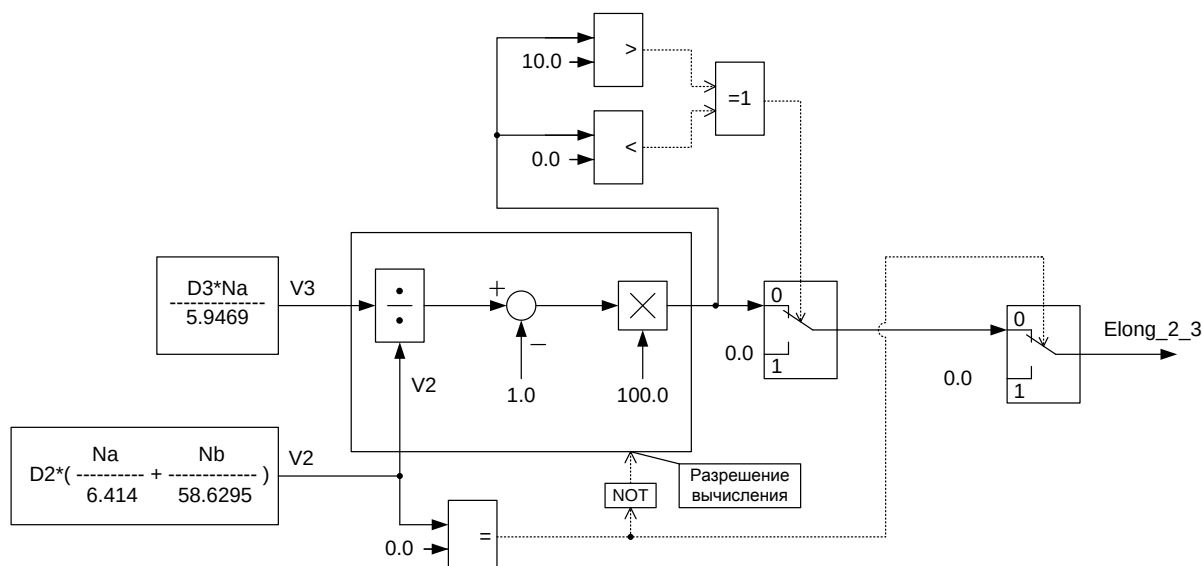


Рис. 4. Структурная схема расчета удлинения по скоростям двигателей главного привода и привода удлинения
Fig. 4. A block diagram to calculate elongation by speeds of motors of the main drive and the lengthening drive

Таблица 6. Фактическое удлинение полосы (%) в функции диаметров 2-го и 3-го роликов

Table 6. Actual strip elongation (in %) as a function of diameters of rolls 2 and 3

Диаметр 3-го ролика, мм	Диаметр 2-го ролика, мм										
	1225	1226	1227	1228	1229	1230	1231	1232	1233	1234	1235
1240	2.4	2.3	2.2	2.2	2.1	2.0	1.9	1.8	1.8	1.7	1.6
1241	2.5	2.4	2.3	2.2	2.2	2.1	2.0	1.9	1.8	1.8	1.7
1242	2.6	2.5	2.4	2.3	2.2	2.2	2.1	2.0	1.9	1.8	1.8
1243	2.6	2.6	2.5	2.4	2.3	2.2	2.2	2.1	2.0	1.9	1.8
1244	2.7	2.6	2.6	2.5	2.4	2.3	2.2	2.2	2.1	2.0	1.9
1245	2.8	2.7	2.6	2.6	2.5	2.4	2.3	2.2	2.2	2.1	2.0
1246	2.9	2.8	2.7	2.6	2.6	2.5	2.4	2.3	2.2	2.2	2.1
1247	3.0	2.9	2.8	2.7	2.6	2.6	2.5	2.4	2.3	2.2	2.2
1248	3.0	2.9	2.9	2.8	2.7	2.6	2.6	2.5	2.4	2.3	2.2
1249	3.1	3.0	2.9	2.9	2.8	2.7	2.6	2.6	2.5	2.4	2.3

Закключение

В результате анализа работы привода ИРМ получены зависимости задания скоростей электродвигателей с учетом диаметров роликов ИРМ. Установлена зависимость удлинения полосы от фактических значений диаметров роликов. Полученные расчетные зависимости ско-

ростных параметров электропривода позволяют корректно выполнить настройку контроллера для получения заданного удлинения полосы. Проведенные исследования позволяют исключить перегрузки элементов планетарной передачи и снизить тем самым риски их разрушения и выхода из строя.

Список литературы

1. Теоретическое исследование процесса прохождения горячекатаной полосы через изгибно-растяжной окатиноломатель непрерывно-третельного агрегата / Д.В. Суфьянов, Н.Н. Огарков, Е.А. Мурзаева, В.В. Курбан, С.В. Денисов // Производство проката. 2012. №10. С. 31–34.
2. Оптимизация параметров настройки машины правки для эффективного разрушения окатины / В.Л. Корнилов, Г.А. Куницын, В.А. Дьяконов, А.П. Буданов, П.П. Полецков // Сталь. 2009. №10. С. 77–78.
3. Девятченко Л.Д., Маяченко Е.П. Operation of an extension and bending machine in scale removal from hot-rolled strip. Steel in translation. 2013. Vol. 43. № 2. P. 59–63.
4. Daniel Magura, Viliam Fedák, Padmanaban Sanjeevikumar, Karol Kyslan. Tension Controllers for a Strip Tension Levelling Line. Advances in Systems, Control and Automation. 2018, pp. 33–44.
5. Полецков П.П. Об изменении показателей профиля и плоскостности тонколистового проката в процессе правки растяжением с изгибом // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2011. №3 (35). С. 60–62.
6. Исследование систем управления непрерывного стана на математической модели / И.А. Селиванов, В.М. Салганик, И.Г. Гун, О.И. Петухова, Ю.И. Мамлеева // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2013. №3 (35). С. 11–14.
7. Совершенствование модели настройки изгибно-растяжного окатиноломателя для автоматизированного проектирования скоростного режима непрерывно-третельного агрегата, совмещенного с прокатным станом / М.И. Румянцев, И.Д. Зелинов, И.О. Новицкий, Ю.А. Зелинова // Технические науки – от теории к практике. 2015. № 53. С. 122–130.
8. Magura, D. Kyslan, K. Padmanaban, S. Fedák, V. Distribution of the Strip Tensions with Slip Control in Strip Processing Lines. Energies, 2019, 12, 3010.
9. Mathieu, N., Potier-Ferry, M., Zahrouni, H. Reduction of flatness defects in thin metal sheets by a pure tension leveler. International Journal of Mechanical Sciences. Volume 122, March 2017, 267–276.
10. Zhang, J., Zhou, C.L., Li, H.B., Zhang, X. C. and Li, M. Influence of Tension Leveling Parameters on the Microstructure and Mechanical Properties of Steel Strip. JOM 69 (2017), 937–941.
11. Nigam, Aditya, Jain, Sandeep. Modelling and Structural Analysis of Planetary Geared Winch. International Journal of Science and Research (IJSR). Volume 4, January 2015, 330–333.

Поступила 19.12.2019; принята к публикации 21.01.2020; опубликована 25.03.2020

Корнилов Геннадий Петрович – д-р техн. наук, профессор

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

E-mail: korn_mgn@mail.ru

Филатова Ольга Анатольевна – канд. техн. наук

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

E-mail: feleodor@mail.ru

Филатов Анатолий Михайлович – канд. техн. наук, доцент

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

E-mail: filam50@mail.ru

Храмшин Тимур Рифхатович – канд. техн. наук

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

E-mail: timur.hramshin@mail.ru

Храмшин Рифхат Рамазанович – канд. техн. наук

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

E-mail: hramshinrr@mail.ru

References

1. Sufyanov D.V., Ogarkov N.N., Murzaeva E.A., Kurban V.V., Denisov S.V. Theoretical research on how hot-rolled strips pass through a tension leveler/scale breaker of a continuous pickling line. *Proizvodstvo prokata* [Manufacturing of rolled products], 2012, no. 10, pp. 31–34. (In Russ.)
2. Kornilov V.L., Kunitsyn G.A., Dyakonov V.A., Budanov A.P., Poletskov P.P. Optimization of the settings of the straightening machine for efficient scale breaking. *Stal* [Steel], 2009, no. 10, pp. 77–78. (In Russ.)
3. Devyatchenko L.D., Mayachenko E.P. Operation of an extension and bending machine in scale removal from hot-rolled strip. *Steel in translation*, 2013, vol. 43, no. 2, pp. 59–63.
4. Daniel Magura, Viliam Fedák, Padmanaban Sanjeevikumar, Karol Kyslan. Tension controllers for a strip tension levelling line. *Advances in Systems, Control and Automation*, 2018, pp 33–44.
5. Poletskov P.P. On the change in profile and flatness parameters of rolled steel sheets during tension leveling. *Vest-*

- nik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2011, no. 3 (35), pp. 60–62. (In Russ.)
6. Selivanov I.A., Salganik V.M., Gun I.G., Petukhova O.I., Mamleeva Yu.I. Research on control systems of a continuous rolling mill using a mathematical model. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2013, no. 3 (35), pp. 11–14. (In Russ.)
 7. Rumyantsev M.I., Zelinov I.D., Novitsky I.O., Zelinova Yu.A. Improving a model for setting the tension leveler/scale breaker for the automated design of speed on a continuous pickling line combined with the rolling mill. *Tekhnicheskie nauki - ot teorii k praktike* [Engineering - from theory to practice], 2015, no. 53, pp. 122–130. (In Russ.)
 8. Magura, D. Kyslan, K. Padmanaban, S. Fedák, V. Distribution of the strip tensions with slip control in strip processing lines. *Energies* 2019, 12, 3010.
 9. Mathieu, N., Potier-Ferry, M., Zahrouni, H. Reduction of flatness defects in thin metal sheets by a pure tension leveller. *International Journal of Mechanical Sciences*, volume 122, March 2017, 267–276.
 10. Zhang, J., Zhou, C.L., Li, H.B., Zhang, X. C. and Li, M. Influence of Tension Leveling Parameters on the Microstructure and Mechanical Properties of Steel Strip. *JOM* 69 (2017), 937–941.
 11. Nigam, Aditya, Jain, Sandeep. Modelling and structural analysis of planetary geared winch. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, volume 4, January 2015, 330–333.

Submitted 19/12/2020; revised 21/01/2020; published 25/03/2020

Gennadiy P. Kornilov – DrSc (Eng.), Professor

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: korn_mgn@mail.ru

Olga A. Filatova – PhD (Eng.)

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: feleodor@mail.ru

Anatoliy M. Filatov – PhD (Eng.)

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: filam50@mail.ru

Timur R. Khramshin – PhD (Eng.)

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: timur.hramshin@mail.ru

Rifkhat R. Khramshin – PhD (Eng.)

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: hramshinrr@mail.ru



АВТОНОМНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ МОДУЛИ ДЛЯ СИСТЕМ ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Пырко С.А.¹, Митиогло А.М.², Ишметьев Е.Н.³

¹ ООО «Бюро Системного Программирования», Москва, Россия

² ПАО МАК «Вымпел», Москва, Россия

³ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

Аннотация. В статье дается краткий анализ проблемы диагностики текущего состояния асинхронных двигателей переменного тока с перечислением основных используемых в настоящее время методов диагностики, включая сигнатурный анализ тока статора, анализ внешнего магнитного поля двигателя, вибродиагностику и мониторинг температуры наиболее ответственных узлов. Отмечено, что в настоящее время в промышленности происходит постепенный переход от концепции «планового обслуживания» технологического оборудования к более эффективной концепции «обслуживания по состоянию». Последняя, относящаяся к базовым технологиям промышленного Интернета вещей (IIoT), предполагает сбор данных о состоянии большого числа электродвигателей, находящихся в эксплуатации, посредством специализированных автономных измерительных модулей (смарт-сенсоров). Указаны базовые требования, предъявляемые к автономным измерительным модулям систем IIoT. Приведена таблица характеристик указанных модулей ведущих мировых производителей. Перечислены и кратко охарактеризованы исследования, выполненные специализированной группой разработчиков в области автономных измерительных модулей, включая моделирование различных неисправностей двигателя, разработку стендового оборудования для имитации неисправностей, исследование различных вариантов крепления модуля к электродвигателю а также исследования, проводимые с целью обеспечения требуемой продолжительности работы модуля в автономном режиме. Описаны основные этапы создания модуля, предназначенного для преобразования в электрические сигналы физических величин, характеризующих состояние контролируемой электрической машины, преобразования указанных сигналов в цифровую форму, накопления и анализа полученных данных с передачей их посредством беспроводного канала связи на специализированный сервер обработки данных. Приведены характеристики разработанного модуля, полученные в результате испытаний.

Ключевые слова: электродвигатель, диагностика, измерительный модуль.

© Пырко С.А., Митиогло А.М., Ишметьев Е.Н., 2020

Для цитирования

Пырко С.А., Митиогло А.М., Ишметьев Е.Н. Автономные измерительные модули для систем диагностики электродвигателей // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т.18. №1. С. 80–89. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-1-80-89>



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

AUTONOMOUS MEASURING MODULES FOR ELECTRIC MOTOR DIAGNOSTIC SYSTEMS

Sergey A. Pyrko¹, Alexey M. Mitioglo², Evgeniy N. Ishmetyev³

¹ LLC Bureau of System Programming, Moscow, Russia

² PJSC Interstate Joint Stock Corporation Vypel, Moscow, Russia

³ Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. The paper provides a brief analysis of the problem of diagnosing a current state of asynchronous AC motors with a list of main currently used diagnostic methods, including stator current signature analysis, external magnetic field analysis, vibration diagnostics and temperature monitoring of the most critical units. It is noted that now in industry there is a gradual transition from the concept of “planned maintenance” of technological equipment to a more efficient concept of condition-based maintenance. The latter, related to the basic technologies of the industrial Internet of things (IIoT), involves acquisition of data on the state of a large number of electric motors in operation, using specialized autonomous measuring modules (Smart Sensors). The basic requirements for autonomous measuring modules of IIoT systems are indicated. The paper contains the table of characteristics of the indicated modules by leading world manufacturers. It lists and briefly characterizes the studies carried out by a specialized team of developers in the field of smart sensors, including the modeling of various motor malfunctions, the development of bench equipment for simulating malfunctions, the study of various options for attaching the module to an electric motor, and the studies carried out to ensure the required battery life of the module offline. The authors described the main stages of creating a module intended for converting physical quantities, characterizing the state of a controlled electric machine, into electrical signals, converting these signals into a digital form, accumulating and analyzing the received data by transmitting them via a wireless communication channel to a specialized data processing server. The characteristics of the developed module obtained as a result of testing are given.

Keywords: electric motor, diagnostics, measuring module.

For citation

Pyrko S.A., Mitioglo A.M., Ishmetyev E.N. Autonomous Measuring Modules for Electric Motor Diagnostic Systems. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2020, vol. 18, no. 1, pp. 80–89. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-1-80-89>

Введение

В настоящее время трехфазный двигатель переменного тока является высокоэффективным преобразователем электрической энергии в механическую. Эти двигатели надежны – их конструкция проста и отработана за более чем сто лет серийного производства. Вместе с тем в силу различных причин выход из строя электродвигателя, находящегося в условиях интенсивной эксплуатации, не является исключительным событием. При этом отметим, неисправности статора, ротора и подшипников являются причиной отказа электродвигателей в 88% случаев [1].

Для диагностики состояния электродвигателей разработаны и используются на практике следующие основные методы:

- **Сигнатурный анализ тока статора**, в основе которого лежит анализ спектральных компонент тока (например, [2]). Данный метод является оптимальным для диагностики электродвигателей, работающих в установившемся режиме, т.е. с малоизменяющейся частотой и нагрузкой [3].

- **Анализ внешнего магнитного поля двигателя** – его аксиальной и радиальной компонент [4]. Основным преимуществом метода является простота реализации, недостатком – сложность моделирования электромагнитных процессов и необходимость учета экранирующего эффекта корпуса двигателя [5].

- **Вибродиагностика**, при которой производится анализ параметров механической вибрации (перемещение, скорость, ускорение) элементов контролируемого двигателя в процессе его функционирования. В вибродиагностике используются различные подходы – как рассмотрение отдельных спектральных компонент параметров вибрации [6], так и анализ их среднеквадратических значений, измеренных в установленном частотном диапазоне.

- **Мониторинг температуры наиболее ответственных узлов.**

Существует также другие методы и подходы (например, [7]), в силу ряда причин (неизученность, сложность реализации и т. д.) используемые реже.

Указанные основные и дополнительные методы обладают неодинаковой эффективностью при диагностике различных неисправностей двигателей. Так, установлено [8], что сигнатурный анализ токов статора наиболее чувствителен по отношению к выявлению неисправных (сломанных) стержней ротора, вибродиагностика – к выявлению неисправностей подшипников. Также в некоторых случаях при диагностике состояния подшипников оптимальным может оказаться (из-за присущей методу высокой помехоустойчивости) анализ спектральных компонент звука (т. е. акустического сигнала), создаваемого вращающимся валом двигателя.

Современное состояние проблемы. Автономные измерительные модули

В настоящее время в промышленности происходит постепенный переход от концепции «планового обслуживания» технологического оборудования к значительно более эффективной концепции «обслуживания по состоянию». Последняя предполагает передачу больших объемов данных от датчиков, установленных непосредственно на оборудовании, их (данных) автоматический анализ и выработку соответствующих решений и прогнозов относительно текущего и будущего состояния контролируемых объектов.

Обслуживание по состоянию и прогнозное обслуживание (в рассматриваемом случае – двигателей) на современном этапе развития техники относятся к базовым технологиям «промышленного Интернета вещей» (IIoT).

В свою очередь, датчики систем IIoT (*Smart Sensors*) [9], обеспечивающие измерение параметров технологического объекта, характеризующих его состояние, должны обладать рядом функций и свойств, основными из которых являются:

- **Беспроводная передача данных на сервер** – из-за невозможности или (наиболее часто) экономической нецелесообразности прокладки проводных линий связи в местах установки модулей.

- **Предварительная обработка данных** непосредственно в модуле – для снижения вычислительной нагрузки на устройства централизованной обработки данных.

- **Минимальное энергопотребление** – для обеспечения длительной работы в автономном по питанию режиме.

- **Устойчивость по отношению к различным возмущающим факторам** (механическим, электромагнитным и т. д.) в месте установки модулей. Очевидно, это налагает определенные требования к конструктивному исполнению модулей.

- **Надежность. Способность работать длительное время без какого-либо обслуживания. Самодиагностика и самокалибровка.**

- **Минимально возможная цена одного модуля.** Очень часто данные устройства являются многофункциональными [10], то есть совмещающими функции, например, измерения вибрации [11, 12], температуры и т. д., – это уменьшает количество модулей в системе и цену системы в целом.

В настоящее время ряд компаний, в том числе ведущие «игроки» на рынке средств автоматизации, представили целый ряд автономных измерительных модулей для систем контроля состояния двигателей (табл. 1).

Этапы разработки изделия 1–02. Исследования, выполненные в ходе разработки

Специализированная группа разработчиков выполняет разработку измерительных модулей для систем диагностики электродвигателей с августа 2017 г. Первоначально работы по данной тематике проводились в инициативном порядке и включали, в основном, исследования по следующим направлениям:

- Моделирование различных неисправностей двигателя для изучения их влияния на спектр его (двигателя) внешнего магнитного поля, включая:
 - неисправности статора: обрыв фазы, межвитковое замыкание;

- неисправности ротора: эксцентриситет, обрыв и трещины стержней, обрыв или ослабление крепления «беличьей клетки».

Моделирование производилось посредством специализированного программного пакета *ANSYS Maxwell*. Верификация результатов моделирования производилась экспериментальным путем – на двигателях, имеющих соответствующие неисправности.

- Разработка и изготовление специализированного стендового оборудования для имитации различных электрических и механических неисправностей двигателей, включая неисправности подшипников, а также для отработки элементов разрабатываемого модуля. Один из разработанных стендов показан на рис. 1.

Таблица 1. Характеристики автономных измерительных модулей

Table 1. Characteristics of autonomous measuring modules

Измерительный модуль	<i>ABB AbilityTM Smart Sensor</i>	<i>WEG Motor Scan</i>	<i>Augury Endpoint 3XS</i>	<i>Endiio Retrofit Box</i>	<i>TestMotors SMS</i>
Источник информации	[13]	[14]	[15]	[16]	[17]
Измеряемые параметры работы электромотора	Вибрация Температура Напряжен. магн. поля Акустич. шум Время	Вибрация Температура Время	Вибрация Температура Напряжен. магн. поля Время	Вибрация Температура Напряжен. магн. поля Время	Вибрация Температура Время
Определяемые дополнительно параметры работы электромотора	Мощность Число оборотов Частота питающей сети Момент нагрузки Скольжение Число пусков за период	Мощность Число оборотов Частота питающей сети Нагрузка, %	н/д	н/д	Мощность Число оборотов Частота питающей сети Момент нагрузки Нагрузка в % Число пусков за период
Определяемые параметры состояния мотора	Общее состояние мотора Уровень вибрации Неиспр. подшипников Эксцентриситет Небаланс ротора Изгиб вала Неиспр. обмоток ротора	Неиспр. подшипников Эксцентриситет Небаланс ротора	н/д	н/д	Неиспр. системы питания, перегрузка Неиспр. обмотки статора Неиспр. ротора Небаланс, несоосность Эксцентриситет Неиспр. подшипников Неиспр. вентиляторов
Измерение вибрации					
Измеряемый параметр	скорость	ускорение	ускорение	ускорение	ускорение
Число осей	3	3	3	н/д	2
Диапазон измерения	0,04–700 мм/с	±16g	±50g	±16g	±40g
Частотный диапазон	10–1000 Гц	н/д	11 кГц	4 кГц (частота дискр.)	1–6000 Гц
Вид сигнала	СКЗ	СКЗ	н/д	СКЗ	БПФ, СКЗ
Измерение температуры					
Диапазон измерения	от –40 до +85 °С	от –40 до +135 °С	от –40 до +135 °С	от –40 до +85 °С	от –40 до +150 °С
Погрешность измерения	не более ±0,5 °С	н/д	не более ±1,0 °С	не более ±1,0 °С	не более ±0,5 °С
Напряженность магнитного поля					
Диапазон измерения	н/д	–	±600 Гаусс	±4,8 мкТл	–
Погрешность измерения	н/д	–	н/д	не более ±0,6 мкТл	–
Частотный диапазон	н/д	–	10 кГц	н/д	–

Беспроводная связь					
Протокол передачи данных	Bluetooth® 4.0	Bluetooth® 4.1	Bluetooth	Endiio ultralow power (проприетарный)	Wi-Fi b/g/n
Диапазон частот	2,4 ГГц	2,4 ГГц	2,4 ГГц	868, 915 МГц	2,4 ГГц
Тип антенны	встроенная	встроенная	встроенная	встроенная	встроенная
Электропитание					
Тип источника	элемент на основе перманганата лития	элемент на основе тионилхлорида	элемент на основе литиум-тионилхлорида	литий-железо-фосфатный аккумулятор	4 литиевых элемента AAA
Автономность по питанию	не менее 5 лет	не менее 3 лет	не менее 3 лет	—	не менее 1 года
Конструктивное исполнение					
Степень защиты	IP66	IP66	IP67	IP41 (IP65 опц.)	IP66
Габаритные размеры корпуса	130x76,7x16 мм	25x44x38 мм	49x49x85 мм	50x40x35 мм	143x65x38 мм
Масса	254 г	60 г	185 г	290 г	500 г



Рис. 1. Стенд для отработки изделия 1–02

Fig. 1. A test bed for item 1–02

- Разработка различных вариантов системы крепления модуля к контролируемому двигателю с целью минимизации искажений, вносимых указанной системой в процесс измерений.

- Исследования, проводимые с целью обеспечения требуемой продолжительности работы модуля в автономном режиме, в частности:

- оптимизация схемотехнических решений и алгоритмов цифровой обработки, процедур обмена данными по радиоканалу – для уменьшения энергопотребления;

- отработка вариантов получения энергии для питания модуля от дополнительных источников, включая различные типы аккумуляторов и батарей, вибропреобразователи и генераторы, приводимые потоком воздуха от вентилятора контролируемого двигателя.

Одновременно с проведением исследований был выполнен значительный объем работ по определению перспективности данной тематики для разрабатывающей группы и поиску перспективных заказчиков, были подготовлены рекламные материалы и выставочные образцы.

На основе действующих нормативных документов были сформированы технические требования к разрабатываемому модулю и системе в целом. Впоследствии, после начала сотрудничества с ПАО «ММК», было сформировано детальное ТЗ на систему и произведена корректировка перечня и содержания выполняемых работ.

Были разработаны и изготовлены макеты модуля, на которых отрабатывались съем измерительных сигналов с работающего двигателя и передача данных по беспроводному каналу – от места установки модуля до сервера. В последнем случае проводились сравнительные испытания эффективности различных протоколов передачи

данных в условиях интенсивных промышленных помех. В ходе испытаний макетов и непосредственно после их завершения были скорректированы и дополнены техническая концепция системы и алгоритмы, используемые для выявления неисправностей. В схемотехнику и конструктив модуля были внесены существенные изменения.

Далее была разработана конструкторская документация для опытных образцов изделия и изготовлены сами образцы.

Предсерийная партия модулей, выпущенная по рабочей документации, проходила испытания в две стадии – в условиях предприятия-изготовителя и у Заказчика в ПАО «ММК». Испытания прошли в целом успешно. В ходе их проведения было установлено полное соответствие испытываемых образцов требованиям ТЗ и пригодность изделия к длительной автономной эксплуатации в условиях металлургического производства.

Техническое описание изделия 1–02

Структурная схема изделия 1–02 приведена на **рис. 2**.

Изделие 1–02 функционирует следующим образом.

Модуль устанавливается непосредственно на корпусе контролируемой электрической машины с помощью специальной системы креплений. Датчики вибрации, температуры и электромагнитного поля смонтированы в оболочке специальной конструкции («капсулы»), частично выведенной за пределы корпуса модуля для обеспечения наиболее плотного прилегания ее контактной поверхности к контролируемой электрической машине.

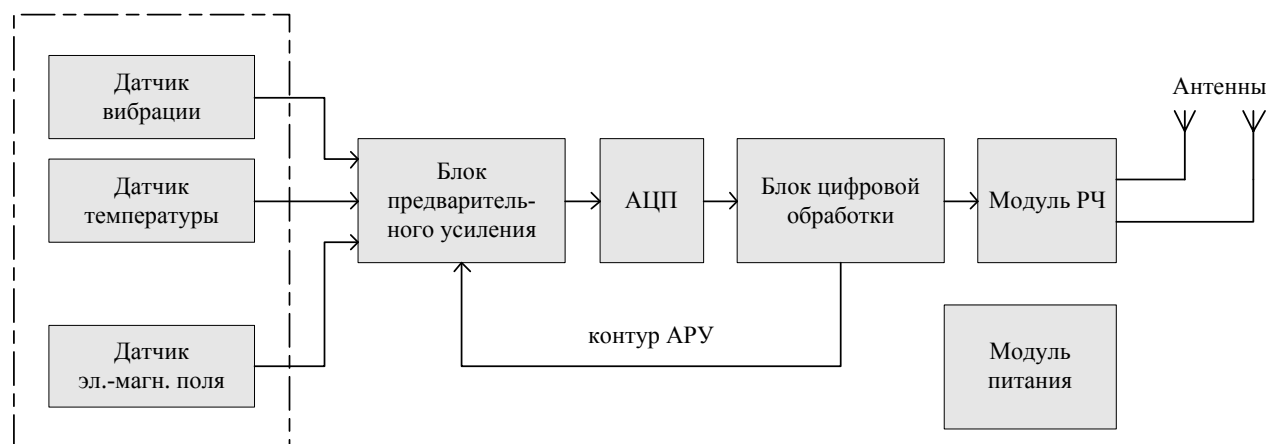


Рис. 2. Структурная схема изделия 1–02

Fig. 2. A block diagram of item 1–02

Сигналы от датчиков поступают в блок предварительного усиления, где производится их усиление и аналоговая фильтрация, и далее – в АЦП. В последнем аналоговые сигналы преобразуются в цифровую форму. Соответствие динамических диапазонов аналоговых сигналов датчиков и входа АЦП обеспечивается посредством системы автоматической регулировки усиления (АРУ).

В блоке цифровой обработки осуществляются необходимые преобразования сигналов, а также накопление полученных данных с их анализом и выработкой диагностических решений о текущем состоянии контролируемых электрических машин. Также в данном блоке вырабатывается сигнал управления для системы АРУ.

Через модуль РЧ и канал беспроводной (на радиочастоте) связи данные передаются на спе-

циализированный сервер обработки данных. В радиоканале используются протоколы передачи данных *Sub 1 GHz* и *Bluetooth*.

Сервер обработки данных производит систематизацию данных с выработкой заключений предсказательного характера об изменении контролируемых параметров с течением времени, а также визуализацию результатов работы программно-технического комплекса в целом.

Разработан также упрощенный вариант изделия 1–02, передающий «сырые» (необработанные) данные на Сервер; при этом анализ текущего состояния контролируемых электрических машин производится посредством ПО, установленного на Сервере.

Разработанный модуль (в базовом варианте) обладает следующими техническими параметрами (табл. 2):

Таблица 2. Параметры изделия 1–02

Table 2. Parameters of item 1–02

Измеряемые параметры	вибрация температура напряженность магнитного поля время
Измерение вибрации:	
число осей	3
диапазон измерения	не менее $\pm 2g$
нелинейность	не более $\pm 0,2\%$ от полной шкалы
температурный коэффициент чувствительности	не более $0,01\%/^{\circ}C$
температурный коэффициент сдвига	не более $1\text{ mg}/^{\circ}C$
частотный диапазон	от 0,5 до 1600 Гц
спектральная плотность шума, приведенная ко входу	не более $250\text{ }\mu\text{g}/\text{Гц}^{0,5}$
Измерение температуры:	
диапазон измерения	от -55 до $+125\text{ }^{\circ}C^1$
погрешность измерения	не более $\pm 0,5\text{ }^{\circ}C$
Измерение напряженности магнитного поля:	
диапазон измерения	8 мТл
частотный диапазон	20 кГц
нелинейность	не более 1 %
пиковое значение шума, приведенное ко входу	не более 0,8 мТл
Параметры радиоканала:	
скорость обмена по интерфейсу <i>Sub 1 GHz</i>	не менее 25 кбит/с
скорость обмена по интерфейсу <i>BLE</i>	не менее 650 кбит/с
тип антенны	встроенная
Время автономной работы	не менее 5 лет ²
Рабочий температурный диапазон	от -30 до $+85\text{ }^{\circ}C$
Температура хранения	от 10 до $+25\text{ }^{\circ}C$
Элемент питания	LS14500CNA (A316/LR06/AA), 4 шт.
Крепление	винтом 1/4" 28UNF непосредственно на корпус или через монтажный клин
Конструктивное исполнение:	
степень защиты	IP67
габаритные размеры корпуса	138x88x25,5 мм
масса	265 г
¹ Ограничен рабочим температурным диапазоном изделия.	
² В режиме измерения и обработки данных с интервалом 4 ч.	

Неисправности электродвигателей, диагностируемые системой, в состав которой входит изделие 1–02 (табл. 3):

Таблица 3. Параметры, диагностируемые системой

Table 3. Parameters diagnosed by the system

Диагностируемые неисправности АД:
асимметрия ротора
небаланс ротора
эксцентриситет воздушного зазора:
искривление ротора
неисправность ротора:
трещины стержней ротора
обрыв стержней ротора
неисправность статора:
межвитковые замыкания
повреждение изоляции
обрыв фазы
неисправности «беличьей клетки»:
обрыв или ослабление крепления стержней беличьей клетки
неисправности тел качения шарикоподшипников:
дефекты внешней дорожки ¹
дефекты внутренней дорожки ¹
ослабление крепления мотора к фундаменту
несоосность валов
Расчётные характеристики работы АД:
СКЗ виброскорости по оси X
СКЗ виброскорости по оси Y
СКЗ виброскорости по оси Z
СКЗ результирующего вектора виброскорости
температура корпуса
скольжение
обороты двигателя
частота питания
потребляемый ток
момент на валу двигателя
затянутый пуск двигателя
¹ при установленных датчиках вибрации непосредственно на подшипниках

Внешний вид изделия 1–02 приведен на рис. 2.



Рис. 2. Внешний вид изделия 1–02

Fig. 2. External view of item 1–02

Выводы

Как итог, можно констатировать, что основным результатом усилий инициативной группы разработчиков в рассматриваемой области явилось создание научно-технического направления, включающего полный цикл исследований, разработки и производства специализированных автономных измерительных модулей для диагностики состояния трехфазных двигателей переменного тока.

Испытания опытных образцов и эксплуатация опытной партии модулей в условиях крупного металлургического предприятия выявили полноту и оптимальность используемых при разработке концепций, алгоритмических и схемотехнических решений. Сравнительные испытания разработанных модулей с изделиями аналогичного назначения подтверждают полное соответствие данной отечественной разработки уровню ведущих мировых компаний-производителей.

Разворачиваемое в настоящий момент широкомасштабное серийное производство разработанных модулей позволит полностью обеспечить потребности российских предприятий оборудованием данного назначения, сделав тем самым еще один шаг к повышению их технологической и экономической эффективности.

Список литературы

1. Thomson W.T, Fenger M. Current signature analysis to detect induction motor faults. IEEE Industry Applications Magazine. 2001, vol. 7, no. 4, pp. 26–34. DOI: 10.1109/2943.930988.
2. Диагностика неисправностей асинхронных двигателей на основе спектрального анализа токов статора / Н.Р. Сафин [и др.] // Энергобезопасность и энергосбережение. 2014. № 3(57). С. 34–39.
3. Henaio H, Capolino G.-A., Fernandez-Cabanas M., Filippetti F., Bruzzese C., Strangas E., Pusca R., Estima J., Riera-Guaspar M., Hedayati-Kia Sh. Trends in Fault Diagnosis for Electrical Machines. A review of diagnostic techniques. IEEE Industrial Electronics Magazine. 2014, vol. 8, no. 2, pp. 31–42. DOI: 10.1109/MIE.2013.2287651.

4. Исследование внешнего магнитного поля асинхронного электродвигателя / В.Е. Вавилов [и др.] // Вестник УГАТУ. 2016. Т. 20, № 1(71). С. 122–127.
5. Henao H, Demian C., Capolino G.-A. A frequency-domain detection of stator-winding faults in induction machines using an external flux sensor. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2003, vol. 39, no. 5, pp. 1272–1279. DOI: 10.1109/TIA.2003.816531.
6. Intesar Ahmed, Manzar Ahmed, Kashif Imran, Muhammad Shuja Khan. Detection of Eccentricity Faults in Machine Using Frequency Spectrum Technique. *Int. J. of Computer and Electrical Engineering*. 2011, vol. 3, no. 1, pp. 111–119. DOI: 10.7763/IJCEE.2011.V3.300.
7. Ewert P. Application of Neural Networks and Axial Flux for the Detection of Stator and Rotor Faults of an Induction Motor. *Power Electronics and Drives*. 2019, vol. 4(39), pp. 201–213. DOI: 10.2478/pead-2019-0001.
8. Weidong Li, Mechefske Ch.K. Detection of Induction Motor Faults: A Comparison of Stator Current, Vibration and Acoustic Methods. *J. of Vibration and Control*. 2006, vol. 12, no. 2, pp. 165–188. DOI: 10.1177/1077546306062097.
9. Murphy, Ch. Choosing the Most Suitable MEMS Accelerometer for Your Application. Part 2. *Analog Dialogue*. 2017, vol. 51, no. 4, pp. 28–33.
10. Medina-García J., Sánchez-Rodríguez T., Gómez Galán J.A., Delgado A., Gómez-Bravo F., Jiménez R. A Wireless Sensor System for Real-Time Monitoring and Fault Detection of Motor Arrays. *Sensors*. 2017, vol. 17, no. 3, article no. 469. DOI: 10.3390/s17030469.
11. Looney M. MEMS Vibration Monitoring: From Acceleration to Velocity. *Analog Dialogue*. 2017, vol. 51, no. 6, pp. 1–5.
12. Murphy Ch. Choosing the Most Suitable MEMS Accelerometer for Your Application. Part 1. *Analog Dialogue*. 2017, vol. 51, no. 4, pp. 5–10.
13. ABB Ability™ Smart Sensor. Condition monitoring for motors. Data Sheet. Available at: <http://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK106930A9867&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch> (Accessed February 10, 2020).
14. WEG Motor Scan. Ready for Industry 4.0. Datasheet. Available at: <https://static.weg.net/medias/h79/h18/WEG-Motor-Scan-50079311-datasheet-en.pdf> (Accessed February 10, 2020).
15. Endpoint 3XS. Assembled product Model No: AC00009. Sub-assembly part No: SA00005. Technical Datasheet. Rev. 11.05.2017. Available at: <https://fccid.io/2AJJIAC00009/User-Manual/Users-Manual-3418172.pdf> (Accessed February 10, 2020).
16. Endiio Retrofit Box. Condition Monitoring. Datasheet. Available at: <https://www.endiio.com/wp-content/uploads/2019/04/endiio-Retrofit-Box-1.pdf> (Accessed February 10, 2020).
17. Smart Motor Sensor (SMS). The condition of all your electric motors at your disposal anytime any-where. Test Motors. Available at: https://gallery.mailchimp.com/5519b9ddd5e5edf5d09d38001/files/0af7b458-82f9-4742-b403-62dbf5f65dc2/R.7_SMART_MOTOR_SENSOR_Ing_VER201906.pdf (Accessed February 10, 2020).

Поступила 13.02.2020; принята к публикации 02.03.2020; опубликована 25.03.2020

Пырко Сергей Анатольевич – главный конструктор

ООО «Бюро Системного Программирования», Москва, Россия

Митиогло Алексей Михайлович – заместитель генерального директора по экономике и финансам

ПАО МАК «Вымпел», Москва, Россия

Ишметьев Евгений Николаевич – д-р техн. наук

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

References

1. Thomson W.T, Fenger M. Current signature analysis to detect induction motor faults. *IEEE Industry Applications Magazine*. 2001, vol. 7, no. 4, pp. 26–34. DOI: 10.1109/2943.930988.
2. Safin N.R. et al. Diagnostics of asynchronous motor faults applying a spectral analysis of stator currents. *Energobezopasnost i energosberezhenie* [Energy Safety and Energy Economy], 2014, no. 3(57), pp. 34–39. (In Russ.)
3. Henao H, Capolino G.-A., Fernandez-Cabanas M., Filippetti F., Bruzzese C., Strangas E., Pusca R., Estima J., Riera-Guasp M., Hedayati-Kia Sh. Trends in fault diagnosis for electrical machines. A review of diagnostic techniques. *IEEE Industrial Electronics Magazine*. 2014, vol. 8, no. 2, pp. 31–42. DOI: 10.1109/MIE.2013.2287651.
4. Vavilov V.E. et al. Studying an external magnetic field of an asynchronous electric motor. *Vestnik UGATU* [Vestnik of Ufa State Aviation Technical University], 2016, vol. 20, no. 1(71), pp. 122–127. (In Russ.)
5. Henao H., Demian C., Capolino G.-A. A frequency-domain detection of stator-winding faults in induction machines using an external flux sensor. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2003, vol. 39, no. 5, pp. 1272–1279. DOI: 10.1109/TIA.2003.816531.
6. Intesar Ahmed, Manzar Ahmed, Kashif Imran, Muhammad Shuja Khan. Detection of eccentricity faults in machine using frequency spectrum technique. *Int. J. of Computer and Electrical Engineering*. 2011, vol. 3, no 1, pp. 111–119. DOI: 10.7763/IJCEE.2011.V3.300.

7. Ewert P. Application of neural networks and axial flux for the detection of stator and rotor faults of an induction motor. *Power Electronics and Drives*. 2019, vol. 4(39), pp. 201–213. DOI: 10.2478/pead-2019-0001.
8. Weidong Li, Mechefske Ch.K. Detection of induction motor faults: a comparison of stator current, vibration and acoustic methods. *J. of Vibration and Control*. 2006, vol. 12, no. 2, pp. 165–188. DOI: 10.1177/1077546306062097.
9. Murphy Ch. Choosing the most suitable MEMS accelerometer for your application. Part 2. *Analog Dialogue*. 2017, vol. 51, no. 4, pp. 28–33.
10. Medina-García J., Sánchez-Rodríguez T., Gómez Galán J.A., Delgado A., Gómez-Bravo F., Jiménez R. A wireless sensor system for real-time monitoring and fault detection of motor arrays. *Sensors*. 2017, vol. 17, no. 3, article no. 469. DOI: 10.3390/s17030469.
11. Looney M. MEMS vibration monitoring: from acceleration to velocity. *Analog Dialogue*. 2017, vol. 51, no. 6, pp. 1–5.
12. Murphy Ch. Choosing the most suitable MEMS accelerometer for your application. Part 1. *Analog Dialogue*. 2017, vol. 51, no. 4, pp. 5–10.
13. ABB AbilityTM Smart Sensor. Condition monitoring for motors. Data Sheet. Available at: <http://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK106930A9867&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch> (Accessed February 10, 2020).
14. WEG Motor Scan. Ready for Industry 4.0. Datasheet. Available at: <https://static.weg.net/medias/h79/h18/WEG-Motor-Scan-50079311-datasheet-en.pdf> (Accessed February 10, 2020).
15. Endpoint 3XS. Assembled product Model No: AC00009. Sub-assembly part No: SA00005. Technical Datasheet. Rev. 11.05.2017. Available at: <https://fccid.io/2AJJIAC00009/User-Manual/Users-Manual-3418172.pdf> (Accessed February 10, 2020).
16. Endiio Retrofit Box. Condition Monitoring. Datasheet. Available at: <https://www.endiio.com/wp-content/uploads/2019/04/endiio-Retrofit-Box-1.pdf> (Accessed February 10, 2020).
17. Smart Motor Sensor (SMS). The condition of all your electric motors at your disposal anytime anywhere. Test Motors. Available at: https://gallery.mailchimp.com/5519b9ddd5e5edf5d09d38001/files/0af7b458-82f9-4742-b403-62dbf5f65dc2/R.7_SMART_MOTOR_SENSOR_Ing_VER201906.pdf (Accessed February 10, 2020).

Submitted 13/02/2020; revised 02/03/2020; published 25/03/2020

Sergey A. Pyrko – Chief Designer

LLC Bureau of System Programming, Moscow, Russia

Alexey M. Mitioglo – Deputy General Director for Economics and Finance

PJSC Interstate Joint Stock Corporation Vympel, Moscow, Russia

Evgeniy N. Ishmetyev – DrSc (Eng.)

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

УВАЖАЕМЫЕ КОЛЛЕГИ!

Мы приглашаем Вас к участию в нашем журнале в качестве авторов, рекламодателей и читателей.

Журнал формируется по разделам, отражающим основные направления научной деятельности ученых МГТУ, в частности:

- РАЗРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ.
- МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ.
- ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ.
- ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО
- ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ.
- МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ.
- СТАНДАРТИЗАЦИЯ, СЕРТИФИКАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ.
- МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ.
- НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ.
- ЭНЕРГЕТИКА МЕТАЛЛУРГИИ, ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ.
- УПРАВЛЕНИЕ, АВТОМАТИЗАЦИЯ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МЕТАЛЛУРГИИ.
- СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И СТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МЕТАЛЛУРГИИ.
- ЭКОЛОГИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ.
- ЭКОНОМИКА, УПРАВЛЕНИЕ И РЫНОК ПРОДУКЦИИ.
- СТРАТЕГИЯ РАЗВИТИЯ, ПОДГОТОВКА И ОБУЧЕНИЕ СПЕЦИАЛИСТОВ.
- ИНФОРМАЦИЯ И др.

ТРЕБОВАНИЯ К СТАТЬЯМ, ПРИНИМАЕМЫМ К ПУБЛИКАЦИИ

1. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ СТАТЬИ (на русском и английском языках)

1.1. Наименование статьи (не более 15 слов). Должно кратко отражать содержание статьи. Не рекомендуется использовать сокращения и аббревиатуры.

1.2. Аффiliation. Указывается фамилия, имя, отчество авторов (транслитерация), ученая степень, звание, должность, индивидуальный авторский идентификатор ORCID, полное название организации (ее официально принятый английский вариант), адрес электронной почты хотя бы одного из авторов.

1.3. Аннотация (200–250 слов). Включает постановку задачи (актуальность работы), цель, используемые методы (эксперименты), новизну, результаты, практическую значимость (направления развития).

Онлайн-перевод запрещается!

1.4. Ключевые слова: от 5 до 15 основных терминов.

2. СТРУКТУРА ОСНОВНОЙ ЧАСТИ СТАТЬИ

2.1. Введение (постановка проблемы)

2.2. Теория, материалы и методы исследования, технические и технологические разработки

2.3. Результаты исследования и их обсуждение

2.4. Заключение (выводы)

2.5. Список литературы (на русском и английском языках)

3. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЬИ

3.1. Рекомендуемый объем статьи – 6–8 стр.

3.2. Текст статьи, сведения об авторах, аннотация, ключевые слова и список литературы представляются на электронном носителе в виде файла, созданного средствами **Microsoft Word**, и распечаткой на стандартных листах бумаги формата А4.

Внимание! Публикация статей является бесплатной. Преимущество опубликования предоставляется авторам и учреждениям, оформившим подписку на журнал.

Статьи проходят обязательное научное рецензирование.

Редакция оставляет за собой право отклонять статьи, не отвечающие указанным требованиям.

По вопросам публикации статей обращаться: 455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Редколлегия журнала «Вестник МГТУ им. Г.И. Носова», М.В. Чукину.

Телефоны: (3519) 29-85-26, 22-14-93.

E-mail: rio_mgtu@mail.ru; vestnik@mgtu.ru (с указанием темы сообщения «Вестник МГТУ»).

При наборе статьи в **Microsoft Word** рекомендуются следующие установки:

- **шрифт** – **Times New Roman**, размер – 11 пт, межстрочный интервал – одинарный, перенос слов – автоматический;

- при вставке **формул** использовать встроенный редактор формул **Microsoft Equation** со стандартными установками, применяется только сквозная нумерация;

- **иллюстрации** не должны превышать ширины колонки (80 мм) или ширины страницы (170 мм). Для подписей элементов на иллюстрации используется шрифт TimesNewRoman 11 пт. Рисунки представляются в редакцию в двух форматах: редактируемом и нередатируемом (*.jpg; качество не менее 300 dpi). В тексте статьи должны быть подрисуночные подписи в местах размещения рисунков. В конце подписи к рисунку точка не ставится. Например:

Рис. 4. Расчётная зависимость $\chi(t) = I_{nt}/I_{n0}$ от времени и удалённости КЗ от выводов асинхронного двигателя

- **таблицы** нумеруются, если их число более одной. Заголовков необходимо, когда таблица имеет самостоятельное значение, без заголовка дают таблицы вспомогательного характера.

3.3. При подготовке рукописи необходимо руководствоваться Международной системой единиц **СИ**.

4. ДОКУМЕНТЫ, ПРИЛАГАЕМЫЕ К СТАТЬЕ

4.1. Экспертное заключение о возможности опубликования.

4.2. Договор.