

ВЕСТНИК

Магнитогорского государственного технического
университета им. Г.И. Носова

2021. Т.19, №4

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

Издается с марта 2003 года

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Председатель редакционной коллегии
В.М. Колокольников (Россия)

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

РЕДАКЦИЯ

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

© ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2021

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

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

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

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

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

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

16+, в соответствии с Федеральным законом №436-ФЗ от 29.12.2010.

Адрес редакции:

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

Адрес издателя:

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

Адрес типографии:

455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», участок оперативной полиграфии
Выход в свет 24.12.2021. Заказ 296. Тираж 500 экз. Цена свободная.

VESTNIK

of Nosov Magnitogorsk State Technical University

2021. Vol.19, no.4

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

PUBLISHED SINCE MARCH, 2003

EDITORIAL BOARD MEMBERS

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

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

EDITORIAL STAFF

Editor-in-Chief O.N. Tulupov

First Deputy Chief Editor M.A. Polyakova

Deputy Chief Editors:

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

Executive Secretary M.V. Shubina

Editor N.P. Boyarova

Technical Editor I.V. Klyunnikova

Translated into English O.E. Sukhikh

© Federal State Budgetary Institution of Higher Education
Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2021

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

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

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

Editorial office:

402, 45/2 Karl Marks prospekt,
Magnitogorsk, Chelyabinsk region, 455000, Russia
Nosov Magnitogorsk State Technical University
Phone: +7 (3519) 221 493.

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

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

Publisher office:

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

Printing office:

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

Publication date: 24.12.2021. Order 296. Circulation: 500. Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

Разработка полезных ископаемых.....	5
<i>Великанов В.С., Мусонов О.С., Панфилова О.Р., Ильина Е.А., Дёрина Н.В.</i> Инструменты предиктивной аналитики в минимизации отказов горнотранспортного оборудования.....	5
<i>Брякин И.В., Бочкарев И.В., Храмшин В.Р.</i> Мультиплицированный способ индукционного зондирования для поиска подземных электропроводящих объектов	16
Литейное производство	29
<i>Гутько Ю.И., Войтенко В.В.</i> Способ контроля параметров жидкостекольной стержневой смеси в процессе ее приготовления и применения	29
<i>Ерохин Ю.В., Пономарев В.С., Захаров А.В., Леонова Л.В.</i> Вещественный состав шлаков производства ферроманганопосфосора из Староуткинского завода.....	36
Технологии обработки материалов.....	45
<i>Гасанов Б.Г., Бабец А.В., Баев С.С.</i> Влияние химического состава на жаростойкость и ударную износостойкость материалов на основе распыленных порошков высокохромистой стали.....	45
<i>Ершова О.В., Медяник Н.Л., Мишурина О.А., Бессонова Ю.А., Багреева К.В.</i> Сравнительный анализ физико-механических свойств биоразлагаемых и синтетических полимеров	56
Материаловедение и термическая обработка металлов	64
<i>Кабалдин Ю.Г., Аносов М.С., Рябов Д.А., Колчин П.В., Шатагин Д.А., Киселев А.В.</i> Исследование влияния режимов 3D-печати на структуру и хладостойкость стали 08Г2С	64
Нanomатериалы и нанотехнологии	71
<i>Щегольков А.В., Щегольков А.В., Комаров Ф.Ф., Парфимович Д.И.</i> Композиционный наноструктурированный материал МУНТ/полиуретан для защиты от электромагнитных излучений	71
Стандартизация, сертификация и управление качеством.....	82
<i>Солдатов В.Г., Вавилин Я.А., Манкевич И.Г.</i> Проблемы и пути внедрения риск-ориентированного мышления	82
<i>Наркевич М.Ю.</i> Метод комплексной количественной оценки качества опасных производственных объектов с использованием S-образных кривых	91

CONTENTS

Mining.....	5
<i>Velikanov V.S., Musonov O.S., Panfilova O.R., Irina E.A., Dyorina N.V.</i> Predictive Analytics Tools in Minimising Mining Equipment Failures	5
<i>Bryakin I.V., Bochkarev I.V., Khramshin V.R.</i> Multiplied Method of Induction Sounding to Search for Underground Electrically Conductive Objects.....	16
Foundry	29
<i>Gutko Yu.I., Voytenko V.V.</i> Monitoring of Sodium Silicate Core Sand Mixture Parameters During Production and Application.....	29
<i>Erokhin Yu.V., Ponomarev V.S., Zakharov A.V., Leonova L.V.</i> Material Composition of Slags Formed when Producing Ferromanganophosphorus at the Staroutkinsky Plant	36
Material Process Engineering	45
<i>Gasanov B.G., Babets A.V., Baev S.S.</i> Influence of a Chemical Composition on Heat Resistance and Impact Wear Resistance of Materials Based on Atomized Powders of High-Chromium Steel	45
<i>Ershova O.V., Medyanik N.L., Mishurina O.A., Bessonova Yu.A., Bagreeva K.V.</i> Comparative Analysis of Physical and Mechanical Properties of Biodegradable and Synthetic Polymers	56
Materials Science and Heat Treatment of Metals	64
<i>Kabaladin Yu.G., Anosov M.S., Ryabov D.A., Kolchin P.V., Shatagin D.A., Kiselev A.V.</i> Study on the Influence of 3D Printing Modes on the Structure and Cold Resistance of Steel Grade 08G2S	64
Nanomaterials and Nanotechnologies	71
<i>Shchegolkov A.V., Shchegolkov A.V., Komarov F.F., Parfimovich D.I.</i> Composite Nanostructured MWCNT/Polyurethane Material for Protection Against Electromagnetic Radiation.....	71
Standardization, Certification and Quality Management.....	82
<i>Soldatov V.G., Vavilin Ya.A., Mankevich I.G.</i> Problems and Ways of Introducing Risk-Based Thinking	82
<i>Narkevich M.Yu.</i> Method of a Comprehensive Quantitative Assessment of the Quality of Hazardous Production Facilities Using S-Shaped Curves	91

**Новые технологические процессы
и оборудование.....98**

*Акинцева А.В., Переверзев П.П.,
Дегтярева-Кашутина А.С.*

Цифровой двойник формообразования
обрабатываемой поверхности нежесткого вала
с эллипсным профилем при круглом
врезном шлифовании98

Дерябин И.П., Токарев А.С.

Снижение трудоемкости обработки отверстий на
основе повышения точности операций
зенкерования сборными инструментами107

**New Technological Processes
and Equipment..... 98**

*Akintseva A.V., Pereverzev P.P.,
Degtyareva-Kashutina A.S.*

Digital twin of a shaping process
for a surface of a non-rigid
shaft with an elliptical profile
processed by plunge grinding 98

Deryabin I.P., Tokarev A.S.

Reducing the Labor Intensity of Hole Machining
by Increasing the Accuracy of Countersinking
Operations with Precast Tools 107

РАЗРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ MINING

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

УДК 622 – 1:[2:331.101.1]

DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-4-5-15



ИНСТРУМЕНТЫ ПРЕДИКТИВНОЙ АНАЛИТИКИ В МИНИМИЗАЦИИ ОТКАЗОВ ГОРНОТРАНСПОРТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Великанов В.С.^{1,2}, Мусонов О.С.¹, Панфилова О.Р.², Ильина Е.А.², Дёрина Н.В.²

¹Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

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

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Современный этап развития мировой горнодобывающей промышленности определяется рядом ключевых факторов в достижении высоких технико-экономических показателей, а именно комплексным решением теоретических и прикладных проблем в горной сфере, в контексте реализации основных подходов Индустрии 4.0. Перспективным с точки зрения экономических показателей и относительной возможности безопасной добычи сырьевых ресурсов на ближайшую перспективу останется открытый способ извлечения полезных ископаемых. Анализ статистических данных эксплуатации горнотранспортного оборудования на горных предприятиях Российской Федерации и научно-технической литературы определил, что отсутствуют значительные изменения в сокращении количества простоев основного технологического оборудования. Уменьшение количества отказов, а соответственно, и простоев может быть достигнуто, кроме обновления и оптимизации парков технологического оборудования, реализацией на горнодобывающих предприятиях, системы, позволяющей минимизировать процент отказов горнотранспортного оборудования. **Цель исследования.** В исследовании предпринимается попытка обосновать способы использования инструментов предиктивной аналитики с целью минимизации отказов горнотранспортного оборудования. **Используемые методы.** Для установления показателей надежности карьерных экскаваторов, эксплуатируемых на горных предприятиях УрФО, использована методология теории надежности, в частности порядок расчета показателей надежности нерезервированных систем, методы предиктивной аналитики. **Новизна.** Показана возможность реализации методов и инструментов предиктивной аналитики в уменьшении отказов горнотранспортных машин. **Результат.** Разработана структура дерева отказов карьерного гусеничного экскаватора с составлением графологической схемы. **Практическая значимость.** Прогнозирование остается необходимым шагом к предупреждению отказов горнотранспортного оборудования. Внедрение на горнодобывающих предприятиях современной эффективной системы прогнозирования изменений в состоянии оборудования является ключевым инструментом для минимизации простоев горного оборудования, увеличения срока службы оборудования, снижения стоимости содержания оборудования.

Ключевые слова: добыча, предиктивная аналитика, карьерный экскаватор, оборудование, отказ, элемент.

© Великанов В.С., Мусонов О.С., Панфилова О.Р., Ильина Е.А., Дёрина Н.В., 2021

Для цитирования

Инструменты предиктивной аналитики в минимизации отказов горнотранспортного оборудования / Великанов В.С., Мусонов О.С., Панфилова О.Р., Ильина Е.А., Дёрина Н.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №4. С. 5–15. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-4-5-15>



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

PREDICTIVE ANALYTICS TOOLS IN MINIMISING MINING EQUIPMENT FAILURES

Velikanov V.S.^{1,2}, Musonov O.S.¹, Panfilova O.R.², Ilina E.A.², Dyorina N.V.²

¹Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

²Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The current stage of global mining industry development is determined by a number of key factors in achieving high technical and economic performance, namely a comprehensive solution of theoretical and applied problems in the mining sector, in the context of implementing the main approaches to Industry 4.0. In terms of economic performance and the relative feasibility of safe extraction of raw materials, the open-pit mining method will remain promising for the near future. The statistical data analysis of mining transport equipment operation at mining enterprises of the Russian Federation and scientific and technical literature has defined that there are no significant changes in idle time reduction for the basic technological equipment. A reduction in failures and, consequently, downtime can be achieved, apart from the renovation and optimisation of the equipment fleets, by implementing the system, reducing the percentage of mining transport equipment breakdowns to minimum, at mining enterprises. **Objectives.** The study seeks to justify the use of predictive analytics tools to minimise failures of mining transport equipment. **Methods Applied.** To establish reliability indexes of open-pit excavators operated at mining enterprises of the Ural Federal District, the authors used the reliability theory methodology was used, in particular, the procedure for calculating reliability indexes of non-redundant systems and methods of predictive analytics. **Originality.** The authors have shown that how predictive analytics methods and tools could be applied to decrease failures of mining transport machines. **Result.** A failure tree structure, including a graphological scheme, has been developed for a crawler excavator in open-cast mining. **Practical Relevance.** Forecasting remains a necessary step for prevention of mining transport equipment failures. Introduction of a modern efficient system to forecast the changes in the equipment state is a key tool used to minimize idle time of mining equipment, increase equipment service life, and reduce the equipment maintenance cost at mining enterprises.

Keywords: mining, predictive analytics, open-pit excavator, equipment, failure, element.

For citation

Velikanov V.S., Musonov O.S., Panfilova O.R., Ilina E.A., Dyorina N.V. Predictive Analytics Tools in Minimising Mining Equipment Failures. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021, vol. 19, no. 4, pp. 5–15. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-4-5-15>

Введение

В процессе добычи полезных ископаемых важное значение имеют мониторинг горного оборудования (машин) и анализ интенсивности отказов оборудования и машин, задействованных в технологической цепи добычи. Карьерный экскаватор – основное технологическое оборудование, реализующее функции выемки и погрузки горной массы в зависимости от физико-механических свойств горных пород. На современном этапе развития открытых горных работ наибольшее распространение в основном получили карьерные гусеничные экскаваторы (ЭКГ) и экскаваторы гидравлические (ЭГ). В научно-технической литературе [1–5] достаточно подробно представлены и описаны конструктивные схемы и область применения того или иного типа машины. Современный экскаватор – доста-

точно сложная и технологичная машина, и в зависимости от типоразмера его стоимость значительно изменяется. Точные данные по конечной стоимости отечественных образцов экскаваторов в рекламной продукции заводов-изготовителей практически отсутствуют. По оценкам экспертов, она может колебаться в достаточно широком диапазоне – от 250 до 800–900 млн руб. Очевидно, что простои такой дорогой машины накладывают значительную экономическую нагрузку на горное предприятие и в конечном итоге оказывают влияние на себестоимость готовой продукции.

По результатам анализа статистических данных работы горного оборудования на карьерах и разрезах Российской Федерации (РФ) и научно-технической литературы определено, что отсутствуют значительные изменения в сокращении числа простоев основного технологического

оборудования, уровень использования экскаваторов на горных предприятиях УрФО составляет 70% календарного времени [6]. Уменьшение количества простоев может быть достигнуто, кроме обновления и оптимизации парков экскаваторов, путем создания и внедрения на горнодобывающих предприятиях РФ, системы, позволяющей минимизировать процент отказов горно-транспортного оборудования на основе предиктивной аналитики.

Предиктивная аналитика – это инструмент для анализа статистически значимых и объективных данных, который помогает строить точные прогнозы для принятия решений. Как отмечается в ряде аналитических отчетов, предиктивная аналитика для получения прогноза использует данные о характеристиках оборудования, его использовании, внешних воздействиях, состоянии среды функционирования [7, 8]. Так, в отчете компании McKinsey отмечается, что на производстве использование инструментов предиктивной аналитики уменьшает простой технологических машин до 50% и увеличивает срок эксплуатации на 40%. Вместе с тем в экспертном заключении Zion Market Research указывается, что рынок предиктивной аналитики к 2022 году достигнет 10,9 млрд долл. при темпе роста в год 21% (GAGR) [8, 9].

Определение показателей надежности является сложной математической и логико-концептуальной задачей. Вопросами оценки надежности и качества горных машин посвящены работы Г.И. Солода, В.Н. Гетопанова, В.М. Рачека, Я.М. Радкевича, М.С. Островского, Б.И. Лактионова, С.П. Карасева, Э.Г. Щербины, А.Г. Фролова и других ученых [10–17].

Развитию системных взглядов по вопросам отказов горного оборудования посвящены зарубежные исследовательские работы следующих авторов: Morin C.R., Packer K.F., Slater J.E., Harish Kumar N.S., Choudhary R.P., Murthy Ch.S.N. и других [18–26].

В теории надежности решению задач по прогнозированию отказов оборудования уделяется особое внимание, особенно на этапе эксплуатации в конкретных условиях применения. Вопросы оценки и прогнозирования остаточного ресурса имеют важное значение при организации технического обслуживания и ремонта. С середины XX века техническое обслуживание в горнодобывающей промышленности было построено по системе планово-предупредительных ремонтов (ППР), которая была разработана на ос-

нове обобщения среднестатистических данных по всей горнодобывающей промышленности для идентичного горного оборудования. Для плановой экономики данный подход был оправдан и достаточно прогрессивен, так как позволял для достаточно большого количества однотипных горных машин (буровые станки типа СБШ, или карьерные экскаваторы ЭКГ-5, ЭКГ-8, ЭКГ-10 и др.) регламентировать объем и сроки ремонтных работ, а также иметь необходимый резерв запасных частей и узлов. При этом не учитывается различная наработка, горно-геологические условия эксплуатации, знакопеременные нагрузки и, как следствие, различный уровень износа конкретной единицы горного оборудования, что в конечном итоге приводит к завышенному расходу материальных ресурсов. Поэтому дальнейшие исследования в области минимизации отказов горнотранспортного оборудования являются актуальными, так как на их основании можно принять правильное решение о необходимости вывода его в ремонт либо о продлении эксплуатации на определенный период.

Полученные результаты и их обсуждение

В контексте рассматриваемой проблематики публикации, прежде всего, необходимо пояснить понятие «система». Понятие «система» трактуется учеными по-разному. На наш взгляд, наиболее полное и содержательное определение – это определение «сложной системы» – системы, состоящей из множества взаимосвязанных и взаимодействующих компонентов (подсистем), представляющих собой устойчивое единство и целостность, и вследствие чего она приобретает новые свойства и закономерности, которые отсутствуют на подсистемном уровне и не могут быть сведены к свойствам подсистемного уровня. Что касается системы с элементами предиктивной аналитики, то она характеризуется как совокупность избирательно-вовлеченных компонентов, которые взаимодействуют между собой с целью эффективной эксплуатации экскаватора при достижении минимального уровня отказов. На сегодняшний день методология по созданию данной системы описана разрозненно и ориентирована на решение узконаправленных и локальных задач. Слабо разработаны критерии и методики, позволяющие оценивать эффективность эксплуатации карьерных экскаваторов и учитывать особенности функционирования в конкретных условиях эксплуатации в процессе экскавации горной массы. Эффективность рабо-

ты экскаватора с минимальным количеством отказов достигается, прежде всего, за счет реализации комплекса целенаправленных воздействий. Данные воздействия обеспечивают заданную эксплуатационную производительность и выступают одним из определяющих факторов, определяющих качество и эффективность управления экскаватором согласно конкретным горно-геологическим условиям карьера [6, 10].

Современное исполнение карьерного гусеничного экскаватора включает в себя: рабочее оборудование, рабочие механизмы, ходовое оборудование, поворотную платформу и силовое оборудование. Рабочее оборудование расположено в передней части поворотной платформы экскаватора, с помощью которого он осуществляет процесс экскавации горной массы, поднимает ее, зачерпывает и перегружает. Элементами рабочего оборудования экскаватора карьерного гусеничного являются ковш, рукоять, стрела с головными блоками и пятой, балансир, подвеска ковша, стреловой полиспафт, подъемный канат (рис. 1).

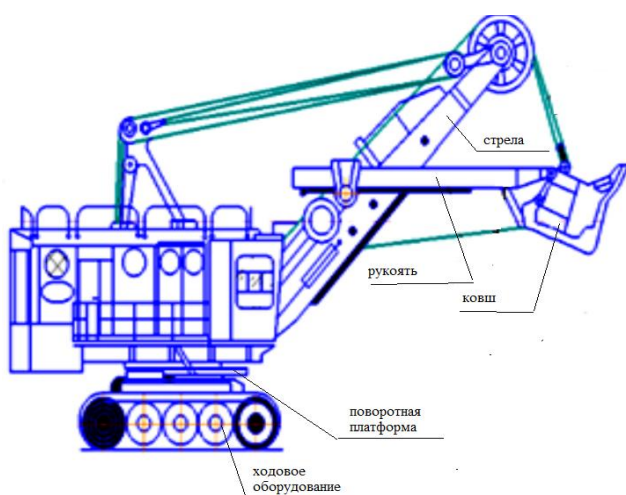


Рис. 1. Карьерный гусеничный экскаватор
Fig. 1. Open-pit crawler excavator

В процессе эксплуатации карьерных экскаваторов отказы возникают по причине множества условий и факторов: недостатки конструкции систем и агрегатов приводят к отказам в их работе; нарушения норм эксплуатации, например превышение проектных нагрузок; ошибки в работе машинистов и обслуживающего персонала; внешние условия и факторы и пр. В табл. 1 представлены основные дефекты металлоконструкций экскаваторов, влияющие на возможность возникновения отказов.

Таблица 1. Возможные дефекты металлоконструкций карьерных экскаваторов

Table 1. Possible defects in steel structures of open-pit excavators

Агрегат	Дефект
Подъемный механизм	Износ тормозных шкивов лебедки. Повышенный износ ручьев, заострение гребней барабанов лебедки
Напорный механизм	Повышенный износ ручьев, заострение гребней барабанов лебедки
Поворотная платформа	Трещины: - по сварным швам нижнего листа платформы и постели верхнего рельса; - по сварным швам постели подъемной лебедки; - нижнего листа площадки крепления редукторов поворота; - основного металла вертикальных стенок (наружных и внутренних), выходящие на края окон осмотра; - по основному металлу и ремонтным сварным швам нижнего листа платформы, в районе ступиц поворотных шестерен; - деформации силовых элементов рабочих площадок
Ходовой механизм	Износ кулаков ведущих колес. Дефекты опорных колес. Трещины на корпусе ходовой тележки. Трещина гусеничных рам в районе натяжных окон
Стрела	Трещины: - по основному металлу проушин крепления нижней секции на платформе; - по основному металлу и сварным швам поперечины нижней секции
Подвеска ковша	Трещины: - на корпусе уравнительного блока; - на коромысле; - на спицах шкива уравнительного блока

На рис. 2 представлен анализ отказов карьерных экскаваторов по основным механизмам на горнодобывающих предприятиях УрФО. Электромеханическое оборудование карьерного экскаватора при определении категории отказа рассматривается как единая система, состоящая из двух основных компонентов: механической и электрической.

Для установления показателей надежности карьерных экскаваторов, эксплуатируемых на горных предприятиях УрФО, воспользуемся методологией теории надежности, в частности, порядком расчета показателей надежности нерезервированных систем. Система считается нерезервированной, если отказ ее отдельного эле-

мента приводит к отказу всей системы. В этом случае остальные элементы системы прекращают свое функционирование [27–30].

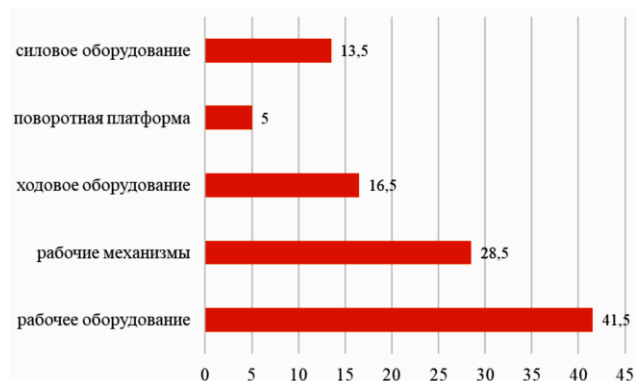


Рис. 2. Распределение отказов карьерных экскаваторов по основным механизмам
Fig. 2. Distribution of open-pit excavator failures by main machinery

В табл. 2 представлены виды законов распределения и их параметры [6].

Таблица 2. Законы распределения времени до отказа элементов и их параметры

Table 2. Time-to-failure distribution and its parameters

Элементы системы	Время наблюдения	Количество случайных величин в ряде	Интенсивность отказов $\lambda \cdot 10^{-3}$, 1/ч	Средняя наработка на отказ t_0 , ч	Закон распределения
Механическая	17520	627	30,3	32,9	Экспоненциальный
Электрическая	17520	640	78,1	12,8	Экспоненциальный

Важно определить стартовые моменты распределений – математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение для каждого элемента и установить показатели надёжности:

- вероятность безотказной работы всех элементов и системы;
- вероятность отказа всех элементов и системы;
- плотность распределения времени безотказной работы всех элементов и системы;
- среднее время безотказной работы системы [11].

Поскольку решение многих задач теории надежности связано с большим объемом однотипных вычислений, в ряде случаев целесообразно пользоваться системой Microsoft Excel. Использование данной системы позволяет существенно сократить время решения задачи и исключает технические ошибки в процессе вычислений.

С целью расчёта показателей, зависящих от времени (вероятности безотказной работы, плотности распределения времени безотказной работы и интенсивности отказов), необходимо создать таблицы, в левой колонке расположить ряд значений времени t , для каждого из которых эти показатели будут вычислены. Шаг выбирается с 10-ю отличными от нуля значениями показателей надёжности. Система Microsoft Excel содержит статистические функции, интегрирующиеся в ячейки таблицы при помощи мастера функций. Это характерно для большинства законов распределения времени безотказной работы (табл. 3–6).

Таблица 3. Начальные моменты распределения времени безотказной работы

Table 3. Initial points in the uptime distribution

Параметр	Элементы системы	
	Механическая	Электрическая
	Exp $(30,3 \cdot 10^{-3})$	Exp $(78,1 \cdot 10^{-3})$
m	33	13
σ	33	13

Таблица 4. Вероятности безотказной работы элементов и системы

Table 4. Non-failure probabilities of elements and systems

Время t , ч	Элементы системы		Система
	Механическая	Электрическая	
	Exp $(30,3 \cdot 10^{-3})$	Exp $(78,1 \cdot 10^{-3})$	
0	1,0000	1,0000	1,0000
100	0,9702	0,9249	0,8973
200	0,9412	0,8554	0,8051
300	0,9131	0,7911	0,7224
400	0,8859	0,7317	0,6482
500	0,8594	0,6767	0,5816
600	0,8338	0,6259	0,5218
700	0,8089	0,5789	0,4682
800	0,7847	0,5354	0,4201
900	0,7613	0,4951	0,3770
1000	0,7386	0,4579	0,3382

На основании данных, содержащихся в табл. 4–6, построены графики, отражающие изменение показателей надёжности элементов и системы во времени. Рис. 3–5 демонстрируют примеры таких графиков. На графиках по оси абсцисс откладывается время t в часах, а по оси ординат соответственно вероятность безотказ-

ной работы, вероятность отказа, плотность распределения времени безотказной работы.

Таблица 5. Вероятности отказа элементов и системы
Table 5. Failure probabilities of elements and the system

Время $t, \text{ч}$	Элементы системы		Система
	Механическая	Электрическая	
	$\text{Exp}(30,3 \cdot 10^{-3})$	$\text{Exp}(78,1 \cdot 10^{-3})$	
0	0,0000	0,0000	0,0000
100	0,0298	0,0751	0,1027
200	0,0588	0,1446	0,1949
300	0,0869	0,2089	0,2776
400	0,1141	0,2683	0,3518
500	0,1406	0,3233	0,4184
600	0,1662	0,3741	0,4782
700	0,1911	0,4211	0,5318
800	0,2153	0,4646	0,5799
900	0,2387	0,5049	0,6230
1000	0,2614	0,5421	0,6618

Таблица 6. Плотность распределения времени безотказной работы элементов и системы
Table 6. Density distribution of component and system uptime

Время $t, \text{ч}$	Элементы системы		Система
	Механическая	Электрическая	
	$\text{Exp}(30,3 \cdot 10^{-3})$	$\text{Exp}(78,1 \cdot 10^{-3})$	
0	3,03E-04	7,81E-04	1,08E-03
100	2,94E-04	7,22E-04	9,73E-04
200	2,85E-04	6,68E-04	8,73E-04
300	2,77E-04	6,18E-04	7,83E-04
400	2,68E-04	5,71E-04	7,03E-04
500	2,60E-04	5,29E-04	6,30E-04
600	2,53E-04	4,89E-04	5,66E-04
700	2,45E-04	4,52E-04	5,08E-04
800	2,38E-04	4,18E-04	4,55E-04
900	2,31E-04	3,87E-04	4,09E-04
1000	2,24E-04	3,58E-04	3,67E-04

В первой части статьи было показано, что перспективным направлением в прогнозировании отказов электромеханического оборудования карьерного экскаватора являются методы на основе предиктивной аналитики.

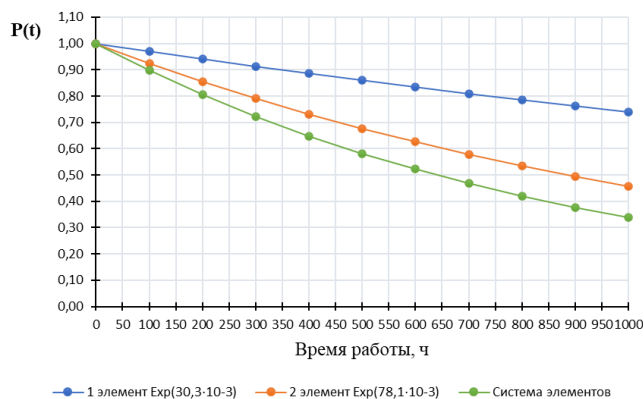


Рис. 3. Зависимость вероятности безотказной работы элементов и системы от времени
Fig. 3. Dependence of component and system non-failure probability on time

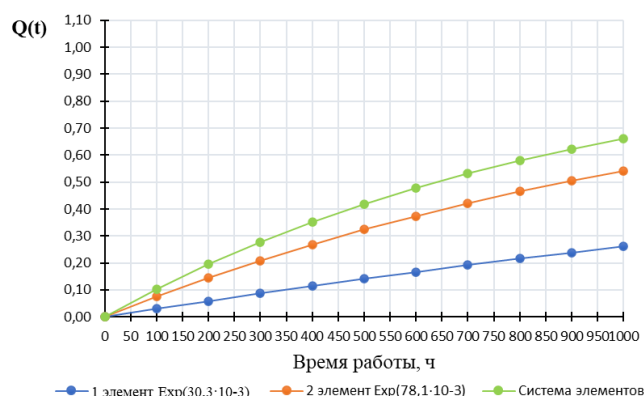


Рис. 4. Зависимость вероятности отказа элементов и системы от времени
Fig. 4. Dependence of component and system failure probability on time

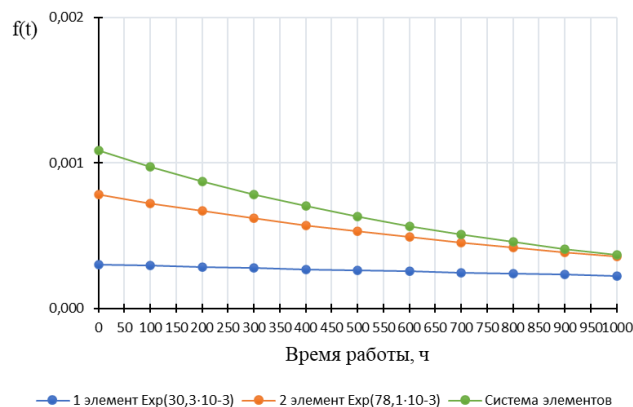


Рис. 5. Зависимость плотности распределения времени до отказа элементов и системы от времени
Fig. 5. The distribution density dependence of the time to failure of elements and the system on time

Одним из подходов в реализации методов предиктивной аналитики является анализ дерева отказов. Дерево отказов (аварий, происшествий, последствий, нежелательных событий)

представляет собой многоуровневую графологическую структуру причинных взаимосвязей, полученных в результате прослеживания опасных ситуаций в обратном порядке для того, чтобы отыскать возможные причины их возникновения [6].

К основным достоинствам метода можно отнести следующие факторы: в явном виде демонстрируются ненадежные места рассматриваемой системы; осуществляется качественный или количественный анализ надежности системы; определяется возможность для специалистов сосредотачиваться на конкретных отказах системы поочередно; дается подробный анализ поведения системы и взаимодействия ее элементов в процесс эксплуатации.

К ограничениям дерева отказов относятся: значительные временные затраты; схема дерева отказов строится на основе традиционной (булевой) логики, демонстрирующей только два состояния: рабочее и нерабочее; не учитывается частичный отказ элементов; от специалистов по надежности требуется глубокое понимание системы и конкретный анализ только одного опре-

деленного отказа в каждом конкретном случае; дерево отказов описывает систему в установившемся режиме.

Разработка структуры дерева отказов карьерного экскаватора характеризуется составлением графологической схемы, включающей два типа элементов – событие и логический символ. Верхний уровень дерева отказов описывает анализируемый отказ экскаватора, нижний указывает на возможные причины возникновения отказа. Далее события описываются на более низком уровне путем отдельного анализа каждой возможной причины. События связываются логическими символами «и» или «или». Символ «и» применяется в том случае, когда выходное событие происходит в результате всех входящих событий. Символ «или» применяется в случае, если осуществление выходного события происходит минимум одно из входных. В результате построения дерева отказов экскаватора выявлены основные комбинации отказов электрической и механической подсистем экскаватора, ошибки персонала и внешних воздействий, приводящие к основному событию (рис. 6).

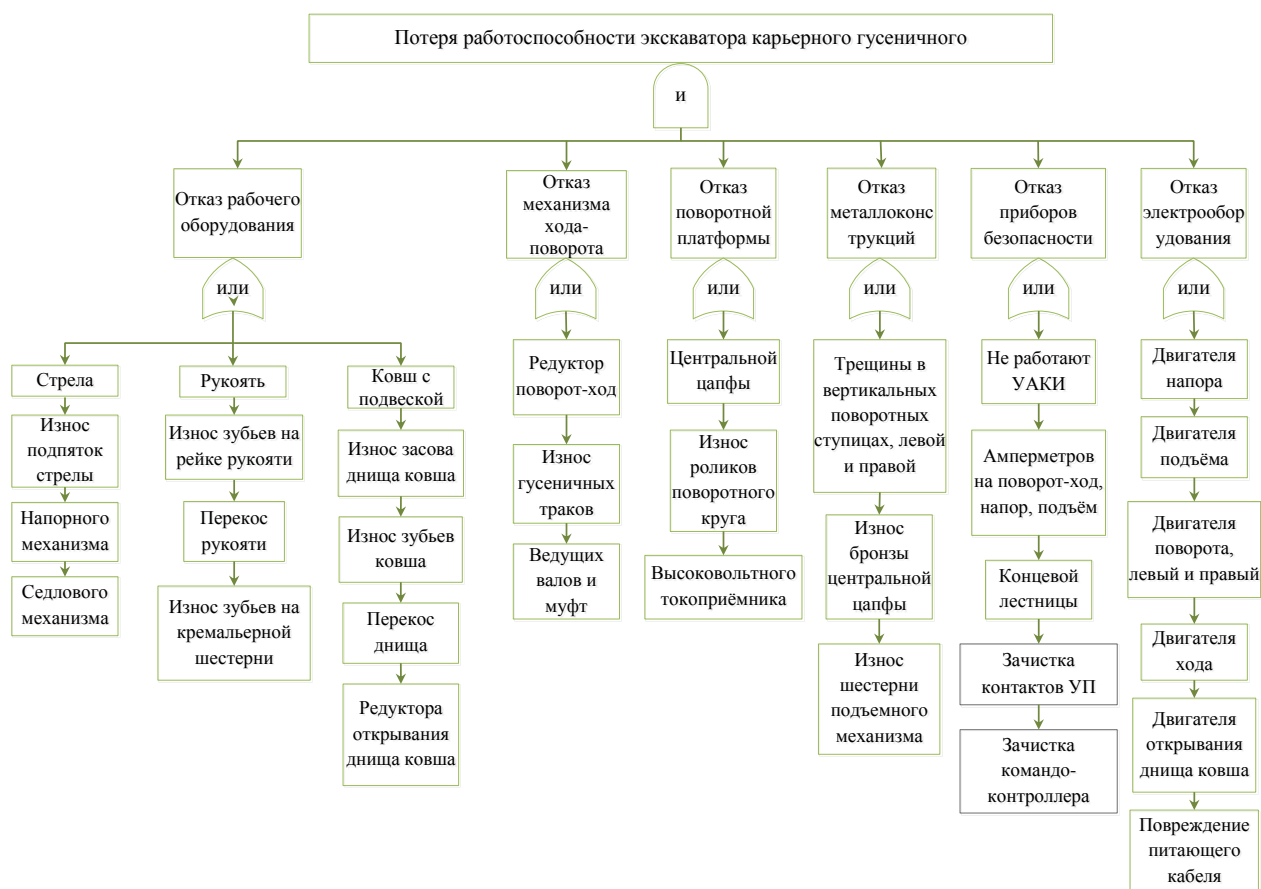


Рис. 6. Дерево отказов карьерного экскаватора
Fig. 6. Open-pit excavator failure tree

На основе анализа дерева отказов установлены основные определяющие факторы, которые в наибольшей степени влияют на простои горного оборудования, а именно:

- человеческий фактор (ошибки в эксплуатации, ремонте, сервисе);
- вызвано оборудованием (конструкторские, производственные ошибки);
- другие, не вытекающие из вышеупомянутых критериев, например особо тяжелые условия труда.

Направления дальнейших исследований

В развитии дальнейших исследований для решения задачи прогнозирования отказов и получения конкретных прогнозных данных по отказам электромеханического оборудования карьерного экскаватора необходима разработка универсального подхода, позволяющего оперативно обрабатывать большие объемы статистических данных по отказам оборудования, полученных в ходе исследований на горных предприятиях и находящихся в открытом доступе и пригодных для представления их в виде временных рядов. Необходима реализация математического аппарата, который позволил бы формализовать характер данных. Решение данной задачи имеет исключительную важность, так как большинство данных по отказам электромеханического оборудования карьерного экскаватора имеют различный формат представления, и для получения временного ряда, описывающего динамику наблюдаемого процесса с течением времени, необходим их анализ.

Заключение

Таким образом, прогнозирование остается необходимым шагом к предупреждению отказов горнотранспортного оборудования. Реализация и внедрение на горнодобывающих предприятиях РФ современной эффективной системы прогнозирования изменений в состоянии оборудования является ключевым инструментом для минимизации простоев горного оборудования, увеличения срока службы оборудования, снижения стоимости содержания оборудования, позволяющей на основе фактических данных о работе горнотранспортного оборудования к текущему моменту времени сделать прогноз о возможности дальнейшей эксплуатации.

Список литературы

1. Подэрни Р.Ю., Булес П. Сравнительный анализ гидравлических и механических экскаваторов с прямой лопатой // Горный журнал. 2015. №1. С. 55–61.
2. Подэрни Р.Ю., Булес П. Эффективность применения мощных гидравлических экскаваторов – результат повышения их надежности // Горная промышленность. 2015. №1. С. 46–51.
3. Побегайло П. А. Мощные одноковшовые гидравлические экскаваторы. Выбор основных геометрических параметров рабочего оборудования на ранних стадиях проектирования. М.: Ленанд, 2014. 296 с.
4. Булес П. Эффективность эксплуатации карьерных экскаваторов с электромеханическим и гидравлическим приводом основных механизмов // Горная промышленность. 2014. № 6 (118). С. 36–37.
5. Мельников Н.Н., Неволлин Д.Г., Скобелев Л.С. Технология применения и параметры гидравлических экскаваторов: монография. Апатиты: Кольский научный центр РАН, 1992. 216 с.
6. Великанов В.С. Научные основы системы снижения рисков отказов при управлении карьерным экскаватором: дис. ... д-ра техн. наук / Уральский государственный горный университет. Екатеринбург, 2020.
7. Дьяконов Н.А., Логунова О.С. Системы управления технологическим процессом на основе предиктивной аналитики: проектирование // Электротехнические системы и комплексы. 2021. № 1 (50). С. 58–64.
8. Шаханов Н.И., Ершов Е.В., Юдина О.В. Модель, метод и алгоритмы прогнозирования отказов роликов отводящего рольганга уборочной группы прокатного производства // Известия Юго-Западного государственного университета. Сер. Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2018. Т. 8. № 3 (28). С. 50–59.
9. <https://crn.ru>
10. Великанов В.С., Бочинская А.Н. Формирование системы минимизации рисков отказов карьерных экскаваторов при управлении // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докладов 77-й международной научно-технической конференции. Магнитогорск, 2019. С. 36.
11. Зорин В.А. Надежность механических систем: учебник. М.: НИЦ ИНФРА-М, 2015. 380 с.
12. Малафеев С.И., Копейкин А.И. Надежность технических систем. Примеры и задачи: учебное пособие. СПб.: Лань, 2012. 313 с. : ил., граф., схемы, табл. (Учебники для вузов: Специальная литература). ISBN 978-5-8114-1268-6.
13. Надежность механических систем горных и транспортных машин [Электронный ресурс]: учебное пособие / Панфилова О.Р., Усов И.Г., Кутлубаев И.М., Великанов В.С. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2020. 60 с.
14. Острейковский В.А. Теория надежности: учебник / 2-е изд., испр. М.: Высшая школа, 2008. 463 с.: ил., граф., схемы, табл.

15. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности: учебное пособие. 2-е изд., перераб. и доп. СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 702 с. : ил., табл.
16. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. Практикум: учебное пособие. СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 557 с. : ил., табл.
17. Эксплуатационная надежность и техническое обслуживание экскаваторов ЭКГ-8 и ЭКГ-8И: учебно-методическое пособие / В.А. Голубев, А.Е. Троп, Н.М. Карасев и др. Свердловск, 1971. 119 с.
18. Morin C.R., Packer K.F., Slater J.E. Failure Analysis Associated with Mining and Heavy Mechanical Equipment. In: McCall J.L., French P.M. (eds) Metallography in Failure Analysis. Springer, Boston, MA. 1978. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-2856-8_8.
19. Harish Kumar N.S., Choudhary R.P., Murthy Ch. S.N. Model based reliability analysis of shovel – dumper system's mechanical failures used in the surface coal mine: a case study. Safety and Reliability 39:3-4, 2020, pp. 215–229.
20. Dindarloo Saeid R., Siامي-Irdemoosa E. Data mining in mining engineering: results of classification and clustering of shovels failures data. International Journal of Mining, Reclamation and Environment 31:2, 2017, pp. 105–118.
21. Dindarloo Saeid R. Support vector machine regression analysis of LHD failures. International Journal of Mining, Reclamation and Environment 30:1, 2016, pp. 64–69.
22. Nick Vayenas, Xiangxi Wu. Maintenance study of a skip hoist. International Journal of Mining, Reclamation and Environment 25:2, 2011, pp. 177–186.
23. Vayenas N., Wu X. Maintenance and reliability analysis of a fleet of load-haul-dump vehicles in an underground hard rock mine. International Journal of Mining, Reclamation and Environment 23:3, 2009, pp. 227–238.
24. Elevli S., Uzgören N., Elevli B. Correspondence analysis of repair data: a case study for electric cable shovels. Journal of Applied Statistics 35:8, 2008, pp. 901–908.
25. Yuriy G., Vayenas N. Discrete-event simulation of mine equipment systems combined with a reliability assessment model based on genetic algorithms. International Journal of Mining, Reclamation and Environment 22:1, 2008, pp. 70–83.
26. Roy S.K., Bhattacharyya M. M., Naikan V. N. A. Maintainability and reliability analysis of a fleet of shovels. Mining Technology 110:3, 2001, pp. 163–171.
27. Голубев В.А., Троп А.Е. Надежность горного оборудования и эффективность его использования. М.: Недра, 1974. 80 с.
28. Кутлубаев И.М. Использование структурных схем для анализа многодвигательных машин // Вестник машиностроения. 2004. №12. С. 8–11.
29. Расчет ресурса деталей структурно-функциональных элементов горных машин / О.Р. Панфилова, В.С. Великанов, И.Г. Усов, Е.Ю. Мацко, И.М. Кутлубаев // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2018. № 2. С. 43–51.
30. Великанов В.С., Панфилова О.Р., Усов И.Г. Анализ показателей долговечности рукояти карьерного экскаватора // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т. 16. № 4. С. 13–20.

References

1. Poderni R.Yu., Buhles P. Comparative analysis of hydraulic and mechanical front shovel excavators. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal], 2015, no. 1, pp. 55–61. (In Russ.)
2. Poderni R.Yu., Buhles P. Efficiency of the use of powerful hydraulic excavators - the result of increasing their reliability. *Gornaya promyshlennost* [Mining Industry], 2015, no. 1, pp. 46–51. (In Russ.)
3. Pobegailo P.A. *Moshchnye odnokovshovye gidravlicheskie ekskavatory. Vybór osnovnykh geometricheskikh parametrov rabocheho oborudovaniya na rannikh stadiyakh proektirovaniya* [Powerful single-bucket hydraulic excavators. The choice of the main geometric parameters of the working equipment at the early stages of design]. Moscow: Lenand, 2014, 296 p. (In Russ.)
4. Buhles P. Efficiency of operation of open-pit excavators with electromechanical and hydraulic drives of main mechanisms. *Gornaya promyshlennost* [Mining Industry], 2014, no. 6 (118), pp. 36–37. (In Russ.)
5. Melnikov N.N., Nevolin D.G., Skobelev L.S. *Tekhnologiya primeneniya i parametry gidravlicheskih ekskavatorov: monografiya* [Application technology and parameters of hydraulic excavators: monograph]. Apatity: Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 1992, 216 p. (In Russ.)
6. Velikanov V.S. *Nauchnye osnovy sistemy snizheniya riskov otkazov pri upravlenii karernym ekskavatorom: dis. ... d-ra tekhn. nauk* [Scientific foundation of the system for reducing the risks of failures when operating a mining excavator. Doctoral thesis]. Ural State Mining University. Yekaterinburg, 2020.
7. Dyakonov N.A., Logunova O.S. Process control systems based on predictive analytics: design. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2021, no. 1 (50), pp. 58–64. (In Russ.)
8. Shakhnov N.I., Ershov E.V., Yudina O.V. Model, method and algorithms for predicting failures of the rollers of the outgoing roller table of the disposal group of the rolling division. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie* [Proceedings of the South-West State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering], 2018, vol. 8, no. 3 (28), pp. 50–59. (In Russ.)
9. <https://crn.ru>
10. Velikanov V.S., Bochinskaya A.N. Formation of a system for minimizing the risks of failures, when operating open-pit excavators. *Aktualnye problemy sovremennoi nauki, tekhniki i obrazovaniya: tezisy dokladov 77-i mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii*

- [Current problems of modern science, technology and education. Abstracts of the 77th International Scientific and Technical Conference]. Magnitogorsk, 2019, p. 36. (In Russ.)
11. Zorin V.A. *Nadezhnost mekhanicheskikh sistem: ucheb-nik* [Reliability of mechanical systems: Textbook]. Moscow: NITs INFRA-M, 2015, 380 p. (In Russ.)
 12. Malafeev S.I., Kopeikin A.I. *Nadezhnost tekhnicheskikh sistem. Primery i zadachi: uchebnoe posobie* [Reliability of technical systems. Examples and tasks: Textbook]. Saint Petersburg: Lan, 2012, 313 p. ISBN 978-5-8114-1268-6. (In Russ.)
 13. Panfilova O.R., Usov I.G., Kutlubaev I.M., Velikanov V.S. *Nadezhnost mekhanicheskikh sistem gornykh i transportnykh mashin: uchebnoe posobie* [Reliability of mechanical systems of mining and transport machines: Textbook]. Magnitogorsk: Publishing House of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2020, 60 p. (In Russ.)
 14. Ostreykovsky V.A. *Teoriya nadezhnosti: ucheb-nik* [Reliability theory: Textbook]. Moscow: Higher School, 2008, 463 p. (In Russ.)
 15. Polovko A.M., Gurov S.V. *Osnovy teorii nadezhnosti: uchebnoe posobie* [Fundamentals of the theory of reliability: Textbook]. Saint Petersburg: BKhV-Peterburg, 2006, 702 p. (In Russ.)
 16. Polovko A.M., Gurov S.V. *Osnovy teorii nadezhnosti. Praktikum: uchebnoe posobie* [Fundamentals of the theory of reliability. Workshop: tutorial]. Saint Petersburg: BKhV-Peterburg, 2006, 557 p. (In Russ.)
 17. Golubev V.A., Trop A.E., Karasev N.M. et al. *Ekspluatatsionnaya nadezhnost i tekhnicheskoe obsluzhivanie ekskavatorov EKG-8 i EKG-8I: uchebno-metodicheskoe posobie* [Operational reliability and maintenance of excavators EKG-8 and EKG-8I: Study guide]. Sverdlovsk, 1971, 119 p. (In Russ.)
 18. Morin C.R., Packer K.F., Slater J.E. Failure analysis associated with mining and heavy mechanical equipment. McCall J.L., French P.M. (eds) *Metallography in Failure Analysis*. Springer, Boston, MA, 1978. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-2856-8_8
 19. Harish Kumar N.S., Choudhary R.P., Murthy Ch. S.N. Model based reliability analysis of shovel – dumper system’s mechanical failures used in the surface coal mine: a case study. *Safety and Reliability* 39:3-4, 2020, pp. 215–229.
 20. Dindarloo Saeid R., Siامي-Irdemoosa E. Data mining in mining engineering: results of classification and clustering of shovels failures data. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment* 31:2, 2017, pp. 105–118.
 21. Dindarloo Saeid R. Support vector machine regression analysis of LHD failures. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment* 30:1, 2016, pp. 64–69.
 22. Nick Vayenas, Xiangxi Wu. Maintenance study of a skip hoist. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment* 25:2, 2011, pp. 177–186.
 23. Vayenas N., Wu X. Maintenance and reliability analysis of a fleet of load-haul-dump vehicles in an underground hard rock mine. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment* 23:3, 2009, pp. 227–238.
 24. Elevli S., Uzgören N., Elevli B. Correspondence analysis of repair data: a case study for electric cable shovels. *Journal of Applied Statistics* 35:8, 2008, pp. 901–908.
 25. Yuriy G., Vayenas N. Discrete-event simulation of mine equipment systems combined with a reliability assessment model based on genetic algorithms. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment* 22:1, 2008, pp. 70–83.
 26. Roy S. K., Bhattacharyya M. M., Naikan V. N. A. Maintainability and reliability analysis of a fleet of shovels. *Mining Technology* 110:3, 2001, pp. 163–171.
 27. Golubev V.A., Trop A.E. *Nadezhnost gornogo oborudovaniya i effektivnost ego ispolzovaniya* [Reliability of mining equipment and efficiency of its use]. Moscow: Nedra, 1974, 80 p. (In Russ.)
 28. Kutlubaev I.M. The use of structural diagrams for the analysis of multi-engine machines. *Vestnik mashinostroeniya* [Vestnik of Mechanical Engineering], 2004, no. 12, pp. 8–11. (In Russ.)
 29. Panfilova O.P., Velikanov V.S., Usov I.G., Matsko E.Yu., Kutlubaev I.M. Calculating life of parts of structural and functional elements of mining machines. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh* [Physical and Technical Issues of Mining], 2018, no. 2, pp. 43–51. (In Russ.)
 30. Velikanov V.S., Panfilova O.R., Usov I.G. Analysis of the durability indicators of the open-pit excavator dipper arm. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2018, vol. 16, no. 4, pp. 13–20. (In Russ.)

Поступила 11.10.2021; принята к публикации 15.11.2021; опубликована 24.12.2021
Submitted 11/10/2021; revised 15/11/2021; published 24/12/2021

Великанов Владимир Семенович – доктор технических наук, профессор,
Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия.
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: rzhik_00@mail.ru. ORCID 0000-0001-5581-2733

Мусонов Олег Сергеевич – магистр,
Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия.
Email: musonovoleg@inbox.ru

Панфилова Ольга Рашидовна – кандидат технических наук, доцент,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: halikova@inbox.ru. ORCID 0000-0001-558-2733

Ильина Елена Александровна – кандидат педагогических наук, доцент,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: dar_nas@mail.ru. ORCID 0000-0002-9143-4343

Дёрина Наталья Владимировна – кандидат филологических наук, доцент,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: nataljapidckaluck@yandex. ORCID 0000-0002-0613-0864

Vladimir S. Velikanov – DrSc (Eng.), Professor,
Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia.
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: rzhik_00@mail.ru. ORCID 0000-0001-5581-2733

Oleg S. Musonov – master,
Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia.
Email: musonovoleg@inbox.ru

Olga R. Panfilova – PhD (Eng.), Associate Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: halikova@inbox.ru. ORCID 0000-0001-558-2733

Elena A. Ilina – PhD (Pedagogy), Associate Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: dar_nas@mail.ru. ORCID 0000-0002-9143-4343

Natalya V. Dyorina – PhD (Philology), Associate Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: nataljapidckaluck@yandex. ORCID 0000-0002-0613-0864



МУЛЬТИПЛИЦИРОВАННЫЙ СПОСОБ ИНДУКЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ПОИСКА ПОДЗЕМНЫХ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ ОБЪЕКТОВ

Брякин И.В.¹, Бочкарев И.В.², Храмшин В.Р.³

¹Институт машиноведения и автоматики Национальной академии наук Кыргызской Республики, Бишкек, Кыргызская Республика

²Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, Бишкек, Кыргызская Республика

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

Аннотация. Цель. Разработать и теоретически обосновать новый способ индукционного зондирования, обеспечивающий повышенную чувствительность поиска различных электропроводящих подповерхностных объектов, например подземных кабельных линий и трубопроводов. Разработать установку для реализации предложенного способа. **Методы.** При решении поставленных задач использован метод электромагнитного зондирования, заключающийся в генерировании переменного электромагнитного поля, которым сканируют исследуемую область, с последующей фиксацией наличия подповерхностных объектов путем приема отраженного от него сигнала. **Результаты.** В статье разработан новый мультиплицированный способ поиска подповерхностных объектов, особенностью которого является то, что при помощи излучающей рамочной антенны не только возбуждают первичное магнитное поле, но и одновременно контролируют изменение электрических параметров этой антенны, вызванные переизлученным полем от подповерхностных объектов. Предлагается использовать два асимметричных измерительных канала. В качестве датчика первого измерительного канала используется рамочная антенна, причем в этом канале создается резонансный режим возбуждения, а в качестве датчика второго измерительного канала используется приемная ферритовая магнитная антенна, для которой создан режим магнитного усилителя. Приведено теоретическое обоснование нового способа. Разработана структурная блок-схема двухканальной индукционной установки для дистанционного зондирования, описана процедура определения глубины залегания подповерхностного объекта и его идентификации. **Заключение.** Разработанный мультиплицированный способ индукционного зондирования обеспечивает высокую эффективность поиска и идентификации различных подповерхностных объектов. Он обеспечивает повышенную чувствительность и точность зондирования, а также снижение в несколько раз порога чувствительности магнитной антенны, выполняющей функции измерительного преобразователя.

Ключевые слова: индукционное зондирование, подповерхностный объект, зондирующая установка, излучающая рамочная антенна, резонансный режим возбуждения, приемная ферритовая магнитная антенна, измерительный канал, магнитный усилитель.

© Брякин И.В., Бочкарев И.В., Храмшин В.Р., 2021

Для цитирования

Брякин И.В., Бочкарев И.В., Храмшин В.Р. Мультиплицированный способ индукционного зондирования для поиска подземных электропроводящих объектов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №4. С. 16–28. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-4-16-28>



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

MULTIPLICATED METHOD OF INDUCTION SOUNDING TO SEARCH FOR UNDERGROUND ELECTRICALLY CONDUCTIVE OBJECTS

Bryakin I.V.¹, Bochkarev I.V.², Khrumshin V.R.³

¹Institute of Mechanical Science and Automation of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyzstan

²Razzakov Kyrgyz State Technical University, Bishkek, Kyrgyzstan

³Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Purpose. The aim of this paper is to develop and theoretically substantiate a new way of induction sounding, providing an increased sensitivity of the search for various electrically conductive subsurface objects (SO), for example underground cable lines and pipelines, as well as to develop an installation to implement the proposed method. **Methods.** When solving the tasks, the authors have used the electromagnetic sounding method, which consists in generating an alternating electromagnetic field, which scans the area under study, followed by the fixation of the SO presence by receiving the signal reflected from it. **Results.** The paper presents a new multiplied method for searching SO, whose feature is that a radiating frame antenna is used not only to excite the primary magnetic field, but also simultaneously control the change in the electrical parameters of this antenna caused by the reradiated field from the SO. It has been proposed to use two asymmetric measuring channels (MC). The first MC sensor uses a frame antenna, and the resonant excitation mode is created in this channel, and the receiving ferrite magnetic antenna is used as the second MC sensor, which creates a magnetic amplifier mode. The paper contains a theoretical substantiation of the new method. A structural block diagram of a two-channel induction installation for remote sensing has been developed, a procedure for determining the depth of the SO and its identification has been described. **Conclusion.** The developed multiplied method of induction sounding provides high search efficiency and identification of various SO. It provides increased sensitivity and accuracy of sounding, as well as a decrease in a magnetic antenna sensitivity threshold by several times, performing the function of the measuring transducer.

Keywords: induction sounding, subsurface object, sounding installation, emitting frame antenna, resonant excitation mode, receiving ferrite magnetic antenna, measuring channel, magnetic amplifier.

For citation

Bryakin I.V., Bochkarev I.V., Khrumshin V.R. Multiplied Method of Induction Sounding to Search for Underground Electrically Conductive Objects. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021, vol. 19, no. 4, pp. 16–28. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-4-16-28>

Введение

В настоящее время на практике для обнаружения подповерхностных объектов (ПО) в виде подземных инженерных сооружений (кабельных и телефонных линий, трубопроводов и т.п.), а также различного рода подземных электропроводящих объектов и геоэлектрических неоднородностей верхних слоев земной коры используется различная зондирующая аппаратура [1–3], которая реализует различные способы зондирования. Эффективность этой аппаратуры в значительной мере зависит от способов создания зондирующих сигналов, получения и обработки измерительной информации, а также от конструктивных особенностей индукционных установок (ИУ), используемых для их реализации [4–7]. При этом, несмотря на многообразие известных способов дистанционного зондирования, вопросы расширения их функциональных возможно-

стей, а также повышение чувствительности и точности по-прежнему остаются весьма актуальными и востребованными [8–10].

Для исследований был выбран один из наиболее распространённых и эффективных подходов к зондированию и поиску металлических обесточенных ПО – электромагнитное зондирование, основанное на том, что генерируют переменное зондирующее электромагнитное поле, которым сканируют исследуемую область, а наличие в ней ПО фиксируют путем приема отраженного от него сигнала.

Теоретическое обоснование нового мультиплицированного способа индукционного зондирования

Подробный анализ известных способов зондирования и конструктивных модификаций ИУ показал, что для улучшения их эксплуатацион-

ных характеристик целесообразно реализовывать два эффекта [11]:

- применять вариант с нулевым первичным полем, то есть за счет особого взаимного расположения генераторной и приемной катушек обеспечивать геометрическую компенсацию первичного поля, а также реализовать компенсацию ЭДС, индуцируемых в приемных катушках внешними электромагнитными помехами;
- использовать методы усиления магнитного потока.

На базе проведенных исследований был разработан новый мультиплицированный способ индукционного зондирования, позволяющий с высокой точностью осуществлять поиск и идентификацию металлических подповерхностных объектов.

Сущность этого способа заключается в том, что в окружающем пространстве посредством излучающей рамочной антенны, питаемой гармоническим сигналом, возбуждают первичное электромагнитное поле и этим полем наводят в ПО вихревые токи, создающие вторичное (переизлученное) электромагнитное поле. При этом рамочная антенна является не только источником первичного электромагнитного поля, но и одновременно приемником вторичного электромагнитного поля. Кроме того, в качестве дополнительного датчика регистрации вторичного магнитного поля применяется ферритовая магнитная антенна (МА) с геометрической компенсацией первичного поля [12, 13].

Указанные особенности предлагаемого способа позволяют при зондировании реализовать метод инвариантных измерений. Для этого используют два независимых измерительных канала (ИК) ИК₁ и ИК₂ [14], каждый из которых находится под воздействием вторичного поля. Первый ИК₁ образуют путем использования первичной рамочной антенны, причем для повышения чувствительности в этом канале создают резонансный режим возбуждения, а основой второго ИК₂ является приемная ферритовая магнитная антенна. В каждом из этих ИК реализуют различные физические принципы, обеспечивая тем самым линейную независимость их статических функций преобразования [15–17]. Это обеспечивает возможность управления режимами функционирования второго ИК₂ сигналами первого ИК₁. При этом для приемной ферритовой магнитной антенны создают режим магнитного усилителя. Это существенно снижает погрешность реального процесса преобразования входной величины во втором ИК₂ и обес-

печивает заметное снижение (в несколько раз) порога чувствительности МА как измерительного преобразователя.

Рассмотрим подробно все основные процедуры, выполняемые при создании зондирующего поля и контроле переизлученного поля от ПО, а также методологию обработки измерительной информации.

Работа первого измерительного канала ИК₁. Основу первого ИК₁ составляет рамочная антенна (РА). При помощи этой антенны в предлагаемом способе, как уже говорилось, выполняют две операции:

- создают в однородном окружающем пространстве первичное непрерывное электромагнитное поле, для чего на РА подают от возбуждающего генератора звуковых частот непрерывный синусоидальный сигнал рабочей частоты $U_0(t) = U_m \cos \omega t$. Этим полем наводят в ПО вихревые токи, создающие вторичное электромагнитное поле, которое намагничивает окружающую среду;
- улавливают влияние вторичного поля на первичное магнитное поле, которое изменяет электрические параметры РА.

Схема взаимодействия РА 1 с ПО 3 показана на **рис. 1**. Для повышения чувствительности индукционного зондирования в канале ИК₁ создают резонансный режим возбуждения посредством включения последовательно с РА конденсатора C_1 .

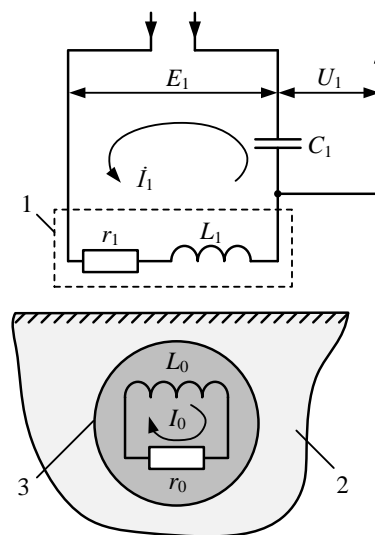


Рис. 1. Схема индукционного взаимодействия рамочной антенны с подповерхностным объектом: 1 – рамочная антенна; 2 – вмещающая среда; 3 – подповерхностный объект

Fig. 1. Scheme of induction interaction of a frame antenna with the subsurface object: 1 is a frame antenna; 2 is background medium; 3 is the subsurface object

Под действием первичного переменного электромагнитного поля, возбужденного током \dot{I}_1 , в контуре РА « $L_1 r_1$ » будет наводиться ЭДС \dot{E}_1 . Если во вмещающей среде 2 ПО 3 отсутствует, то эта ЭДС описывается выражением

$$\dot{E}_1 = \dot{I}_1 \left[r_1 + j \left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1} \right) \right]. \quad (1)$$

В этом выражении принято, что внутреннее сопротивление возбуждающего генератора $r_{\text{вн}} = 0$.

В этом случае напряжение на индуктивности будет равно

$$\dot{U}_L = \dot{I}_1 (r_1 + j\omega L_1). \quad (2)$$

При появлении во вмещающей среде 2 электропроводящего ПО 3, имеющим индуктивность L_0 и сопротивление r_0 , в его электрическом контуре « $L_0 r_0$ » под действием первичного переменного электромагнитного поля наведется ЭДС и по этому контуру потечет ток \dot{I}_0 , который возбуждает вторичное (отраженное) магнитное поле. Это приведет к тому, что контур « $L_1 r_1$ » расстроится, что, в свою очередь, приводит к изменению напряжения \dot{U}_1 на конденсаторе C_1 .

Таким образом, при наличии ПО 3 между контурами « $L_1 C_1$ » и « $L_0 r_0$ » появится взаимосвязь, характеризующаяся коэффициентом взаимной индукции M_1 . В этом случае для этих взаимосвязанных контуров можно записать следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \dot{E}_1 = \dot{I}_1^* \left[r_1 + j \left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1} \right) \right] + j\omega M_1 \dot{I}_0; \\ j\omega M_1 \dot{I}_1^* - (r_0 + j\omega L_0) \dot{I}_0 = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Поскольку $r_{\text{вн}} = 0$, то величина ЭДС возбуждающего генератора в обоих случаях не изменится, но при наличии ПО ток контура РА изменится и будет равным \dot{I}_1^* .

Решив второе уравнение системы (3) относительно \dot{I}_0 и подставляя результат в первое уравнение, получим

$$\begin{aligned} \dot{E}_1 = \dot{I}_1^* & \left[\left(r_1 + \frac{\omega^2 M_1^2}{Z_0^2} r_0 \right) + \right. \\ & \left. + j \left(\omega L_1 - \frac{\omega^2 M_1^2}{Z_0^2} \omega L_0 - \frac{1}{\omega C_1} \right) \right], \end{aligned} \quad (4)$$

где $Z_0 = \sqrt{r_0^2 + \omega^2 L_0^2}$.

Таким образом, вследствие взаимодействия контуров « $L_1 C_1$ » и « $L_0 r_0$ » величины активного r_1 и реактивного x_L сопротивления контура РА изменились соответственно на

$$\Delta r_1 = \frac{\omega^2 M_1^2}{Z_0^2} r_0; \quad x_L = -j \frac{\omega^2 M_1^2}{Z_0^2} \omega L_0. \quad (5)$$

В соответствии с выражениями (2) и (5), при наличии ПО напряжение на индуктивности L_1 станет равным

$$\dot{U}_L^* = \dot{I}_1^* \left[\left(r_1 + \frac{\omega^2 M_1^2}{Z_0^2} r_0 \right) + j \left(\omega L_1 - \frac{\omega^2 M_1^2}{Z_0^2} \omega L_0 \right) \right]. \quad (6)$$

Тогда приращение напряжения на индуктивности L_1 будет равно

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_L^* = \dot{U}_L^* - \dot{U}_L = \dot{I}_1^* & \left[\left(r_1 + \frac{\omega^2 M_1^2}{Z_0^2} r_0 \right) + \right. \\ & \left. + j \left(\omega L_1 - \frac{\omega^2 M_1^2}{Z_0^2} \omega L_0 \right) \right] - \dot{I}_1 (r_1 + j\omega L_1). \end{aligned} \quad (7)$$

Учтем, что ток в контуре РА « $L_1 r_1$ » при отсутствии и при наличии ПО соответственно равен

$$\dot{I}_1 = \dot{E}_1 / r_1; \quad \dot{I}_1^* = \dot{E}_1 / \dot{Z}_1, \quad (8)$$

где

$$\dot{Z}_1 = \left(r_1 + \frac{\omega^2 M_1^2}{Z_0^2} r_0 \right) + j \left(\omega L_1 - \frac{\omega^2 M_1^2}{Z_0^2} \omega L_0 - \frac{1}{\omega C_1} \right).$$

Введем обозначение $k^2 = \omega^2 M_1^2 / Z_0^2$ и принимаем в качестве допущения, что $M_1 \ll 1$ и $\omega L_1 - 1/(\omega C_1) = 0$. Тогда выражение (4) можно преобразовать к виду

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_L^* = \dot{E}_1 & \left[\frac{\left(r_1 + k^2 r_0 \right) + j \left(\omega L_1 - k^2 \omega L_0 \right)}{\left(r_1 + k^2 r_0 \right) + j k^2 \omega L_0} - \right. \\ & \left. - \frac{\left(r_1 + j\omega L_1 \right)}{r_1} \right]. \end{aligned} \quad (9)$$

Добротность Q_1 контура РА равна $\omega L_1 / r_1 = Q_1$.

Тогда, с учетом сказанного, выражение (9) примет следующий вид:

$$\Delta \dot{U}_L^* = -\dot{E}_1 \frac{r_1}{\left(r_1 + k^2 r_0 \right)^2} k^2 Q_1 (\omega L_0 + j r_0). \quad (10)$$

Модуль данного приращения напряжения равен

$$\begin{aligned} |\Delta \dot{U}_L^*| &= \frac{\dot{E}_1}{r_1} \frac{\omega^2 M_1^2}{r_0^2 + \omega^2 L_0^2} \cdot Q_1 \sqrt{r_0^2 + \omega^2 L_0^2} = \\ &= \frac{\dot{E}_1}{r_1} \frac{\omega^2 M_1^2}{Z_0} Q_1, \end{aligned} \quad (11)$$

где $\frac{r_1}{(r_1 + k^2 r_0)^2} \approx \frac{1}{r_1}$; $M_1 = M_0 e^{-\frac{3h}{R_0}}$, h – расстояние между РА и ПО; M_0 – коэффициент взаимной индукции РА и ее зеркального отображения при $h = h_{\min}$; R_0 – эквивалентный радиус РА.

В соответствии с выражением (11) можно считать, что чувствительность колебательного контура в резонансном режиме возросла в Q_1 раз. Кроме того, конденсатор C_1 дополнительно выполняет функции балластного реактивного сопротивления, что позволяет в итоге существенно уменьшить активное сопротивление РА r_1 и повысить тем самым ее добротность Q_1 .

Анализ полученных выражений показывает, что при наличии в первом измерительном канале колебательного контура $L_1 C_1$, который будет настроен на резонансную рабочую частоту f_p , обеспечивается контроль как глубины h залегания ПО, так и изменения электропроводности σ верхних слоев вмещающей среды, обусловленных наличием ПО.

Обобщая вышесказанное, выражение (11) можно трансформировать к виду

$$U_{\text{ИК}_1} = K_1 \cdot U_L = F_1(\sigma, h), \quad (12)$$

где K_1 – коэффициент преобразования измерительного канала ИК₁.

Фактически вторичное (переизлученное) магнитное поле H_2 представляет собой некоторый вариант масштабированного поляризованного первичного магнитного поля H_1 , что в итоге и предопределяет наличие во вторичном магнитном поле H_2 наряду с вертикальной магнитной компонентой H_Z еще и горизонтальной магнитной компоненты H_X (рис. 2):

$$H_2 = \sqrt{H_X^2 + H_Z^2}. \quad (13)$$

Учитывая, что $U_{\text{ИК}_1} = F(H_Z)$ и $U_{\text{ИК}_2} = F(H_X)$, можем констатировать справедливость следующих логических утверждений:

$$(U_{\text{ИК}_1} / U_{\text{ИК}_2}) = (H_Z / H_X) = \Delta. \quad (14)$$

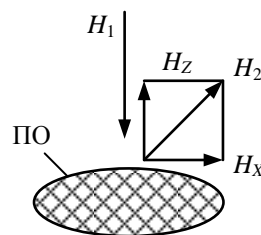


Рис. 2. Распределение магнитных полей при наличии подповерхностного объекта
Fig. 2. Distribution of magnetic fields in the presence of a subsurface object

В свою очередь, наличие во вмещающей среде ПО, резко контрастирующего на ее фоне своими физическими свойствами, приведет к соответствующему перераспределению существующего соотношения Δ между компонентами H_Z и H_X в составе вторичного магнитного поля H_2 , то есть в общем случае величину Δ можно считать величиной вариативной, которая при четко выраженных поляризирующих свойствах ПО может принять некоторое пороговое значение Δ_p .

Таким образом, можно утверждать, что в случае появления устойчивой локальной неоднородности в виде ПО во вмещающей среде Δ примет некоторое пороговое значение Δ_p , которое является фактором, надежно определяющим наличие инородного ПО во вмещающей среде. В этом случае будет фиксироваться заметное увеличение компоненты H_X и соответствующее изменение H_Z , то есть существенное уменьшение Δ до условного порогового значения Δ_p .

Данное обстоятельство говорит о том, что в этом случае есть определенный смысл использовать режим магнитного усилителя (МУ) для МА в момент реализации следующего условия:

$$\Delta \leq \Delta_p. \quad (15)$$

Работа второго измерительного канала ИК₂. Основу второго ИК₂ составляет приемная ферритовая магнитная антенна МА в виде двух приемных катушек, расположенных на ферритовом стержне. В этом способе зондирования предлагается перевести МА в режим магнитного усилителя [18].

Рассмотрим условия, при которых МА можно рассматривать в качестве МУ (рис. 3).

В случае функционирования МА в режиме МУ ее ферритовый стержень 2 фактически является магнитопроводом МУ, а ее измерительная обмотка используется в качестве входной и вы-

ходной обмоток МУ. Для рассматриваемого случая последовательно с этой обмоткой со стороны источника управляющего входного сигнала $\bar{U}_{вх}$ включен дроссель в виде индуктивности L , имеющий небольшое активное сопротивление для сигнала постоянного тока, но представляющий собой большое реактивное сопротивление для переменной ЭДС, индуцируемой во входной обмотке МУ (измерительная обмотка МА) измеряемым переменным магнитным полем \tilde{H}_x и являющейся выходным сигналом $\tilde{U}_{вых}$ МУ. В рассматриваемой схеме МУ измеряемое магнитное поле \tilde{H}_x дополнительно выполняет функции управляющего (возбуждающего) магнитного поля.

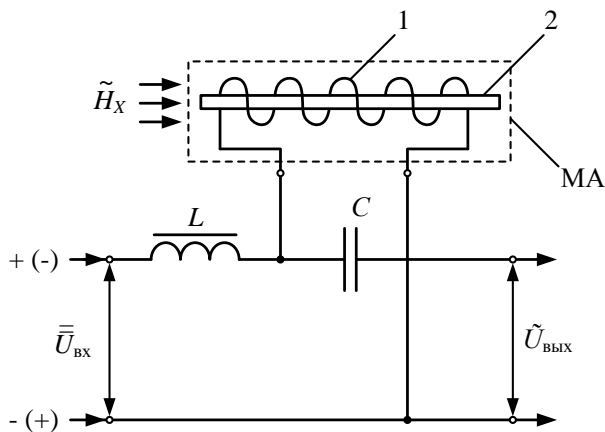


Рис. 3. Схема магнитного усилителя напряжения с выходом на удвоенной частоте
Fig. 3 Magnetic voltage amplifier circuit with double-frequency output

При подаче на измерительную обмотку МА, выполняющую в данном случае функцию входной обмотки МУ, постоянного опорного напряжения $\bar{U}_{вх}$ в ней возникнет постоянный ток \bar{I} , который создаст в магнитопроводе МУ постоянное подмагничивающее магнитное поле $\bar{H}_п$, которое вследствие нелинейного характера кривой намагничивания ферромагнитного стержня вызовет соответствующие изменения его нормальной магнитной проницаемости $\mu_H(\bar{H}_п)$ и магнитного сопротивления:

$$Z_M = \frac{l}{\mu_H(\bar{H}_п) \cdot S} \quad (16)$$

Таким образом, в МУ фактически реализуется режим одновременного намагничивания магнито-

провода МУ переменным (измеряемым) и постоянным (подмагничивающим) магнитными полями.

Все электродинамические процессы, определяющие особенности режима функционирования рассматриваемого МУ, представлены на графике основной кривой намагничивания материала магнитопровода МУ (рис. 4).

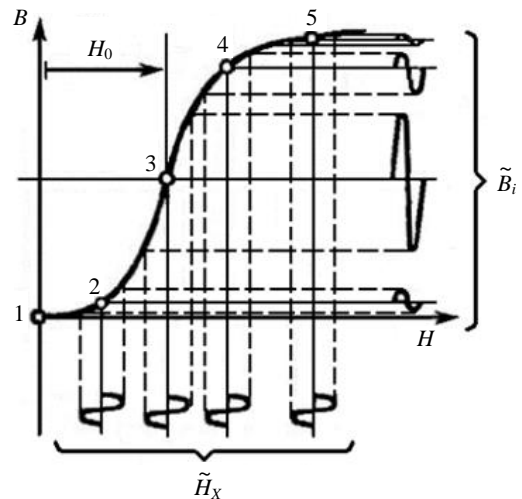


Рис. 4. Основная кривая намагничивания магнитопровода магнитного усилителя
Fig. 4. Basic magnetic amplifier magnetization B-H curve

Из рис. 4 видно, что при изменении \bar{H} в диапазоне $\inf \bar{H} \leq \bar{H} \leq \sup \bar{H}$ материал сердечника выходит из состояния насыщения и рабочая точка магнитного усилителя перемещается из точки 5 в область точки 3, в которой нормальная (эффективная) магнитная проницаемость материала магнитопровода МУ достигает своего максимального значения, то есть $\mu(H_0) = \mu_{max}$.

Из анализа характеристики МУ вход-выход, представленной на рис. 5, следует, что при $\bar{I} = I_0$ выходной сигнал $\tilde{U}_{вых}$ МУ в виде уже существенно усиленной переменной ЭДС подается в измерительный канал через конденсатор C , препятствующий проникновению напряжения опорного сигнала $\bar{U}_{вх}$ в этот измерительный канал.

Таким образом, если МА использовать в режиме МУ, то на выходе катушки индуктивности для вторичного (переизлученного) магнитного поля H_2 с горизонтальной составляющей H_x , меняющейся по гармоническому закону с циклической частотой ω_p и являющейся функцией физических параметров σ и h , напряжение $U_{МА}$ будет определяться следующим соотношением:

$$\begin{aligned}\dot{U}_{MA} &= -j \cdot \omega \cdot \mu_H \cdot \mu_0 \cdot w \cdot \dot{H}_X \cdot K_\mu \cdot S = \\ &= -j \cdot \omega \cdot \mu_{max} \cdot \mu_0 \cdot w \cdot \dot{H}_X \cdot S,\end{aligned}\quad (17)$$

где j – мнимая единица; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная проницаемость вакуума; w – количество витков в катушке индуктивности МА 2; $S = \pi d^2/4$ – площадь сечения сердечника МА; d – диаметр сердечника МА 2; $\dot{H}_X = F(\sigma; h)$ – напряженность горизонтальной магнитной компоненты вторичного электромагнитного поля; σ и h – величины соответственно удельной электрической проводимости и глубины залегания ПО; $\mu_{max} = \mu_H K_\mu$ – максимально возможная магнитная проницаемость материала сердечника; K_μ – коэффициент мультиплицирования, характеризующий уровень повышения чувствительности МУ для конкретного материала сердечника МА за счет постоянного подмагничивающего поля \bar{H}_Π .

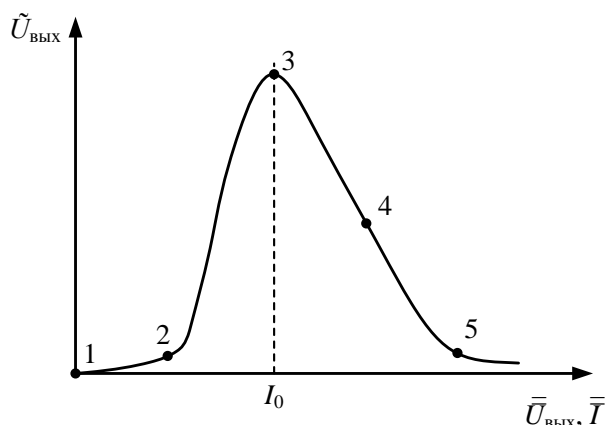


Рис. 5. Характеристика магнитного усилителя вход-выход

Fig. 5. Magnetic amplifier characteristics: Input-output

Из уравнения (17) следует, что функционирование МА в режиме МУ при соответствующих условиях ($H_\Pi = H_0$) существенно снижает погрешность реального процесса преобразования входной величины H_X измерительным каналом ИК₂ и обеспечивает максимальную чувствительность самой МА.

Переключение традиционного режима МА в режим МУ может осуществляться посредством специального бинарного сигнала «включение режима» $U_{BP}(t)$, предназначенного и формируемого для активации подмагничивающего поля $H_\Pi = H_0$, в соответствии с условиями:

$$U_{BP}(t) = \begin{cases} 1, & \text{при } \Delta \leq \Delta_p; \\ 0, & \text{при } \Delta > \Delta_p. \end{cases} \quad (18)$$

Обобщая, можно констатировать, что первичное магнитное поле H_1 возбуждает в проводящем ПО вихревой электрический ток, который, в свою очередь, создает вторичное магнитное поле H_2 , горизонтальная компонента которого H_X воздействует на функционирующую в режиме МУ ферритовую МА, и индуцирует в ее двух приемных катушках соответствующие ЭДС, сумма которых в соответствии с (12) в результате последующих измерительных преобразований в ИК₂ трансформируется к виду

$$U_{ИК_2} = K_2 \cdot \dot{U}_{MA} = F_2(\mu_{max}, \sigma, h), \quad (19)$$

где K_2 – коэффициент преобразования измерительного канала ИК₂.

Очевидно, что внутри диапазона измерения связь между сигналами на выходе и входе МА определяется функциональной зависимостью $U_{MA} = f(H_X)$, которая является статической характеристикой МА (рис. 6, а).

Введем величину δ , определяемую соотношением

$$\delta = \lim_{\Delta H \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta U_{MA}}{\Delta H_X} \right) = \frac{dU_{MA}}{dH_X}.$$

Очевидно, что ее можно считать чувствительностью МА, а применительно к графической интерпретации – крутизной характеристики (рис. 6, б).

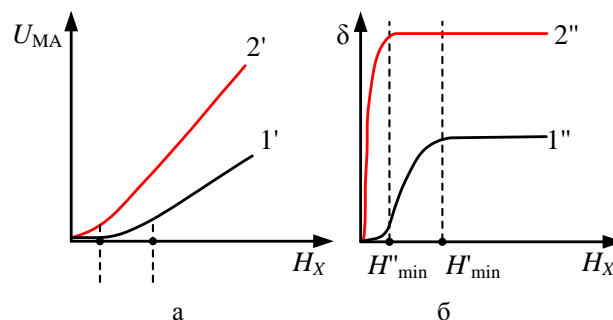


Рис. 6. Графическая интерпретация основных характеристик магнитной антенны: а и б – соответственно статическая характеристика и крутизна характеристики

Fig. 6. Diagramming of the basic characteristics of the magnetic antenna: а and б are static characteristics and steepness of the characteristics, respectively

На рис. 6 графики 1' и 1'' соответствуют нормальному режиму работы МА, зависимости 2' и 2'' соответствуют функционированию МА в режиме МУ, а величины H'_{min} и H''_{min} являются

порогами чувствительности МА соответственно при ее нормальном режиме работы и в режиме МУ. Из анализа графиков на **рис. 6** следует, что именно за счет введения коэффициента мультиплицирования K_{μ} , обеспечивающего необходимый тренд варьирования магнитной проницаемости, появилась реальная возможность заметного снижения (в несколько раз) порога чувствительности датчика электромагнитного поля в виде МА.

Обобщая, можно констатировать, что использование двух независимых измерительных каналов ИК₁ и ИК₂, резонансного режима возбуждения РА, а также перевод МА в режим магнитного усилителя обеспечивают разработанному способу значительное повышение чувствительности и точности подповерхностного зондирования.

Разработка индукционной установки для реализации предложенного способа подповерхностного зондирования

На базе проведенных исследований была разработана структурная блок-схема индукционной установки, реализующая предложенный мультиплицированный способ индукционного зондирования для поиска металлических ПО (**рис. 7**). ИУ состоит из следующих функциональных блоков: 1 – индукционный зонд (ИЗ); 5 – разделительный фильтр (РФ); 6 – генератор

электрических сигналов звуковых частот; 7 – формирователь опорных напряжений; ИК₁ и ИК₂ – соответственно первый и второй измерительные каналы; 10 – формирователь напряжения задания режима МУ; 16 – коммутатор; 17 – вычислительный блок (ВБ).

Индукционный зонд 1 содержит генераторную рамочную антенну РА, а также приемную магнитную антенну МА, состоящую из ферритового сердечника 2 и двух идентичных приемных катушек 3, 4. По отношению к приемным катушкам 3 и 4 рамочная антенна имеет ортогональное пространственное расположение. Тем самым осуществляется геометрическая компенсация первичного поля. Последовательно с РА 2 подключен конденсатор C_1 , который образует с ней резонансный контур. Катушки 3 и 4 имеют дифференциальное согласное включение. При наличии внешних синфазных электромагнитных помех, которые будут наводить в катушках 3 и 4 ЭДС с одинаковыми амплитудами и фазами, указанное включение катушек 3 и 4 будет обеспечивать полную взаимную компенсацию этих ЭДС. Первый ИК₁ содержит синхронный детектор 8 и блок вторичной обработки сигнала 9. В свою очередь, в состав ИК₂ входят буферные усилители 11 и 12 разностный усилитель 13 синхронный детектор 14 блок вторичной обработки сигнала 15.

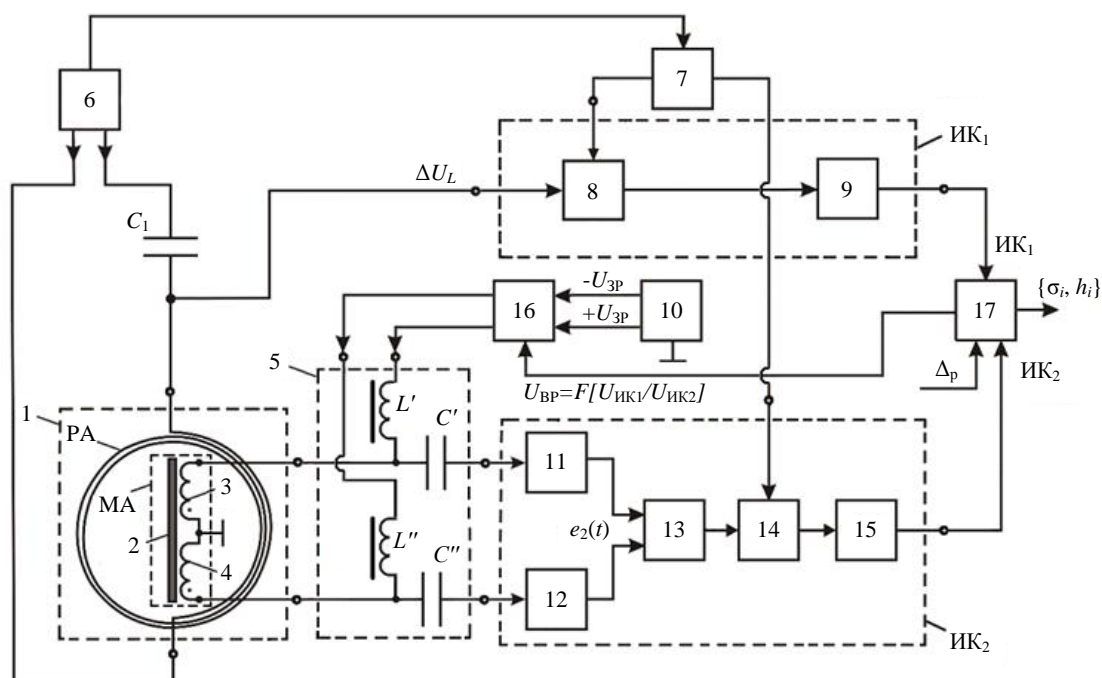


Рис. 7. Структурная блок-схема индукционной установки

Fig. 7. A schematic block diagram of the induction installation

Предлагаемая установка работает следующим образом. При подаче на РА 2 сигнала рабочей частоты от генератора звуковых частот 6 она возбуждают в окружающем пространстве первичное электромагнитное поле. Поскольку РА и МА имеют взаимное ортогональное расположение, а катушки 3 и 4 включены дифференциально и согласно, то при отсутствии ПО в исследуемой области суммарная ЭДС на выходе ФА будет равняться нулю. Таким образом, за счет описанного расположения и подключения катушек РА и МА обеспечивается повышенная помехоустойчивость ИЗ в целом.

При наличии электропроводящего ПО в нем полем РА наводится ЭДС, появляются вихревые токи, которые создают вторичное магнитное поле. Это поле будет восприниматься катушками 3 и 4. Таким образом, при наличии во вмещающей среде ПО появляется горизонтальная магнитная составляющая вторичного магнитного поля, что приводит к нарушению начальной компенсации. За счет этого на выходе МА появляются относительно средней точки катушек 3 и 4 соответствующие напряжения, которые через реактивные элементы (C' и C'') РФ 5 поступают на входы буферных усилителей 11 и 12. Сигналы с выходов буферных усилителей 11 и 12 подаются на вход разностного усилителя 13. Усиленный разностным усилителем 13 сигнал подается на информационный вход синхронного детектора 14, на опорный вход которого подается сигнал с выхода формирователя опорных напряжений 7, на вход которого подается непосредственно синусоидальное напряжение с выхода генератора 6. Выходной сигнал синхронного детектора 14 подается на блок вторичной обработки информации 15, где вычисляются параметры этого сигнала, и информация о них передается на соответствующий вход ВБ 17.

Первичное и вторичное магнитные поля, созданные соответственно РА и ПО, накладываются друг на друга. Это результирующее поле воздействует на РА и ее исходные электрические параметры изменяются. За счет этого на входе блока 9 появляется сигнал девиации, который описывается уравнением (11). Этот сигнал подается на информационный вход синхронного детектора 8, на опорный вход которого подается опорное напряжение с соответствующего выхода формирователя опорных напряжений 7. В свою очередь, сигнал с выхода синхронного детектора 8 поступает на вход блока вторичной обработки сигнала 9, который определяет пара-

метры сигнала девиации и информацию о них передает на соответствующий информационный вход ВБ 17.

Блок 17, используя полученную информацию с выходов блоков 9 и 15, алгоритмически определяет все необходимые параметры ПО, то есть h и σ . Кроме того, блоком 17 дополнительно осуществляется процесс вычисления отношения $(U_{ик_1}/U_{ик_2}) = \Delta$, значение которого регулярно сопоставляется этим же блоком с заданным пороговым значением Δ_p . При выполнении условия (15) на управляющем выходе блока 17 формируется специальный бинарный сигнал «включение режима» $U_{вр}(t)$ (18), поступающий на управляющий вход коммутатора 16.

В свою очередь, блок 10 осуществляет формирование двухполярных напряжений задания режимов ($-U_{зр}$ и $+U_{зр}$), которые поступают на информационные входы коммутатора 16. При активации коммутатора 16 сигналом $U_{вр}(t)$ напряжения задания режимов с его информационных выходов возбуждают через соответствующие реактивные элементы (L' и L'') РФ 5 соответствующие токи подмагничивания катушек 3 и 4 МА. При этом обеспечиваются необходимые фазировки и амплитуды этих токов, а также надежная развязка выходов блока 16 от информационных переменных сигналов с катушек 3 и 4. Кроме того, через соответствующие реактивные элементы (C' и C'') РФ 5 осуществляется разделение входов буферных усилителей 11 и 12 от постоянных электрических сигналов с блока 16. Особенности функционирования блоков 5 и 16 фактически обеспечивают режим МУ для МА при наличии ПО во вмещающей среде, создавая тем самым условия возникновения эффекта управляемой «магнитной линзы».

Если задать заранее высокую чувствительность $ИК_2$ посредством аппаратных средств, непосредственно образующих данный измерительный канал, то это приведет к возникновению ложных срабатываний ИУ и появлению состояния информационной неопределенности при работе ВБ 17. Таким образом, использование способа повышения чувствительности $ИК_2$ за счет изменения физических свойств чувствительного элемента МА (датчика магнитного поля), непосредственно участвующего в первичном измерительном преобразовании информационного сигнала, выводит решение проблемы поиска различных электропроводящих ПО на качественно иной уровень.

Исходя из уравнений (7) и (14), можно составить следующую систему уравнений измерений для ИК₁ и ИК₂ при функционировании МА в режиме МУ [14]:

$$\begin{cases} U_{\text{ИК}_1} = a_1 \cdot \sigma + b_1 \cdot h; \\ U_{\text{ИК}_2} = a_2 \cdot \sigma + b_2 \cdot h, \end{cases} \quad (20)$$

где a_1, b_1 и a_2, b_2 – коэффициенты линейно независимых статических функций преобразования соответственно ИК₁ и ИК₂.

Систему алгебраических уравнений измерений (20) перепишем в виде общих уравнений двух плоскостей областей возможных значений контролируемых параметров (σ и h) ПО в пространстве прямоугольной системы координат $O\sigma hz$ (рис. 8):

$$\begin{cases} a_1 \cdot \sigma + b_1 \cdot h + c_1 \cdot z = 0; \end{cases} \quad (21)$$

$$\begin{cases} a_2 \cdot \sigma + b_2 \cdot h + c_2 \cdot z = 0, \end{cases} \quad (22)$$

где c_1 и c_2 – масштабные коэффициенты; $c_1 \cdot z = U_{\text{ИК}_1}$; $c_2 \cdot z = U_{\text{ИК}_2}$; a_1 и b_1, a_2 и b_2 – угловые коэффициенты; $a_1/a_2 \neq b_1/b_2 \neq c_1/c_2$.

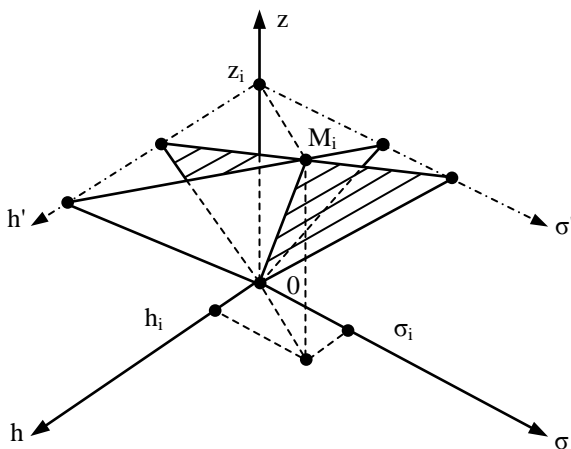


Рис. 8. Области значений физических параметров подповерхностного объекта

Fig. 8. Range of the physical parameters of subsurface objects

Разыскиваемое решение системы уравнений (20) представляет собой геометрическое место точек $M_i(\sigma_i; h_i; z_i)$, лежащих на одной пространственной прямой, проходящей через начало системы координат и являющейся линией пересечения двух плоскостей (21) и (22) (см. рис. 8).

Пространственная прямая ОМ фактически является общей осью целого набора пересекающихся в пространстве плоскостей, множество

которых образуется при различных значениях угловых коэффициентов линий пересечений соответствующих плоскостей (21) и (22) с координатными плоскостями σOz и $h Oz$. В рассматриваемом случае значения угловых коэффициентов линий пересечений будут определять конкретные физические свойства исследуемого ПО.

Наличие подобного набора плоскостей отражает реальное многообразие физических свойств ПО, которое требует выполнения обязательной процедуры калибровки ИУ в виде предварительного определения масштабных коэффициентов и коэффициентов статических функций преобразования ИК₁ и ИК₂ для предполагаемого ПО с конкретными физическими свойствами.

С учетом сделанных замечаний решение системы алгебраических уравнений (20) можно представить в следующем виде:

$$\begin{cases} \sigma = \frac{b_1 \cdot U_{\text{ИК}_2} - b_2 \cdot U_{\text{ИК}_1}}{a_2 \cdot b_1 - a_1 \cdot b_2}; \\ h = \frac{a_2 \cdot U_{\text{ИК}_1} - a_1 \cdot U_{\text{ИК}_2}}{a_2 \cdot b_1 - a_1 \cdot b_2}. \end{cases} \quad (23)$$

В соответствии с полученными алгоритмами (18) ВБ 17 осуществляет процесс окончательной идентификации ПО, то есть определяет глубину h залегания ПО и его идентификацию по величине σ .

Проведенные экспериментальные исследования макетного образца индукционной установки, имеющей описанный вариант структурной блок-схемы, показали высокую чувствительность, точность и достоверность поиска и идентификации ПО.

Заключение

Разработанный новый мультиплицированный способ индукционного зондирования обеспечивает высокую эффективность поиска и идентификации различных подповерхностных объектов. Создание в контуре излучающей рамочной антенны РА резонансного режима возбуждения, а также использование двух независимых измерительных каналов и перевод приемной ферритовой магнитной антенны МА в режим магнитного усилителя, сигнал управления для которого получают посредством РА, обеспечивает повышенную чувствительность и точность зондирования, а также снижение в несколько раз порога чувствительности МА, выполняющей функции измерительного преобразователя.

Предложенный вариант ИУ, реализующий данный способ, обеспечивает высокую эффективность и простоту компенсации первичного поля, существенное снижение межвитковых утечек в катушках МА, уменьшение воздействия внешних электромагнитных помех, а также минимизацию влияния на выходные характеристики ИУ изменения параметров приемных катушек и ферромагнитного сердечника. Таким образом, разработанная ИУ обладает целым рядом преимуществ по сравнению с аналогами, что позволяет рекомендовать ее к использованию для оперативного обнаружения и точного определения месторасположения различного рода ПО при строительстве и земляных работах, при проведении аварийно-спасательных и ремонтных работ и т.п.

Предложенный вариант ИУ, наряду с поиском протяженных подземных инженерных сооружений (кабельных линий, трубопроводов и т.п.), отдельных подземных металлических объектов и геоэлектрических неоднородностей, легко адаптируется к следующим условиям работы:

- в качестве металлодетектора в службах охраны, безопасности, на предприятиях пищевой промышленности и т.д. для поиска нежелательных металлических предметов;
- в военном деле для поиска мин, снарядов;
- в качестве средства диагностики для мониторинга состояния железнодорожных путей, ответственных узлов грузоподъемных машин и механизмов, объектов котлонадзора;
- в качестве поискового средства при проведении работ строительными, техническими и аварийно-спасательными службами;
- при сортировке мусора на мусороперерабатывающих предприятиях;
- в археологии и кладоискательстве.

Список литературы

1. Charles Garrett. Modern Metal Detectors. New-York, 1998, 432 p.
2. Щербаков Г.Н. Обнаружение скрытых объектов. М.: Арбат-Информ, 2004. 138 с.
3. Адаменко М.В. Металлоискатели. М.: ДМК-пресс, 2006. 97 с.
4. Tang Z., Carter L.J. Metal detector head analysis. Fifth International Conference on Sensing Technology. 2011. Pp. 93–96. DOI: 10.1109/ICSensT.2011.6137076
5. Yamazaki S., Nakane H., Tanaka A. Basic analysis of a metal detector. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2002. Vol. 51. Iss. 4. Pp. 810–814. DOI: 10.1109/TIM.2002.803397
6. Cheng Y., Wang S., Zhang M. Research of miniature magnetic coil sensor used for detecting power cables underground. International Conference on Electrical and Control Engineering. 2011. Pp. 6065–6068. DOI: 10.1109/ICECENG.2011.6057847
7. Куликов А.Л. Имитационное моделирование зондирования линий электропередач линейно-частотно-модулированными сигналами // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2007. № 5–6. С. 52–62.
8. Олейникова Л.А. Совершенствование технологии поиска подземных коммуникаций // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2008. № 4. С. 105–107.
9. Blay K.R., Weiss F., Clark D.A., de Groot G.J.J.B., Bick M., Sen D. Signal processing techniques for improved performance of a SQUID-based metal-detector. IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2009. Vol. 19. No. 3. Part 1. Pp. 812–815. DOI: 0.1109/TASC.2009.2017857
10. Lai W. Underground Utilities Imaging and Diagnosis. In book: Urban Informatics. 2021. Pp. 415–438. DOI:10.1007/978-981-15-8983-6_24
11. Брякин И.В., Бочкарев И.В. Методы подповерхностного зондирования и разработка устройства для локализации скрытых объектов // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2020. №5. С. 33–46.
12. Брякин И.В., Бочкарев И.В. Индукционная установка для дистанционного обнаружения подземных кабельных линий // Энергетика: Управление, качество и эффективность использования энергоресурсов: материалы IX Международной научно-технической конференции. Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2019. С. 310–315.
13. Брякин И.В., Бочкарев И.В. Гибридный метод индукционного зондирования для обнаружения подземных кабельных линий и трубопроводов // Электротехнические системы и комплексы. 2019. №2(43). С. 70–78. DOI: 10.18503/2311-8318-2019-2(43)-70-78
14. Bryakin I.V., Bochkarev I.V., Khrumshin V.R., Khrumshina E.A. Developing a combined method for detection of buried metal objects // Machines. 2021. Vol. 9. Iss. 5. 92. DOI: 10.3390/machines9050092
15. Чернецов М.В. Инвариантное преобразование в измерительных системах с параметрическими датчиками // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2018. № 1 (23). С. 11–17.
16. Свистунов Б.Л. Измерительные преобразователи для параметрических датчиков с использованием аналитической избыточности // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2017. № 2 (20). С. 94–100.
17. Нестеров В.Н., Ли А.Р. Теория и практика построения инвариантных измерительных преобразователей и систем на основе принципа двухканальности // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18. № 4(7). С. 1414–1422.
18. Келим Ю.М. Типовые элементы систем автоматического управления. М.: Форум-Инфра-М, 2002. 384 с.

References

1. Charles Garrett. Modern metal detectors. New York, 1998, 432 p.
2. Shcherbakov G.N. *Obnaruzhenie skrytykh obektov* [Detection of hidden objects]. Moscow: Arbat-Inform, 2004, 138 p. (In Russ.)
3. Adamenko M.V. *Metalloiskateli* [Metal detectors]. Moscow: DMK-press, 2006, 97 p. (In Russ.)
4. Tang Z., Carter L.J. Metal detector head analysis. Fifth International Conference on Sensing Technology. 2011, pp. 93–96. DOI: 10.1109/ICSensT.2011.6137076
5. Yamazaki S., Nakane H., Tanaka A. Basic analysis of a metal detector. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2002, vol. 51, iss. 4, pp. 810–814. DOI: 10.1109/TIM.2002.803397
6. Cheng Y., Wang S., Zhang M. Research of miniature magnetic coil sensor used for detecting power cables underground. International Conference on Electrical and Control Engineering. 2011, pp. 6065–6068. DOI: 10.1109/ICECENG.2011.6057847
7. Kulikov A.L. Simulation modeling of sounding of power lines with linear frequency-modulated signals. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Energy Sector Problems], 2007, no. 5–6, pp. 52–62. (In Russ.)
8. Oleinikova L.A. Improving the technology of searching for underground communications. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Severo-Kavkazskii region. Estestvennye nauki* [News of Higher Educational Institutions. North Caucasian Region. Natural Sciences], 2008, no. 4, pp. 105–107. (In Russ.)
9. Blay K.R., Weiss F., Clark D.A., de Groot G.J.J.B., Bick M., Sen D. Signal processing techniques for improved performance of a SQUID-based metal-detector. IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2009, vol. 19, no. 3, Part 1, pp. 812–815. DOI: 10.1109/TASC.2009.2017857
10. Lai W. Underground utilities imaging and diagnosis. In book: Urban Informatics. 2021, pp. 415–438. DOI: 10.1007/978-981-15-8983-6_24
11. Bryakin I.V., Bochkarev I.V. Methods of subsurface sounding and development of a device for localizing hidden objects. *Elektrooborudovanie: ekspluatatsiya i remont* [Electrical equipment: operation and repair], 2020, no. 5, pp. 33–46. (In Russ.)
12. Bryakin I.V., Bochkarev I.V. Induction installation for a remote detection of underground cable lines. *Energetika: Upravlenie, kachestvo i effektivnost ispolzovaniya energoresursov: Materialy IX Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Proceedings of the 9th International Scientific and Technical Conference "Power Industry: Management, Quality and Utilization Efficiency of Power Resources"]. Blagoveshchensk: Amur State University, 2019, pp. 310–315. (In Russ.)
13. Bryakin I.V., Bochkarev I.V. Hybrid induction sensing method for detection of underground cable lines and pipelines. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes]. 2019, no. 2(43), pp. 70–78. DOI: 10.18503/2311-8318-2019-2(43)-70-78
14. Bryakin I.V., Bochkarev I.V., Khrumshina E.A. Developing a combined method for detection of buried metal objects. *Machines*. 2021, vol. 9, no. 5, 92. DOI: 10.3390/machines9050092
15. Chernetsov M.V. Invariant transformation in measuring systems with parametric sensors. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol* [Measurement. Monitoring. Management. Control], 2018, no. 1 (23), pp. 11–17. (In Russ.)
16. Svistunov B.L. Measuring transducers for parametric sensors using analytical redundancy. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol* [Measurement. Monitoring. Management. Control], 2017, no. 2 (20), pp. 94–100. (In Russ.)
17. Nesterov V.N., Li A.R. Theory and practice of constructing invariant measuring transducers and systems based on the two-channel principle. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk* [Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2016, vol. 18, no. 4 (7), pp. 1414–1422. (In Russ.)
18. Kelim Yu.M. *Tipovye elementy sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Typical elements of automatic control systems]. Moscow: Forum-Infra-M, 2002, 384 p. (In Russ.)

Поступила 05.10.2021; принята к публикации 28.11.2021; опубликована 24.12.2021
Submitted 05/10/2021; revised 28/11/2021; published 24/12/2021

Брякин Иван Васильевич – доктор технических наук, профессор,
Институт машиноведения и автоматики Национальной академии наук Кыргызской Республики,
Бишкек, Кыргызская Республика.
Email: bivas2006@yandex.ru. ORCID 0000-0001-7463-8072

Бочкарев Игорь Викторович – доктор технических наук, профессор,
Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, Бишкек, Кыргызская Республика.
Email: elmech@mail.ru. ORCID 0000-0002-9873-9203

Храмшин Вадим Рифхатович – доктор технических наук, профессор,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия,
Email: hvrmgn@gmail.com. ORCID 0000-0003-0972-2803

Ivan V. Bryakin – DrSc (Eng.), Professor,
Institute of Mechanical Science and Automation of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic,
Bishkek, Kyrgyz Republic.
Email: bivas2006@yandex.ru. ORCID 0000-0001-7463-8072

Igor V. Bochkarev – DrSc (Eng.), Professor,
Razzakov Kyrgyz State Technical University, Bishkek, Kyrgyz Republic.
Email: elmech@mail.ru. ORCID 0000-0002-9873-9203

Vadim R. Khramshin – DrSc (Eng.), Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: hvrnmg@gmail.com. ORCID 0000-0003-0972-2803

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

УДК 621.743.42

DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-4-29-35



СПОСОБ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ЖИДКОСТЕКОЛЬНОЙ СТЕРЖНЕВОЙ СМЕСИ В ПРОЦЕССЕ ЕЕ ПРИГОТОВЛЕНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ

Гутько Ю.И., Войтенко В.В.

Луганский государственный университет имени В. Даля, Луганск

Аннотация. Постановка задачи. Качество отливок определяется качеством изготовления литейных форм и литейных стержней. Жидкостекольная стержневая технология является одной из наиболее доступных, дешевых и экологичных технологий, благодаря чему к ней в настоящее время возобновился интерес. Эта технология имеет ряд недостатков, которые делают ее менее конкурентоспособной по сравнению с другими стержневыми технологиями в основном по критериям стабильности качества и технологичности. Жидкостекольная стержневая смесь обладает сравнительно малым временем живучести; ее технологические параметры заметно зависят от химического состава, силикатного модуля и плотности используемого жидкого стекла, а также от рецептуры, температуры и влажности, что оказывает заметное влияние на качество жидкостекольных литейных стержней в процессе их изготовления. Контроль параметров стержневой смеси в процессе ее приготовления и использования позволит повысить качество жидкостекольных литейных стержней. **Цель.** Разработка способа контроля параметров жидкостекольной стержневой смеси в процессе ее приготовления и применения на стержневом участке литейного цеха. **Используемые методы.** Математическое моделирование распространения и отражения акустических волн в исследуемых средах, планирование экспериментов, проведение экспериментов в лабораторных условиях, статистическая обработка данных и сравнительный анализ результатов исследований. **Новизна.** Предложен способ контроля технологических параметров жидкостекольной стержневой смеси: средней плотности, живучести, процентного содержания жидкого стекла и добавок. **Результаты.** Показана возможность применения предложенного способа контроля для осуществления экспресс-контроля в условиях стержневого производства, который имеет высокое быстродействие и достаточную точность. **Практическая значимость.** Приведены результаты экспериментальной проверки предложенного способа контроля параметров жидкостекольных стержневых смесей с различным процентным содержанием жидкого стекла и добавок, отражающие особенности взаимодействия акустических волн со стержневыми смесями различных рецептур. Обсуждаются результаты эксперимента и возможности предложенного способа контроля для стержневого производства.

Ключевые слова: жидкостекольный литейный стержень, стержневая смесь, рецептура, живучесть, плотность стержневой смеси, способ контроля, акустическая волна, амплитуда акустической волны, поглощение, отражение, пьезоэлектрический преобразователь, эксперимент, зависимость.

© Гутько Ю.И., Войтенко В.В., 2021

Для цитирования

Гутько Ю.И., Войтенко В.В. Способ контроля параметров жидкостекольной стержневой смеси в процессе ее приготовления и применения // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №4. С. 29–35. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-4-29-35>



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

MONITORING OF SODIUM SILICATE CORE SAND MIXTURE PARAMETERS DURING PRODUCTION AND APPLICATION

Gutko Yu.I., Voytenko V.V.

Vladimir Dahl Lugansk State University, Lugansk

Abstract. Problem Statement. The quality of castings depends on the quality of manufacturing foundry molds and cores. The sodium silicate core-making technology is one of the most available, cheap, and eco-friendly technologies, so it is of current interest. This technology has some disadvantages making it less competitive in contrast with other core-making technologies on the quality stability and manufacturability. The sodium silicate core mixture has a comparatively short durability; its technological parameters significantly depend on a chemical composition, a silicate module, and density of used sodium silicate, as well as on a composition, temperature, and moisture, that has a significant effect on the quality of sodium silicate cores during the core-making process. Monitoring core mixture parameters during production and application will contribute to improving the quality of sodium silicate cores. **Objective.** The research is aimed at developing a method used to monitor parameters of the sodium silicate core mixture during its production and application at the core manufacturing department of a foundry shop. **Methods Applied:** mathematical modeling of the acoustic wave distribution and reflection in media under study, planning of experiments, laboratory-scale experiments, statistical data processing and a comparative analysis of the experimental results. **Originality.** The paper describes a suggested method used to monitor technological parameters of the sodium silicate core mixture: average density, durability, the percentage of sodium silicate and additives. **Results.** The paper gives a potential application of the suggested express control method for the core-making process due to high performance and a satisfactory precision. **Practical Relevance.** The paper presents results of the experimental verification of the suggested parameter control method for sodium silicate core mixtures with various percentages of sodium silicate and additives, which represent the interaction peculiarities of acoustic waves with core mixtures of various compositions. The paper discusses experimental results and potentials of the suggested control method for the core-making technology.

Keywords: foundry sodium silicate core, core mixture, composition, durability, core mixture density, control method, acoustic wave, acoustic amplitude, absorption, reflection, piezoelectric transducer, experiment, dependence.

For citation

Gutko Yu.I., Voytenko V.V. Monitoring of Sodium Silicate Core Sand Mixture Parameters During Production and Application. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021, vol. 19, no. 4, pp. 29–35. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-4-29-35>

Введение

Активное развитие литейного производства направлено на экономию стержневых и формовочных материалов, а также на снижение сопутствующих энергозатрат. Развиваются различные типы литья, включая литье по выплавляемым моделям, литье под действием силы тяжести, литье в песчаные формы и литье под давлением [1]. Наблюдается тенденция к увеличению доли производства алюминия и связанных с ним технологий легких металлов для машиностроения, автомобильного и железнодорожного транспорта, а также для авиации [2, 3]. Повышается внимание к экологичности литейного производства в целом, а также к снижению выбросов химических соединений при приготовлении стержневых и формовочных смесей, заливке литейных форм расплавленным металлом, охла-

ждении литейных форм и выбивке отливок из них [4]. Оцениваются последствия утилизации отработанных стержневых и формовочных песков, а также влияние отработанных песков на окружающую среду в процессе их хранения [5]. Это, в частности, вызывает повышенный интерес к жидкостекольной стержневой технологии, характеризующейся экологичностью, а также дешевизной и доступностью компонентов стержневой смеси.

Продолжается систематизация литейных и стержневых технологий, а также выработка рекомендаций по изготовлению отливок всеми распространенными методами литья, включая новые и наиболее перспективные технологии с позиции наличия значительных резервов для дальнейшего их развития [6, 7]. Достаточно часто в условиях стержневого участка литейного цеха изготовление стержневой смеси произво-

дится непрерывно либо циклично, поэтому осуществление контроля рецептуры, живучести и качества перемешивания компонентов стержневой смеси является весьма важным условием для получения литейных стержней и впоследствии отливок стабильного качества [8, 9]. В особенности это относится к имеющей перспективы дальнейшего усовершенствования жидкостекольной стержневой технологии. Эксплуатационные характеристики жидкостекольных литейных стержней во многом зависят от постоянства рецептуры стержневой смеси, имеющей сравнительно небольшую живучесть – порядка 30–60 мин, свойства которой в значительной мере зависят от ее химического состава и количества вводимых в нее добавок, а также от состава (силикатного модуля) и плотности жидкого стекла [10]. Поэтому разработка способов осуществления контроля технологических параметров жидкостекольной стержневой смеси в условиях стержневого участка является актуальной научно-технической задачей, имеющей практическую ценность.

Авторами предложен способ контроля наиболее важных технологических параметров жидкостекольной стержневой смеси, основанный на отражении акустических волн, распространяющихся в воздушной среде, от поверхности стержневой смеси. Суть предложенного способа контроля заключается в следующем. Акустическая волна, падая на поверхность стержневой смеси, частично поглощается стержневой смесью и частично отражается от нее. Коэффициент отражения акустической волны от поверхности стержневой смеси определяется следующими факторами: частотой акустической волны, углом падения волны и средней плотностью стержневой смеси. Таким образом, при заданных величинах частоты акустической волны и угла падения на поверхность стержневой смеси амплитуда отраженного сигнала будет зависеть от средней плотности стержневой смеси и способности поглощать звуковые колебания. Средняя плотность стержневой смеси в процессе ее приготовления уменьшается по мере перемешивания ее компонентов. При этом стержневая смесь становится более рыхлой. Таким образом, по амплитуде отраженной акустической волны можно контролировать степень готовности стержневой смеси к применению. С течением времени в жидкостекольной стержневой смеси протекают химические и физические процессы, приводящие к ее упрочнению, увеличению ее

плотности и снижению ее живучести. Увеличение плотности стержневой смеси приводит к увеличению амплитуды акустической волны, отраженной от поверхностного слоя стержневой смеси, по величине которой можно осуществлять контроль живучести стержневой смеси при ее использовании. Различные добавки, вводимые в стержневую смесь, по-разному изменяют ее среднюю плотность: добавки с малой плотностью снижают среднюю плотность стержневой смеси, а добавки с большой плотностью – увеличивают.

Полученные результаты и их обсуждение

Предварительные лабораторные и численные эксперименты, проведенные авторами, позволили установить общие закономерности распространения, отражения и поглощения акустических волн звукового и ультразвукового диапазона на границах раздела сред «металл – стержневая смесь» и «воздух – стержневая смесь». В общем виде была получена зависимость между амплитудой акустической волны, отраженной от поверхностного слоя стержневой смеси, и другими параметрами стержневой смеси, которая может быть описана выражением следующего вида:

$$A(t) = A_0 \cdot (G(t) \cdot k_g + J(t) \cdot k_j - S \cdot k_s + C \cdot k_c - H \cdot k_h - F \cdot k_{fe} - f \cdot k_f - \alpha \cdot k_a), \quad (1)$$

где $A(t)$ – амплитуда акустического давления акустической волны, отраженной от поверхностного слоя стержневой смеси, Па; A_0 – амплитуда акустического давления падающей акустической волны, Па; $G(t)$ – степень готовности стержневой смеси, %; k_g – нормирующий коэффициент степени готовности стержневой смеси, %⁻¹; $J(t)$ – степень живучести стержневой смеси, %; k_j – нормирующий коэффициент степени живучести стержневой смеси, %⁻¹; S – содержание в стержневой смеси жидкого стекла, %; k_s – нормирующий коэффициент содержания в стержневой смеси жидкого стекла, %⁻¹; C – содержание в стержневой смеси каменного угля, древесного угля или древесных опилок, %; k_c – нормирующий коэффициент содержания в стержневой смеси углерода, %⁻¹; H – содержание в стержневой смеси металлургического шлака, %; k_h – нормирующий коэффициент содержа-

ния в стержневой смеси металлургического шлака, %⁻¹; F – содержание в стержневой смеси стального порошка, %; k_{fe} – нормирующий коэффициент содержания в стержневой смеси железа, %⁻¹; f – частота акустической волны, Гц; k_f – коэффициент поглощения акустической волны в воздухе, Гц⁻¹; α – угол падения акустической волны на поверхность стержневой смеси, отсчитанный от перпендикуляра к границе раздела сред, рад; k_a – коэффициент угла падения акустической волны, рад⁻¹.

Поскольку в выражении (1) при заданных условиях эксперимента все слагаемые, кроме $G(t)$ и $J(t)$, являются константами, то это выражение может быть упрощено:

$$A(t) = A_0 \cdot (G(t) \cdot k_g + J(t) \cdot k_j + const). \quad (2)$$

Перепишем выражение (2) в следующем виде:

$$G(t) \cdot k_g + J(t) \cdot k_j = \frac{A(t)}{A_0} - const. \quad (3)$$

Поскольку время приготовления жидкостекольной стержневой смеси существенно меньше времени ее живучести, то на стадии приготовления стержневой смеси можно принять равным нулю слагаемое $J(t) \cdot k_j$ в выражении (3) и, та-

ким образом, по отношению $\frac{A(t)}{A_0}$ можно определить степень готовности $G(t)$ стержневой смеси. После того как стержневая смесь будет приготовлена, слагаемое $G(t) \cdot k_g$ в выражении (3) можно считать константой. Теперь по отношению $\frac{A(t)}{A_0}$ можно определить живучесть $J(t)$ стержневой смеси, связь которой с отношением $\frac{A(t)}{A_0}$ определялась экспериментально путем испытаний специальных образцов, изготовленных из жидкостекольной стержневой смеси, на прочность при растяжении в течение 90 мин после их изготовления с шагом 10 мин по времени изготовления.

Внешний вид разработанной авторами компьютеризированной установки для испытаний образцов из жидкостекольной стержневой смеси на прочность при растяжении, сжатии и изгибе, а

также внешний вид стержневого ящика, изготовленного из полиэтилена, с образцами из жидкостекольной стержневой смеси показаны на рис. 1.



Рис. 1. Компьютеризированная установка для испытаний образцов из стержневой смеси на прочность и стержневой ящик с образцами
Fig. 1. The computerized strength testing machine for the core mixture samples and the core box with the samples

Использовалась стержневая смесь, основными компонентами рецептуры которой были: кварцевый песок со средним размером песчинок 550 мкм в количестве 70–90%, натриевое жидкое стекло с плотностью 1,47 г/см³ в количестве 6–15%, портландцемент марки М-400 в количестве 4–5% от массы стержневой смеси. В качестве добавок были использованы порошок каменного угля, древесного угля либо древесные опилки в количестве 1–2%, а также стальной порошок со средним размером частиц 65 мкм в количестве 5–10%. Результаты испытаний жидкостекольных образцов на прочность усреднялись по десяти стержням, которые были изготовлены одновременно и выдержаны в течение 30 мин в среде углекислого газа при избыточном давлении 2 атм и среднем расходе газа 5 л/мин, а также в последствии подвергнутые сушке при температуре 130–150°C в воздушной среде в течение 60 мин. По результатам проведенных испытаний образцов на прочность при растяжении определялось время, прошедшее от момента приготовления жидкостекольной стержневой смеси до момента, когда заметно снижалась прочность образцов, изготовленных из такой смеси. При уменьшении прочности при растяжении образцов литейных стержней более чем на 20% с высокой вероятностью возникали нарушения их

целостности при извлечении из стержневых ящиков. Время готовности стержневой смеси определялось путем последовательного измерения ее плотности, для чего взвешивались пробы стержневой смеси одинакового объема. Стержневая смесь считалась готовой, когда ее плотность достигала минимального значения для исследуемой рецептуры.

Экспериментальные исследования, проведенные авторами, показали, что для акустического контроля вышерассмотренных параметров жидкостекольной стержневой смеси могут быть использованы акустические волны как ультразвукового, так и звукового диапазона. Ультразвук имеет высокое поглощение в воздушной среде. Применяемые для его излучения и приема пьезоэлектрические преобразователи имеют узкую диаграмму направленности.

Для осуществления акустического контроля технологических параметров стержневой смеси также может быть использовано излучение ультразвуковых волн в виде модулированных посылок непосредственно в стержневую смесь. Для этого был использован стальной стержень длиной 50 мм, к одному торцу которого был приклеен пьезоэлектрический преобразователь, излучающий и принимающий ультразвуковые колебания. Необходимость такого стального стержня и его длина определяются глубиной мертвой зоны, в которой контроль отраженного сигнала невозможен из-за достаточно длительного времени излучения акустической посылки пьезоэлектрическим преобразователем. С противоположной стороны пьезоэлектрического преобразователя приклеен демфирующий материал для предотвращения условий для возникновения затухающих колебаний пьезоэлектрического преобразователя. Таким образом реализуется эхо-импульсный метод ультразвукового контроля. По амплитуде отраженного ультразвукового сигнала от противоположного торца стального стержня можно контролировать технологические параметры стержневой смеси, так как на амплитуду отраженного сигнала влияют акустические свойства контактирующей с противоположным торцом стального стержня жидкостекольной стержневой смеси. Так, увеличение плотности жидкостекольной стержневой смеси и ее демфирующей способности будет приводить к уменьшению амплитуды отраженного от границы раздела сред акустического сигнала в результате того, что часть акустического сигнала будет распространяться в жидкостекольную стержневую жидкость.

Внешний вид разработанного и использованного авторами в экспериментах ультразвукового прибора – приставки к планшетному компьютеру – показан на **рис. 2**. Ультразвуковой прибор состоит из следующих функциональных блоков: пьезоэлектрический преобразователь, генератор с ударным возбуждением, синхронизатор, амплитудный ограничитель с автоматической регулировкой усиления по времени распространения акустического сигнала, предварительный усилитель радиочастоты, основной усилитель радиочастоты, блок автоматической регулировки усиления, амплитудный детектор, усилитель импульсов, микроконтроллер, планшетный компьютер.

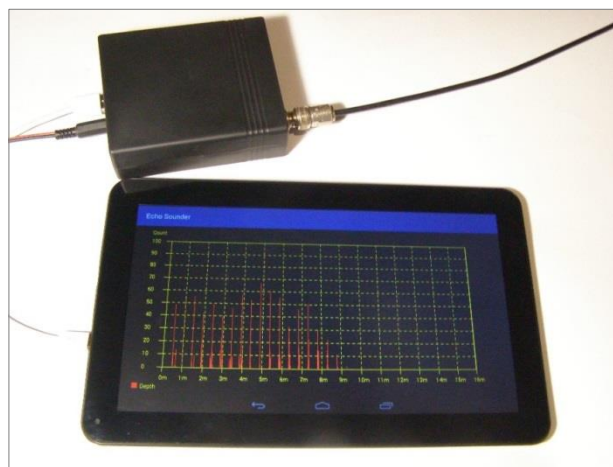


Рис. 2. Внешний вид ультразвукового прибора – приставки к планшетному компьютеру
Fig. 2. The appearance of the ultrasonic device in the form of the tablet accessory

При использовании акустических волн звукового диапазона необходимо осуществить выбор частоты зондирующего акустического сигнала после анализа спектра акустической эмиссии технологического оборудования стержневого участка. Так, на основании проведенных измерений было установлено, что основная мощность шума оборудования стержневого участка приходится на низкие частоты, не доходящие до 8 кГц. Таким образом, во избежание влияния акустических помех на работу измерительного оборудования рабочая частота должна быть выбрана выше 8 кГц.

При проведении экспериментов, направленных на проверку зависимости между амплитудой акустической волны, отраженной от поверхностного слоя жидкостекольной стержневой смеси, и другими параметрами жидкостекольной стержневой смеси в качестве излучателя и приемника акустического сигнала были выбраны

пьезоэлектрические излучатели торговой марки Yzsound, изготавливаемые в Китае, а также генератор звуковой частоты и полосовой усилитель, выполненные на базе высокостабильного операционного усилителя LM358 с рабочей полосой частот до 100 кГц. Для ввода данных в ЭВМ использовалась интегрированная звуковая карта с частотой дискретизации входного аналогового сигнала 192 кГц. Отношение амплитуд акустических волн, излучаемых пьезоэлектрическим излучателем и отраженных от поверхности жидкостекольной стержневой смеси, по соответствующим им оцифрованным электрическим сигналам контролировалось с использованием цифрового аудиоредактора Sound Forge Pro 11.0. Во избежание эффекта образования пучностей и узлов при образовании стоячих волн использовалась амплитудная модуляция излучаемого акустического сигнала сигналом прямоугольной формы со скважностью 1:10 и уровнем модуляции 100%. Для снижения акустической наводки непосредственно от излучающего на приемный пьезоэлектрический преобразователь использовался звукопоглощающий экран, изготовленный из фильтра механической очистки воды со степенью фильтрации 10 мкм, обладающий хорошим звукопоглощением в рабочем диапазоне частот. Результаты измерений отношения амплитуд акустических волн, излучаемых пьезоэлектрическим излучателем и отраженных от поверхности жидкостекольной стержневой смеси, усреднялись. Количество повторных измерений, подлежащих усреднению, рассчитывалось исходя из 99-процентной достоверности ожидаемых результатов акустического контроля жидкостекольной стержневой смеси с использованием критерия Фишера.

Заключение

В результате проведенных исследований было установлено, что в течение времени приготовления стержневой смеси (до ее готовности) амплитуда акустического сигнала, отраженного от поверхностного слоя стержневой смеси, уменьшается в среднем на 15%, а при достижении предельного уровня живучести стержневой смеси амплитуда отраженного акустического сигнала увеличивается в среднем на 7%. Добавление в стержневую смесь каменного угля, древесного угля либо древесных опилок в количестве 1–2% приводит к уменьшению амплитуды отраженного акустического сигнала на 4–6%, а добавление в стержневую смесь стального по-

рошка в количестве 5–10% приводит к уменьшению амплитуды отраженного акустического сигнала на 18–25%, что объясняется большим рассеиванием и поглощением акустических колебаний на стальных частицах.

Таким образом, предложенный способ акустического контроля технологических параметров жидкостекольной стержневой смеси, основанный на полученной зависимости между амплитудой акустической волны, отраженной от поверхностного слоя жидкостекольной стержневой смеси, и другими параметрами стержневой смеси, вполне применим в условиях стержневого участка литейного производства, так как имеет достаточную точность для контроля степени готовности и живучести стержневой смеси. Возможность использования контактного и бесконтактного введения акустических волн в стержневую смесь при использовании ультразвуковых или звуковых колебаний расширяет возможности практического применения предложенного способа контроля. Точность акустического контроля при контактном введении ультразвуковых колебаний в жидкостекольную стержневую смесь по сравнению с бесконтактным контролем через воздушную среду в условиях стержневого производства может оказаться заметно меньшей из-за налипания стержневой смеси на стальной стержень излучателя ультразвуковых волн при длительной эксплуатации оборудования.

На точность результатов осуществления акустического зондирования поверхности жидкостекольной стержневой смеси через воздушную среду может оказывать заметное влияние изменение однородности поверхности стержневой смеси. Поэтому комбинирование обоих вариантов осуществления акустического контроля параметров жидкостекольной стержневой смеси с необходимыми мероприятиями по обслуживанию излучателей акустических колебаний в процессе их длительной эксплуатации позволит получить требуемую точность результатов акустического контроля в условиях стержневого участка литейного цеха. Применение на технологическом оборудовании для приготовления жидкостекольной стержневой смеси требующего обслуживания электронного измерительного устройства целесообразно с точки зрения необходимости повышения производительности стержневого процесса и качества жидкостекольных литейных стержней. Работа лопатных смесителей создает периодические возмущающие воздействия на измерительную систему, прояв-

ляющиеся в изменении условий отражения, рассеивания и поглощения акустических сигналов при прохождении лопастей в зоне чувствительности датчиков. Такие возмущения имеют строгую периодичность, что позволяет уменьшить их влияние на точность измерений.

Список литературы

1. Yurchenko S. V. Modern formula of quality. Foundry production and metallurgy // *Litiyo i Metallurgiya* (Foundry production and metallurgy). № 3. С. 89–92.
2. Di Sabatino Marisa. Fluidity of Aluminium Foundry Alloys. Doctoral thesis, comprehensive summary, Norwegian University of Science and Technology, Department of Materials Technology, 2005. 161 p.
3. Mikell P. Groover. Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems. 7th Ed. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2020. 816 c.
4. Holtzer M., Kmita A. Mold and Core Sands in Metalcasting: Chemistry and Ecology Sustainable Development. New York City, Dordrecht, Heidelberg, London: Springer, 2020. 378 c.
5. Xie Yiran. Recycling of foundry waste materials. Electronic Thesis or Diss., University of Birmingham, 2016. 306 c.
6. Belash V. V., Akhmetov T. A., Oborov M. V. The ways to ensure fatigue strength of cold-formed rebars. Foundry production and metallurgy // *Litiyo i Metallurgiya* (Foundry production and metallurgy). № 3. С. 102–106.
7. Jain P. L. Principles of Foundry Technology. 5th Ed. New York City: Tata McGraw Hill Publishing, 2014. 479 c.
8. Srinivasan M. Science and Technology of Casting Processes. London: IntechOpen Limited, 2012. 350 c.
9. Wang W., Conley H. W., Stoll J. G. Rapid Tooling Guidelines for Sand Casting. New York City, Dordrecht, Heidelberg, London: Springer, 2010. 164 c.
10. Brown J. R. Foseco Ferrous Foundryman's Handbook. 11th Ed. Oxford: Butterworth Heinemann, 2000. 384 c.

References

1. Yurchenko S.V. Modern formula of quality. *Litiyo i metallurgiya* [Foundry production and metallurgy], 2019, no. 3, pp. 89–92. (In Russ.)
2. Di Sabatino Marisa. Fluidity of aluminium foundry alloys. Doctoral thesis, comprehensive summary. Norwegian University of Science and Technology, Department of Materials Technology, 2005, 161 p.
3. Mikell P. Groover. Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems. 7th Ed. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2020, 816 p.
4. Holtzer M., Kmita A. Mold and core sands in metalcasting: chemistry and ecology sustainable development. New York City, Dordrecht, Heidelberg, London: Springer, 2020, 378 p.
5. Xie Yiran. Recycling of foundry waste materials. Electronic thesis, the University of Birmingham, 2016, 306 p.
6. Belash V. V., Akhmetov T. A., Oborov M. V. The ways to ensure fatigue strength of cold-formed rebars. *Litiyo i metallurgiya* [Foundry production and metallurgy], 2019, no. 3, pp. 102–106. (In Russ.)
7. Jain P. L. Principles of foundry technology. 5th Ed. New York City: Tata McGraw Hill Publishing, 2014, 479 p.
8. Srinivasan M. Science and technology of casting processes. London: IntechOpen Limited, 2012, 350 p.
9. Wang W., Conley H. W., Stoll J. G. Rapid tooling guidelines for sand casting. New York City, Dordrecht, Heidelberg, London: Springer, 2010, 164 p.
10. Brown J. R. Foseco Ferrous Foundryman's Handbook. 11th Ed. Oxford: Butterworth Heinemann, 2000, 384 p.

Поступила 18.07.2021; принята к публикации 02.08.2021; опубликована 24.12.2021
Submitted 18/07/2021; revised 02/08/2021; published 24/12/2021

Гутько Юрий Иванович – доктор технических наук, профессор, первый проректор,
Луганский государственный университет имени В. Даля, Луганск.
Email: lguni.lit@yandex.ru

Войтенко Валерий Владимирович – аспирант кафедры промышленного и художественного литья,
Луганский государственный университет имени В. Даля, Луганск.
Email: valery.voytenko@outlook.com

Yury I. Gutko – DrSc (Eng.), Professor, First Vice-Rector,
Vladimir Dahl Lugansk State University, Lugansk.
Email: lguni.lit@yandex.ru

Valery V. Voytenko – postgraduate student of the Industrial and Art Castings Department,
Vladimir Dahl Lugansk State University, Lugansk.
Email: valery.voytenko@outlook.com

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

УДК 549:54.055

DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-4-36-44



ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ ШЛАКОВ ПРОИЗВОДСТВА ФЕРРОМАНГАНОФОСФОРА ИЗ СТАРОУТКИНСКОГО ЗАВОДА

Ерохин Ю.В., Пономарев В.С., Захаров А.В., Леонова Л.В.

Институт геологии и геохимии им. акад. А.Н. Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Уральский регион уже более 300 лет является металлургическим центром России, и за столь продолжительный временной период здесь накопилось большое количество техногенных отходов (шлаков). Изучение вещественного состава шлаков является актуальной задачей, так как прежде чем их утилизировать, надо оценить их минеральный состав. Многие шлаки представляют собой потенциальную руду, которую можно дополнительно переработать, некоторые из них являются техногенными огнеупорами и т.д. **Цель работы.** Изучение вещественного (минерального) состава шлаков Староуткинского металлургического завода, полученных при производстве ферроманганофосфора. **Используемые методы.** Химический состав породообразующих и рудных минералов установлен с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM-6390LV фирмы Jeol с энергодисперсионной приставкой INCA Energy 450 X-Max 80 фирмы Oxford Instruments (ИГГ УрО РАН, г. Екатеринбург). Для анализа использовались полированные петрографические шлифы, вырезанные из кусочков шлака. **Новизна.** Изучение вещественного состава шлаков проводилось с точки зрения классической минералогии и с использованием современной обязательной номенклатуры Международной минералогической ассоциации. **Результат.** Впервые изучена минералогия шлаков ферроманганофосфорного производства Староуткинского металлургического завода. Установлено, что они сложены глаукохроит-ларнитовым агрегатом со значительным содержанием акерманита, стекла и постоянным присутствием ранкинита, алабандина и фосфида димарганца (Mn_2P). Данные шлаки являются отходами ферроманганофосфорного производства, а температура их образования оценивается в узких пределах – 1420–1410°C. **Практическая значимость.** Изученные нами шлаки можно пускать в дополнительную переработку. При детальной сепарации весь шлак можно полностью переработать. Выделенные глаукохроит, алабандин и фосфид димарганца являются дополнительным источником получения марганца, а остальные минералы (акерманит, ларнит и ранкинит) и стекло могут быть использованы как вяжущие вещества в цементном производстве.

Ключевые слова: акерманит, глаукохроит, ларнит, алабандин, минералогия, шлаки, Староуткинский металлургический завод.

© Ерохин Ю.В., Пономарев В.С., Захаров А.В., Леонова Л.В., 2021

Для цитирования

Вещественный состав шлаков производства ферроманганофосфора из Староуткинского завода / Ерохин Ю.В., Пономарев В.С., Захаров А.В., Леонова Л.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №4. С. 36–44. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-4-36-44>



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

MATERIAL COMPOSITION OF SLAGS FORMED WHEN PRODUCING FERROMANGANOPHOSPHORUS AT THE STAROUTKINSKY PLANT

Erokhin Yu.V., Ponomarev V.S., Zakharov A.V., Leonova L.V.

Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, RAS Ural Branch, Yekaterinburg, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The Ural region has been a metallurgical center of Russia for over 300 years, resulting in accumulating a large volume of man-made waste (slag) for such a long period. The study of the material composition of slag is a currently important task, since before disposing of slags, their mineral composition should be assessed. Many slags are potential ores that can be further processed; some of them are technology-related refractories, etc. **Objectives.** The research is aimed at studying the material (mineral) composition of slags of the Staroutkinsky Metallurgical Plant formed when producing ferromanganophosphorus. **Methods Applied.** A chemical composition of rock-forming and ore minerals is established using a JSM-6390LV Scanning Electron Microscope by Jeol with INCA Energy 450 X-Max 80, an energy-dispersive attachment, by Oxford Instruments (the Institute of Geology and Geochemistry, the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg). To carry out the analysis, the authors used polished petrographic thin sections cut from pieces of slag. **Originality.** A material composition of the slags was studied from a point of view of classical mineralogy, using the modern mandatory nomenclature of the International Mineralogical Association. **Findings.** For the first time, the authors studied mineralogy of slags at the Staroutkinsky Metallurgical Plant formed when producing ferromanganophosphorus. It has been found that they are composed of a glaucochroite-larnite aggregate with a significant content of akermanite, glass and the constant presence of rankinite, alabandite, and dimanganese phosphide (Mn_2P). These slags are wastes of ferromanganophosphorus production, and their formation temperature is within the narrow limits of 1420 to 1410°C. **Practical Relevance.** The slags under our study can be recycled. All slag can be completely processed by detailed separation. The separated glaucochroite, alabandite and dimanganese phosphide are an additional source of producing manganese, and the rest of the minerals (akermanite, larnite, and rankinite) and glass can be used as binders in cement production.

Keywords: akermanite, glaucochroite, larnite, alabandite, mineralogy, slags, the Staroutkinsky Metallurgical Plant.

For citation

Erokhin Yu.V., Ponomarev V.S., Zakharov A.V., Leonova L.V. Material Composition of Slags Formed when Producing Ferromanganophosphorus at the Staroutkinsky Plant. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021, vol. 19, no. 4, pp. 36–44. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-4-36-44>

Введение

Староуткинский металлургический завод является одним из старейших предприятий Среднего Урала. Он построен Акинфием Демидовым на р. Утка, притоке р. Чусовой, примерно в 80 км к северо-западу от г. Екатеринбурга. Завод начал функционировать с осени 1729 г. и сначала занимался переделом чугуна из Верхнетагильского завода, который доставлялся гужевым транспортом. С середины 1730-х гг. завод стал не только передельным, но и чугуноплавильным. После смерти А.Н. Демидова в 1745 г. предприятие несколько раз переходило от одного из его наследников к другому. В итоге в 1758 г. во владение заводом вступил Г.А. Демидов, основавший рядом Бисертский завод, который специализировался на переделе чугуна Староуткинского завода. С 1761 г. предприятие находилось в совместном управлении наследников Г.А. Демидова, с

весны 1765 г. завод стал собственностью П.Г. Демидова. В 1767 г. он продал завод брату А.Г. Демидову, которому удалось стабилизировать положение предприятия. Далее завод почти сто лет хорошо работал и находился в управлении клана Демидовых. В 1846 г. предприятие оказалось в сложном финансовом положении и в 1847 г. было отобрано у Демидовых и передано государству [1, 2].

В 1848 г. завод перешел к товариществу Суксунских горных заводов, но уже в 1863 г. предприятие снова вернулось в государственную казну, так как товарищество не смогло приспособиться к новым условиям при отмене крепостного права. В 1870–1880-х гг. ситуация стала меняться в лучшую сторону, в 1871 г. кричное производство заменено пудлинговым. Тогда же начинается ремонт и перестройка старых производственных помещений и сооружение новых. С 1886 г. владельцем завода стал А.П. Демидов, но

уже в 1889 г. на предприятии учреждено кон- курсное управление, продавшее завод в 1891 г. С.А. Строганову. Промышленный кризис на ру- беже XIX–XX вв. привел к падению объема про- изводства. В годы Первой мировой войны пред- приятие более-менее работало, но весной 1918 г. завод был национализирован, а в годы Граждан- ской войны – разрушен. С 1922 по 1942 гг. пред- приятие работало временами и с долгими про- стоями. Как ни странно, но полноценному вос- становлению завода послужила Великая Отече- ственная война 1941–1945 гг. С 1942 по 1993 гг. предприятие активно работало и даже освоило с 1958 г. выпуск высокодефицитных феррофосфо- ра и ферроманганфосфора [1, 2].

К сожалению, в рыночных условиях совре- менной России завод сократился до мелкого предприятия, выпускающего техническую дробь. От былого величия сохранился только остов старинного красивого здания. Удивитель- но, но за почти 300-летнюю историю завода ни- какого детального изучения вещественного со- става шлаков Староуткинского завода не про- водилось.

Отбор образцов шлака и методы исследования

Шлаки Староуткинского завода являются ос- новным техногенным мусором в окрестностях самого предприятия. На территории населенного пункта шлакоотвал отсутствует, так как с 1946 г. все отходы металлургического производства шли на изготовление минеральной ваты. При осмотре шлаков нам встретились красивые зеленые образ- цы, тонко-мелкозернистые, с содержанием пор до 15–20%. Отбор проб осуществлен на территории бывшего завода (привязка с GPS-навигатора – N 57°23'04.8", E 059°32'11.1"). Эти шлаки и были нами изучены на предмет минерального состава.

Химический состав породообразующих и рудных минералов определен с помощью скани- рующего электронного микроскопа JSM-6390LV фирмы Jeol с энергодисперсионной приставкой INCA Energy 450 X-Max 80 фирмы Oxford Instruments (ИГГ УрО РАН, г. Екатеринбург, ана- литик Л.В. Леонова). Для анализа использовались полированные петрографические шлифы, выре- занные из кусочков шлаков.

Полученные результаты и их обсуждение

В результате исследований оказалось, что ото- бранные нами зеленые шлаки сложены глаукохро-

ит-ларнитовым агрегатом со значительным содер- жанием акерманита, стекла и постоянным присут- ствием ранкинита, алабандина и фосфида марган- ца (Mn_2P). Химический состав шлака следующий, мас. %: SO_3 – 0,18; P_2O_5 – 0,61; SiO_2 – 34,85; TiO_2 – 0,12; V_2O_5 – 0,02; Al_2O_3 – 3,12; FeO – 0,36; MnO – 30,73; MgO – 1,53; SrO – 0,04; CaO – 27,55; Na_2O – 0,26; K_2O – 0,46 (получен методом сканирования с поверхности всего полированного шлифа).

Акерманит ($Ca_2Mg[Si_2O_7]$) является одним из главных породообразующих минералов шлака, он образует крупные короткопризматические кри- сталлы, размером до 1–2 мм в длину. Его содер- жание достигает 30 об. % породы (рис. 1, 2). Кри- сталлы насыщены эмульсионными (распадными) включениями алабандина и часто содержат в цен- тральной части фрагменты окружающего шлака. Индивиды имеют небольшую химическую зо- нальность и по данным кристаллохимического пересчета относятся к марганцовистому акерма- ниту (табл. 1). В качестве примесей отмечаются щелочи (суммарно в пределах 1 мас. %). Минерал предельно марганцовистый и краевые зоны инди- видов можно было бы даже считать Mn-аналогом акерманита, если бы не вакансии в позиции каль- ция, которая с большой долей вероятности ком- пенсируется марганцем, а не магнием или алю- минием. Интересно, что марганцовистый член группы мелилита уже давно синтезирован [3], а относительно недавно получили и железистый акерманит [4].

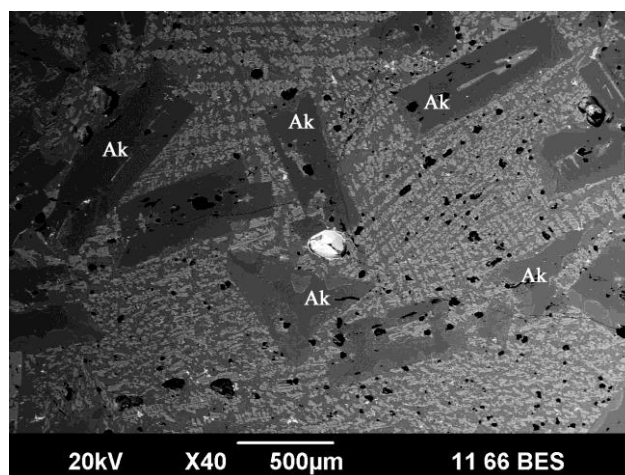


Рис. 1. Общий вид шлака Староуткинского завода с крупными кристаллами акерманита (Ak). BSE-изображение, СЭМ JSM-6390LV

Fig. 1. General view of slag from the Staroutkinsky Plant, containing coarse crystals of akermanite (Ak). BSE image, JSM-6390LV SEM

Таблица 1. Химический состав акерманита из шлака Староуткинского завода, мас. %

Table 1. Chemical composition of akermanite from slags from the Staroutkinsky Plant, wt. %

№	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Сумма
1	40,94	5,19	9,70	6,32	36,84	0,72	0,29	100
2ц	41,03	5,32	9,09	6,49	36,96	0,84	0,27	100
2пр	41,06	5,28	9,93	5,98	36,63	0,73	0,39	100
2кр	40,76	5,35	10,75	5,54	36,40	0,87	0,33	100
3	40,83	5,19	10,81	5,51	36,55	0,76	0,35	100
4	41,16	5,33	10,35	5,48	36,53	0,77	0,38	100
Кристаллохимическая формула в расчете на 5 формульных единиц								
1	$(Ca_{1.86}Na_{0.07}Mn_{0.05}K_{0.02})_{2.00}(Mg_{0.44}Mn_{0.34}Al_{0.22})_{1.00}[(Si_{1.93}Al_{0.07})_{2.00}O_7]$							
2ц	$(Ca_{1.86}Na_{0.08}Mn_{0.04}K_{0.02})_{2.00}(Mg_{0.46}Mn_{0.32}Al_{0.22})_{1.00}[(Si_{1.93}Al_{0.07})_{2.00}O_7]$							
2пр	$(Ca_{1.86}Na_{0.07}Mn_{0.05}K_{0.02})_{2.00}(Mg_{0.42}Mn_{0.35}Al_{0.23})_{1.00}[(Si_{1.94}Al_{0.06})_{2.00}O_7]$							
2кр	$(Ca_{1.85}Na_{0.08}Mn_{0.05}K_{0.02})_{2.00}(Mg_{0.39}Mn_{0.38}Al_{0.23})_{1.00}[(Si_{1.93}Al_{0.07})_{2.00}O_7]$							
3	$(Ca_{1.86}Na_{0.07}Mn_{0.05}K_{0.02})_{2.00}(Mg_{0.39}Mn_{0.38}Al_{0.23})_{1.00}[(Si_{1.94}Al_{0.06})_{2.00}O_7]$							
4	$(Ca_{1.86}Na_{0.07}Mn_{0.05}K_{0.02})_{2.00}(Mg_{0.39}Mn_{0.37}Al_{0.24})_{1.00}[(Si_{1.95}Al_{0.05})_{2.00}O_7]$							

Примечание. Здесь и далее «ц» – центр зерна, «пр» – промежуточная зона, «кр» – край зерна.

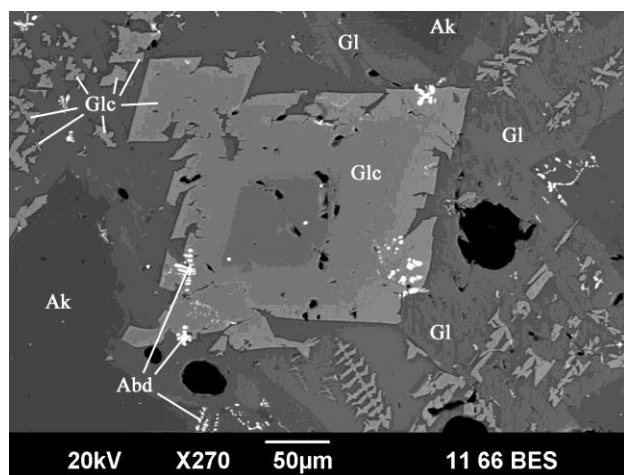


Рис. 2. Глаукохроит (Glc), алабандин (Abd), акерманит (Ak) и стекло (Gl) в матрице шлака. BSE-изображение, СЭМ JSM-6390LV

Fig. 2. Glaucophroite (Glc), alabandite (Abd), akermanite (Ak) and glass (Gl) in the slag matrix. BSE image, JSM-6390LV SEM

В природных условиях марганцовистый акерманит пока не установлен, а обычный акерманит обнаружен в известковых скарнах [5], метеоритах (углистых хондритах) [6] и пирометаморфических комплексах [7], является распространенным минералом доменных шлаков различного производства [8, 9 и др.].

Глаукохроит ($CaMn[SiO_4]$) также является одним из главных породообразующих минералов шлака, он собственно и придает окраску породе, так как характеризуется зеленым цветом. Его содержание варьирует в пределах 30–35 об. % поро-

ды (см. рис. 2, 3). Он образует две генерации кристаллов: крупные ромбовидные индивиды размером до 300 мкм и многочисленные мелкие (до 50 мкм) скелетные кристаллы, рассеянные по всей матрице шлака. Минерал имеет устойчивый химический состав и вполне уверенно определяется как глаукохроит (табл. 2). Из примесей устанавливается только MgO (до 7,7 мас. %). Крупные кристаллы первой генерации имеют химическую зональность. В центральной части они сложены глаукохроитом с высоким содержанием минала монтчеллита (до 34%), в промежуточной и краевой зоне количество примеси монтчеллита последовательно снижается (до 17 и 14%). При этом к краям крупных кристаллов отмечается небольшой дефицит в позиции кальция, который, по всей видимости, компенсируется избытком марганца, то есть в минерале появляется минал тефроита (до 7%). Интересно, что в скелетных кристаллах глаукохроита второй генерации дефицит в позиции кальция еще больше нарастает до 0,20–0,24 ф. ед., то есть до 20–24% минала тефроита. Подобные замещения кальция марганцем в структуре глаукохроита уже описывались на природных объектах [10].

В целом в природе глаукохроит встречается достаточно редко и исключительно в метаморфизованных марганцевых рудах [10], высокотемпературных известковых скарнах [11] и стратиформных цинковых месторождениях [12]. При этом он является важным минералом марганцевых и ферромарганцевых шлаков различного производства [13, 14 и др.].

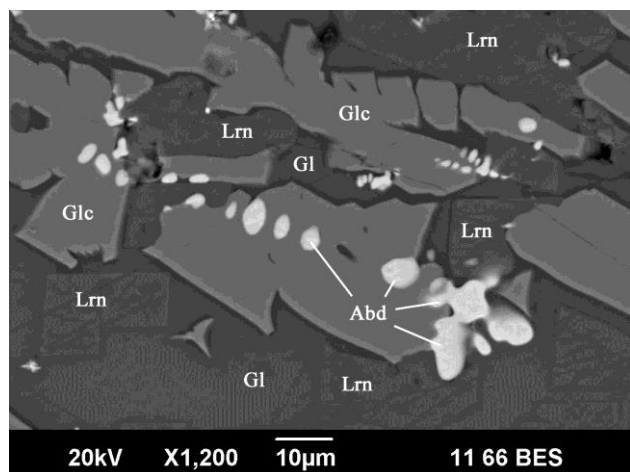


Рис. 3. Агрегат глаукохроита (Glc), ларнита (Lrn) и алабандина (Abd) в стекле (Gl) в матрице шлака. BSE-изображение, СЭМ JSM-6390LV
Fig. 3. Aggregate of glaucophroite (Glc), larnite (Lrn) and alabandite (Abd) in glass (Gl) in the slag matrix. BSE image, JSM-6390LV SEM

Таблица 2. Химический состав глаукохроита из шлака Староуткинского завода, мас. %
Table 2. Chemical composition of glaucophroite from slags from the Staroutkinsky Plant, wt. %

№	SiO ₂	MnO	MgO	CaO	Сумма
1ц	34,05	26,92	7,67	31,36	100
1пр	33,07	33,93	3,70	29,30	100
1кр	32,87	35,92	3,05	28,16	100
3	32,30	40,92	2,88	23,90	100
4	32,28	40,96	2,75	24,01	100
5	32,34	42,56	2,54	22,56	100
Кристаллохимическая формула в расчете на 3 формульные единицы					
1ц	Ca _{0,99} (Mn _{0,67} Mg _{0,34}) _{1,01} [Si _{1,00} O ₄]				
1пр	(Ca _{0,95} Mn _{0,04}) _{0,99} (Mn _{0,83} Mg _{0,17}) _{1,00} [Si _{1,01} O ₄]				
1кр	(Ca _{0,92} Mn _{0,07}) _{0,99} (Mn _{0,86} Mg _{0,14}) _{1,00} [Si _{1,01} O ₄]				
3	(Ca _{0,80} Mn _{0,20}) _{1,00} (Mn _{0,87} Mg _{0,13}) _{1,00} [Si _{1,00} O ₄]				
4	(Ca _{0,80} Mn _{0,20}) _{1,00} (Mn _{0,87} Mg _{0,13}) _{1,00} [Si _{1,00} O ₄]				
5	(Ca _{0,75} Mn _{0,24}) _{0,99} (Mn _{0,88} Mg _{0,12}) _{1,00} [Si _{1,01} O ₄]				

Ларнит (Ca₂[SiO₄]) является второстепенным породообразующим минералом шлака и его содержание варьирует до 10–15 об. % породы (см. **рис. 3**). Он образует отдельные ромбовидные индивиды с размером отдельных кристаллов до 50–70 мкм, а также тонкозернистый агрегат из них. Минерал уверенно определяется как ларнит (**табл. 3**), из примесей содержит только MnO (до 5,11 мас. %), что соответствует 6,5% минала тефроита.

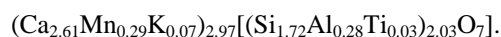
Таблица 3. Химический состав ларнита из шлака Староуткинского завода, мас. %
Table 3. Chemical composition of larnite from slags from the Staroutkinsky Plant, wt. %

№	SiO ₂	MnO	CaO	Сумма
1	34,89	3,66	61,45	100
2	35,02	3,78	61,20	100
3	34,89	4,14	60,97	100
4	34,51	4,98	60,51	100
5	34,95	5,11	59,94	100
Кристаллохимическая формула в расчете на 3 формульные единицы				
1	(Ca _{1,90} Mn _{0,09}) _{1,99} [Si _{1,01} O ₄]			
2	(Ca _{1,90} Mn _{0,09}) _{1,99} [Si _{1,01} O ₄]			
3	(Ca _{1,89} Mn _{0,10}) _{1,99} [Si _{1,01} O ₄]			
4	(Ca _{1,88} Mn _{0,12}) _{2,00} [Si _{1,00} O ₄]			
5	(Ca _{1,86} Mn _{0,13}) _{1,99} [Si _{1,01} O ₄]			

В природных условиях ларнит является минералом высокотемпературного изменения известняков, установлен в некоторых мраморах [15] и в пирометаморфических формациях [16 и др.]. В техногенных условиях ларнит вполне обычный минерал производства цемента, известен как белит. Он устойчив в широком интервале температур 150–2100°C [17]. Ларнит встречается в шлаках разного производства [18 и др.], вплоть до ультраогнеупорных [19].

Ранкинит (Ca₃[Si₂O₇]) является редким минералом шлака и его содержание не превышает 5 об. % породы. Встречается исключительно в глаукохроит-ларнитовом агрегате, образуя редкие ксеноморфные выделения, до 20–25 мкм. Химический состав (в мас. %, среднее из 7-ми анализов): SiO₂ – 35,72; TiO₂ – 0,70; Al₂O₃ – 4,94; MnO – 7,19; CaO – 50,37; K₂O – 1,08, что соответствует ранкиниту.

Пересчет на кристаллохимическую формулу следующий:



В природе встречается как минерал высокотемпературного изменения известняков [20] и отмечается в пирометаморфических формациях [21]. В техногенных условиях ранкинит является промежуточным продуктом в производстве портландцементного клинкера [22], кроме того, является обычным минералом в различных доменных шлаках [23].

Алабандин (MnS) в шлаке Староуткинского завода образует каплевидные скопления в кристаллах акерманита и скелетные включения в ин-

дивадах глаукохроита, реже встречается в массе стекла (см. **рис. 3**), иногда заполняет в виде пленки стенки пустот. Каплевидные скопления в акерманите, по всей видимости, являются I генерацией алабандина и кристаллизуются первыми. Скелетные включения сульфида имеют вытянутую или крестообразную форму размером до 50 мкм, формируются позже и являются II генерацией. При этом размер отдельных округлых зерен сульфида не превышает 10 мкм. Химический состав (в мас.%, среднее из 32-х анализов): Mn – 61,59; S – 36,59; Ca – 0,90; Cu – 0,55. Химический состав хорошо пересчитывается на кристаллохимическую формулу алабандина: $(\text{Mn}_{0.97}\text{Ca}_{0.02}\text{Cu}_{0.01})_{1.00}\text{S}_{1.00}$, с небольшим присутствием минала ольдагмита (2%) и ковеллина (1%).

В природных условиях алабандин является типоморфным минералом метаморфизованных марганценовых осадков [24], иногда отмечается в хондритах (каменных метеоритах) [25] и гидротермальных месторождениях. В техногенных условиях сульфид марганца – характерный минерал для шлаков марганцевой металлургии [26].

Стекло в зеленых шлаках Староуткинского завода количественно сильно варьирует от 15 до 30 об.%. Оно располагается в интерстициях между кристаллами породообразующих минералов и постоянно содержит включения глаукохроита, ларнита, ранкинита и алабандина (см. **рис. 2, 3**). По данным анализов стекло отличается слабо варьирующим химическим составом (мас.%): SO_3 – 0,92-1,09; P_2O_5 – 0-0,24; SiO_2 – 39,52-40,10; TiO_2 – 1,42-1,53; Al_2O_3 – 14,22-17,48; MnO – 16,20-19,22; MgO – 0,73-0,82; BaO – 1,77-2,13; CaO – 16,89-19,21; Na_2O – 0,99-1,39; K_2O – 1,67-2,46. Как видно из химического состава, стекловатая масса в сравнении с породообразующими минералами обогащена щелочами, барием, кремнеземом и глиноземом. По соотношению кремнезема и щелочей стекло на диаграмме TAS (total alkali-silica) попадает в поле щелочных пикритов (ультраосновных вулканитов).

Фосфид марганца (Mn_2P) образует в шлаке мелкие шарики или округлые выделения размером до 20 мкм (**рис. 4**). Обычно отмечается в кристаллах акерманита и центральных частях индивидов глаукохроита. В режиме обратно-рассеянных электронов фосфид выглядит однородным, без зональности и каких-либо включений. Минерал имеет устойчивый химический состав (**табл. 4**) и по данным кристаллохимического пересчета определяется как железосодержащий фосфид димарганца – Mn_2P . Данное со-

единение в природе пока неизвестно, хотя в метеоритах уже установлен Fe_2P – гексагональный баррингерит [27] и ромбический аллабогданит [28]. Учитывая полный изоморфизм между железом и марганцем, можно надеется, что в ближайшее время природный аналог Mn_2P будет найден.

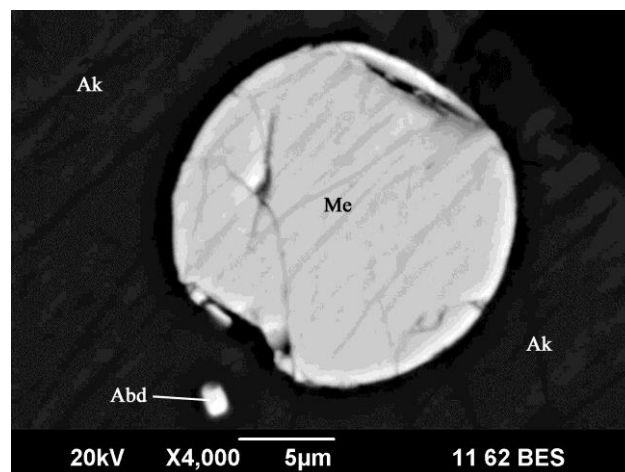


Рис. 4. Фосфид марганца (Me) и алабандин (Abd) в кристалле акерманита (Ak).

BSE-изображение, СЭМ JSM-6390LV

Fig. 4. Manganese phosphide (Me) and alabandite (Abd) in the crystal of akermanite (Ak).

BSE image, JSM-6390LV SEM

Таблица 4. Химический состав фосфида марганца из шлака Староуткинского завода, мас. %

Table 4. Chemical composition of manganese phosphide from slags from the Staroutskinsky Plant, wt. %

№ п/п	Si	Cr	V	Fe	Mn	Ca	P	Сумма
1	0,21	0,39	0,24	6,39	70,79	0,67	21,34	100
2	0,21	0,40	0,28	6,35	70,86	0,56	21,31	100
3	0,20	0,36	0,28	6,36	70,76	0,78	21,26	100
4	0,25	0,42	0,24	6,24	71,06	0,62	21,17	100
5	0,23	0,42	0,27	6,37	70,99	0,57	21,15	100
Кристаллохимическая формула в расчете на 3 формульные единицы								
1-5 ср.зн.	$(\text{Mn}_{1.82}\text{Fe}_{0.16}\text{Ca}_{0.02}\text{Cr}_{0.01})_{2.01}(\text{P}_{0.98}\text{Si}_{0.01})_{0.99}$							

Обнаруженный нами железосодержащий фосфид димарганца (Mn_2P) позволяет говорить о том, что зеленые шлаки Староуткинского завода являются отходами производства ферромарганевофосфора. Температуру кристаллизации этих шлаков можно оценить по породообразующему минералу – акерманиту. По данным системы геленит-акерманит [29] образование шлака характеризует-

ся температурой в пределах 1420–1410°C. При этом если рассматривать систему $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ [30], то видно, что установленный нами ранкинит кристаллизуется в пределах 1350–1450°C, что хорошо согласуется с данными по акерманиту.

В целом изученный шлак можно пускать в дополнительную переработку, так как по минеральному и химическому составу это хорошая руда для дополнительного получения марганца. При детальной сепарации весь шлак можно полностью переработать. Так, при выделении глаукохроита, алабандина и фосфида димарганца, которые пойдут в качестве руды для получения марганца, остальные минералы (акерманит, ларнит и ранкинит) и стекло могут быть использованы как вяжущие вещества в цементном производстве. К сожалению, все шлаки данного завода были переработаны для изготовления минеральной ваты.

Заключение

Таким образом, впервые изучена минералогия марганцовистых зеленых шлаков Староуткинского металлургического завода. Установлено, что они сложены глаукохроит-ларнитовым агрегатом со значительным содержанием акерманита, стекла и постоянным присутствием ранкинита, алабандина и фосфида димарганца (Mn_2P). Данные шлаки являются отходами ферроманганефосфорного производства, а температура их образования оценивается в узких пределах – 1420–1410°C.

Список литературы

1. Запарий В.В. Уткинский (Староуткинский) чугуноплавильный и железоделательный завод // Бажовская энциклопедия. Екатеринбург: Сократ, 2007. С. 439–443.
2. Металлургические заводы Урала XVII–XX вв. Энциклопедия / под ред. В.В. Алексеева. Екатеринбург: Академкнига, 2001. 536 с.
3. Kimata M. Synthetic Mn-Kilchoanite – a new development in polymorphism of melilite // *Mineralogical Magazine*. 1986. V. 50. Is. 3. P. 511–515.
4. Kusaka K., Ohmasa M., Hagiya K., Iishi K., Haga N. On variety of the Ca coordination in the incommensurate structure of synthetic iron-bearing åkermanite, $\text{Ca}_2(\text{Mg}_{0.55}\text{Fe}_{0.45})\text{Si}_2\text{O}_7$ // *Mineralogical Journal*. 1998. V. 20. № 2. P. 47–58.
5. Магнезиальные скарны мервинитовой фации из ксенолитов в дунитах Довыренского расслоенного массива / Перцев Н.Н., Конников Э.Г., Кислов Е.В., Орсов Д.А., Некрасов А.Н. // *Петрология*. 2003. Т. 11. № 5. С. 512–523.
6. Иванова М.А. Са-, Al-включения в углистых хондритах – самые древние образования Солнечной системы // *Геохимия*. 2016. № 5. С. 409–426. doi:10.7868/S0016752516050034
7. Уникальные клинкеры и паралавы нового Нилгинского пирометаморфического комплекса в Центральной Монголии: минералого-геохимические особенности, условия формирования / Перетяжко И.С., Савина Е.А., Хромова Е.А., Карманов Н.С., Иванов А.В. // *Петрология*. 2018. Т. 26. № 2. С. 178–210. doi:10.7868/S086959031802005X
8. Ерохин Ю.В., Захаров А.В., Леонова Л.В. Изучение вещественного состава шлаков производства ванадиевого чугуна Алапаевского металлургического завода // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2020. Т. 18. № 2. С. 13–21. doi: 10.18503/1995-2732-2020-18-2-13-21
9. Минералогия доменных шлаков / Горбатова Е.А., Харченко С.А., Ожогина Е.Г., Якушина О.А. // *Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН*. 2017. № 4. С. 24–28. doi:10.19110/2221-1381-2017-4-24-28
10. Kato A. Glaucochroite-tephroite intergrowth from the Kanoiri mine, Kanuma City, Tochigi Prefecture, Japan // *Bulletin National Science Museum*. 1991. V. 17. Is. 4. P. 119–128.
11. Перцев Н.Н., Лапутина И.П. Глаукохроит в скарнах на Анаките, Нижняя Тунгуска // *Доклады АН СССР*. 1974. Т. 216. № 6. С. 1379–1382.
12. Leavens P.B., Dunn P.J., Burt D.M. Glaucochroite (olivine, CaMnSiO_4) from Franklin, New Jersey: its composition, occurrence, and formation // *American Mineralogist*. 1987. V. 72. P. 423–428.
13. Höbner H.-J., Zahn A. Crystallographic investigations of glaucochroite in an Fe-Mn slag // *Crystal Research and Technology*. 1988. V. 23. Is. 1. P. 107–109.
14. Baumgartner S.J., Groot D.R. The recovery of manganese products from ferromanganese slag // *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2014. V. 114. P. 331–340.
15. Mason B. Larnite, scawtite, and hydrogrossular from Tokatoka, New Zealand // *American Mineralogist*. 1957. V. 42. P. 379–392.
16. Sokol E.V., Kokh S.N., Vapnik Y., Thiery V., Korzhova S.A. Natural analogs of belite sulfoaluminate cement clinkers from Negev Desert, Israel // *American Mineralogist*. 2014. V. 99. № 7. P. 1471–1487.
17. Волженский А.В., Буров Ю.С., Колокольников В.С. Минеральные вяжущие вещества. М.: Стройиздат, 1979. 476 с.
18. Ерохин Ю.В., Захаров А.В., Леонова Л.В. Шлаки производства хромистого чугуна Алапаевского завода (состав и геоэкология) // *Известия вузов. Горный журнал*. 2020. № 5. С. 90–99.
19. Martinez-Frias J., Benito R., Wilson G., Delgado A., Boyd T., Marti K. Analysis and chemical composition of larnite-rich ultrarefractory materials // *Journal of Materials Processing Technology*. 2004. V. 147. P. 204–210.
20. Первая находка ранкинита в СССР / Королук В.Н., Лаврентьев Ю.Г., Пальчик Н.А., Ревердатто В.В. // *Записки ВМО*. 1974. Ч. 103. Вып. 1. С. 136–139.

21. Пирометаморфические породы спуррит-мервинитовой фации как индикаторы зон разгрузки залежей углеводородов (на примере формации Хатрурим, Израиль) / Сокол Э.В., Новиков И.С., Затева С.Н., Шарыгин В.В., Вапник Е. // Доклады АН. 2008. Т. 420. № 1. С. 104–110.
22. Kurdowski W., Szuba J. Hydration of wollastonite and rankinite in hydrothermal conditions // *Cemento*. 1987. V. 84. № 2. P. 107–116.
23. Kasina M., Kowalski P.R., Michalik M. Mineral carbonation of metallurgical slags // *Mineralogia*. 2015. V. 45. № 1–2. P. 27–45. doi:10.1515/mipo-2015-0002
24. Olivo G.R., Gibbs K. Paragenesis and mineral chemistry of alabandite (MnS) from the Ag-rich Santo Toribio epithermal deposit, Northern Peru // *Mineralogical Magazine*. 2003. V. 67. P. 95–102.
25. Skinner B.J., Luce F.D. Solid solution of the type (Ca,Mg,Mn,Fe)S and their use as geothermometers for the enstatite chondrites // *American Mineralogist*. 1971. V. 56. P. 1269–1296.
26. Piatak N.M., Seal II R.R. Mineralogy and environmental geochemistry of historical iron slag, Hopewell Furnace National Historic Site, Pennsylvania, USA // *Applied Geochemistry*. 2012. V. 27. P. 623–643.
27. Buseck P.R. Phosphide from meteorites: barringerite, a new iron-nickel mineral // *Science*. 1969. V. 165. P. 169–171.
28. Britvin S.N., Rudashevskii N.S., Krivovichev S.V., Burns P.C., Polekhovsky Y.S. Allabogdanite, (Fe,Ni)₂P, a new mineral from the Onello meteorite: the occurrence and crystal structure // *American Mineralogist*. 2002. V. 87. P. 1245–1249.
29. Mendybaev R.A., Richter F.M., Davis A.M. Reevaluation of the akermanite-gehlenite binary system // XXXVII Lunar and Planetary Science Conf. Abstr. № 2268. Woodlands (TX), 2006.
30. Mao H., Hillert M., Selleby M., Sundman B. Thermodynamic assessment of the CaO-Al₂O₃-SiO₂ system // *Journal of the American Ceramic Society*. 2006. V. 89. № 1. P. 298–308.
4. Kusaka K., Ohmasa M., Hagiya K., Iishi K., Haga N. On variety of the Ca coordination in the incommensurate structure of synthetic iron-bearing åkermanite, Ca₂(Mg_{0.55}Fe_{0.45})Si₂O₇. *Miner. Journ.* 20, 2, 47–58 (1998).
5. Pertsev N.N., Konnikov E.G., Kislov E.V., Orsoev D.A., Nekrasov A.N. Merwinite-facies magnesian skarns in xenoliths from dunite of the Dovyren layered intrusion. *Petrologiya* [Petrology], 2003, vol. 11, no. 5, pp. 512–523 (In Russ.)
6. Ivanova M.A. Ca-Al-rich inclusions in carbonaceous chondrites: the oldest Solar System objects. *Geochemistry*, vol. 54, no. 5, pp. 387–402 (2016). doi:10.1134/S0016702916050037
7. Peretyazhko I.S., Savina E.A., Khromova E.A., Karmanov N.S., Ivanov A.V. Unique clinkers and paralavas from a new Nilga combustion metamorphic complex in Central Mongolia: mineralogy, geochemistry and genesis. *Petrology*, vol. 26, no. 2, pp. 181–211 (2018). doi:10.1134/S0869591118020054
8. Erokhin Yu.V., Zakharov A.V., Leonova L.V. Material composition of vanadium slags at the Alapayevsk Metallurgical Plant. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2020, vol. 18, no. 2, pp. 13–21. doi:10.18503/1995-2732-2020-18-2-13-21
9. Gorbatoeva E.A., Kharchenko S.A., Ozhogina E.G., Yakushina O.A. Mineralogy of blast furnace slags. *Vestnik IG Komi NTS UrO RAN* [Vestnik of the Komi Institute of Geology, the Scientific Center of the Ural Branch of RAS]. 2017, no. 4, pp. 24–28. doi:10.19110/2221-1381-2017-4-24-28
10. Kato A. Glaucocroite-tephroite intergrowth from the Kanoiri mine, Kanuma City, Tochigi Prefecture, Japan. *Bull. Nat. Sci. Mus.* 17, 4, 119–128 (1991).
11. Pertsev N.N., Laputina I.P. Glaucocroite in skarns at Anakita, Lower Tunguska. *Doklady Akademii nauk SSSR* [Reports of the USSR Academy of Sciences], 1974, vol. 216, no. 6, pp. 1379–1382. (In Russ.)
12. Leavens P.B., Dunn P.J., Burt D.M. Glaucocroite (olivine, CaMnSiO₄) from Franklin, New Jersey: its composition, occurrence, and formation. *Amer. Miner.* 72, 423–428 (1987).
13. Höbner H.-J., Zahn A. Crystallographic investigations of glaucocroite in an Fe-Mn slag. *Cryst. Res. Tech.* 23, 1, 107–109 (1988).
14. Baumgartner S.J., Groot D.R. The recovery of manganese products from ferromanganese slag. *Jour. South. Afric. Inst. Min. Metall.* 114, 331–340 (2014).
15. Mason B. Larnite, scawtite, and hydrogrossular from Tokatoka, New Zealand. *Amer. Miner.* 42, 379–392 (1957).
16. Sokol E.V., Kokh S.N., Vapnik Y., Thiery V., Korzhova S.A. Natural analogs of belite sulfoaluminate cement clinkers from Negev Desert, Israel. *Amer. Miner.* 99, 7, 1471–1487 (2014).

References

1. Zapariy V.V. *Utkinskiy (Staroutkinskiy) chugunoplavilnyi i zhelezodelatelnyi zavod* [The Utkinsky (Staroutkinsky) iron-smelting and iron-making plant]. *Bazhovskaya entsiklopediya* [Bazhov's encyclopedia]. Yekaterinburg: Socrates, 2007, pp. 439–443. (In Russ.)
2. Alekseev V.V. (ed.) *Metallurgicheskie zavody Urala XVII–XX vv. Entsiklopediya*. [Metallurgical plants of the Urals in the 17th–20th centuries. Encyclopedia]. Yekaterinburg: Academic Book Publishing House, 2001, 536 p. (In Russ.)
3. Kimata M. Synthetic Mn-Kilchoanite – a new development in polymorphism of melilite. *Miner. Magaz.* 50, 3, 511–515 (1986).

17. Volzhensky A.V., Burov Yu.S., Kolokolnikov V.S. *Mineralnye vyazhushchie veshchestva* [Mineral binders]. Moscow: Stroyizdat, 1979, 476 p. (In Russ.)
18. Erokhin Yu.V., Zakharov A.V., Leonova L.V. Slags from the production of chromium cast iron of the Alapaevsk plant (composition and geoecology). *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal* [News of the Higher Institutions. Mining Journal], 2020, no. 5, pp. 90–99. (In Russ.)
19. Martinez-Frias J., Benito R., Wilson G., Delgado A., Boyd T., Marti K. Analysis and chemical composition of larnite-rich ultrarefractory materials. *Jour. Mater. Proces. Techn.* 147, 204–210 (2004).
20. Korolyuk V.N., Lavrentiev Yu.G., Palchik N.A., Reverdatto V.V. The first find of rankinite in the USSR. *Zapiski Vsesoyuznogo mineralogicheskogo obshchestva* [Transactions of the All-Union Mineralogical Society], 1974, vol. 103, no. 1, pp. 136–139. (In Russ.)
21. Sokol E.V., Novikov I.S., Zateeva S.N., Sharygin V.V., Vapnik E. Pyrometamorphic rocks of the spurrite-merwinite facies as indicators of hydrocarbon discharge zones (the Hatrurim Formation, Israel). *Doklady Earth Sci.* 240, 1, 608–614 (2008).
22. Kurdowski W., Szuba J. Hydration of wollastonite and rankinite in hydrothermal conditions. *Cemento.* 84, 2, 107–116 (1987).
23. Kasina M., Kowalski P.R., Michalik M. Mineral carbonation of metallurgical slags. *Mineralogia.* 45, 1–2, 27–45 (2015). doi:10.1515/mipo-2015-0002
24. Olivo G.R., Gibbs K. Paragenesis and mineral chemistry of alabandite (MnS) from the Ag-rich Santo Toribio epithermal deposit, Northern Peru. *Miner. Magaz.* 67, 95–102 (2003).
25. Skinner B.J., Luce F.D. Solid solution of the type (Ca,Mg,Mn,Fe)S and their use as geothermometers for the enstatite chondrites. *Amer. Miner.* 56, 1269–1296 (1971).
26. Piatak N.M., Seal II R.R. Mineralogy and environmental geochemistry of historical iron slag, Hopewell Furnace National Historic Site, Pennsylvania, USA. *Appl. Geochem.* 27, 623–643 (2012).
27. Buseck P.R. Phosphide from meteorites: barringerite, a new iron-nickel mineral. *Science.* 165, 169–171 (1969).
28. Britvin S.N., Rudashevskii N.S., Krivovichev S.V., Burns P.C., Polekhovsky Y.S. Allabogdanite, (Fe,Ni)₂P, a new mineral from the Onello meteorite: the occurrence and crystal structure. *Amer. Miner.* 87, 1245–1249 (2002).
29. Mendybaev R.A., Richter F.M., Davis A.M. Reevaluation of the akermanite-gehlenite binary system. The 37th Lunar and Planetary Science Conf. Abstr., No. 2268. Woodlands (TX), 2006.
30. Mao H., Hillert M., Selleby M., Sundman B. Thermodynamic assessment of the CaO-Al₂O₃-SiO₂ system. *Jour. Amer. Ceram. Soc.* 89, 1, 298–308 (2006).

Поступила 23.09.2021; принята к публикации 12.10.2021; опубликована 24.12.2021

Submitted 23/09/2021; revised 12/10/2021; published 24/12/2021

Ерохин Юрий Викторович – кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт геологии и геохимии УрО РАН, Екатеринбург, Россия.
Email: erokhin-yu@yandex.ru. ORCID 0000-0002-0577-5898

Пономарев Владимир Сергеевич – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт геологии и геохимии УрО РАН, Екатеринбург, Россия.
Email: p123v@yandex.ru. ORCID 0000-0002-1651-1281

Захаров Анатолий Владимирович – научный сотрудник, Институт геологии и геохимии УрО РАН, Екатеринбург, Россия.
Email: zakharov-zav@yandex.ru. ORCID 0000-0001-8790-7892

Леонова Любовь Владимировна – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт геологии и геохимии УрО РАН, Екатеринбург, Россия.
Email: lvleonova@yandex.ru. ORCID 0000-0002-7713-8994

Yury V. Erokhin – PhD (Geology and Mineralogy), Lead Researcher, Institute of Geology and Geochemistry, the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia. Email: erokhin-yu@yandex.ru. ORCID 0000-0002-0577-5898

Vladimir S. Ponomarev – PhD (Geology and Mineralogy), Senior Researcher, Institute of Geology and Geochemistry, the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia. Email: p123v@yandex.ru. ORCID 0000-0002-1651-1281

Anatoly V. Zakharov – Researcher, Institute of Geology and Geochemistry, the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia. Email: zakharov-zav@yandex.ru. ORCID 0000-0001-8790-7892

Lyubov V. Leonova – PhD (Geology and Mineralogy), Senior Researcher, Institute of Geology and Geochemistry, the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia. Email: lvleonova@yandex.ru. ORCID 0000-0002-7713-8994

ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

MATERIAL PROCESS ENGINEERING

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

УДК 621.762.4:621.891.620

DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-4-45-55



ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА НА ЖАРОСТОЙКОСТЬ И УДАРНУЮ ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ РАСПЫЛЕННЫХ ПОРОШКОВ ВЫСОКОХРОМИСТОЙ СТАЛИ

Гасанов Б.Г.¹, Бабец А.В.², Баев С.С.¹

¹Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, Новочеркасск, Россия

²ООО «Композит Нчк», Новочеркасск, Россия

Аннотация. Актуальность исследований. Обоснована актуальность разработки технологии получения седел клапанов двигателей внутреннего сгорания из материалов с прогнозируемой жаростойкостью и ударной износостойкостью на основе распыленных порошков высокохромистых сталей. **Используемые методы.** Для испытания использовали усовершенствованную установку, позволяющую оценить ударную износостойкость исследуемых материалов при заданной энергии удара и температуре нагрева в условиях газовой коррозии. **Результаты и научная значимость.** Выявлено, что на интенсивность окисления поверхности порошковых изделий из указанных материалов кроме внешних факторов влияют и внутренние. Одним из таких факторов является химический потенциал атомов компонентов сплава и молекул нагретого газа, зависящий от микрорельефа частиц порошков, объема и конфигурации пор и способов приготовления шихты. Анализ результатов испытаний на жаростойкость образцов после их нагрева в интервале 600–1000°C показал, что наименьшей жаростойкостью обладают спеченные высокохромистые стали плотностью менее 6,0–6,5 г/см³ из смеси порошков и лигатур. При повышении плотности сплавов из распыленных порошков высокохромистых сталей до 7,1–7,2 г/см³ значительно улучшаются жаростойкость и ударная износостойкость. **Практическая значимость.** Установлено, что в случае добавления в шихту порошка никеля в пределах 10–20% и последующей механической активации шихты на основе распыленного порошка РХ-НСХ23 при незначительном повышении плотности прессовок существенно возрастает жаростойкость и ударная износостойкость спеченных и горячедеформированных сплавов. Выявлено, что у спеченных биметаллических образцов с рабочим слоем на основе распыленных высокохромистых порошков быстрорежущих сталей РХ-НСХ23 ударная износостойкость рабочего слоя выше, чем у аналогичных однородных образцов.

Ключевые слова: высокохромистые стали, распыленный порошок, спекание, жаростойкость, ударная износостойкость, химический потенциал, горячая штамповка.

© Гасанов Б.Г., Бабец А.В., Баев С.С., 2021

Для цитирования

Гасанов Б.Г., Бабец А.В., Баев С.С. Влияние химического состава на жаростойкость и ударную износостойкость материалов на основе распыленных порошков высокохромистой стали // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №4. С. 45–55. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-4-45-55>



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

INFLUENCE OF A CHEMICAL COMPOSITION ON HEAT RESISTANCE AND IMPACT WEAR RESISTANCE OF MATERIALS BASED ON ATOMIZED POWDERS OF HIGH-CHROMIUM STEEL

Gasarov B.G.¹, Babets A.V.², Baev S.S.¹

¹Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia

²LLC Kompozit Nchh, Novocherkassk, Russia

Abstract. The relevance of the research topic. The paper provides a rationale for relevance of the development of technology for manufacturing valve seats of internal combustion engines from materials with predicted heat resistance and impact wear resistance based on atomized powders of high-chromium steels. **Research methods.** To test the materials under study, an advanced installation was used to evaluate the impact wear resistance at a given impact energy and heating temperature in gas corrosion. **Results and scientific significance.** It has been shown that in addition to external factors the oxidation intensity of the surface of the powder products is influenced by the chemical potential of the atoms of the alloy components and heated gas molecules, depending on the microrelief of the powder particles, the volume and configuration of the pores and the methods of preparation of the batch. The analysis of the tests on the heat resistance of the samples, when heated within the range of 600–1000°C, showed that sintered high-chromium steels with a density of less than 6.0–6.5 g/cm³ from a mixture of powders and alloys have the least heat resistance. With an increase in the density of alloys from atomized powders of high-chromium steels to 7.1–7.2 g/cm³, heat resistance and impact wear resistance are significantly improved. **Practical significance of the research.** It has been found that when adding nickel powder within 10–20% and performing subsequent mechanical activation of the batch based on the atomized powder RKh-NSKh23 the density of the pressings slightly increases and the heat resistance and impact wear resistance of sintered and hot-deformed alloys significantly increases. It has been revealed that the sintered bimetallic samples with a working layer based on atomized high-chromium powders of high-speed steels RKh-NSKh23 have a higher impact wear resistance of the working layer than similar homogeneous samples.

Keywords: high-chromium steels, atomized powder, sintering, heat resistance, impact wear resistance, chemical potential, hot forging.

For citation

Gasarov B.G., Babets A.V., Baev S.S. Influence of a Chemical Composition on Heat Resistance and Impact Wear Resistance of Materials Based on Atomized Powders of High-Chromium Steel. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021, vol. 19, no. 4, pp. 45–55. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-4-45-55>

Введение

Анализ многих публикаций показывает, что жаростойкость и износостойкость материалов, полученных методами порошковой металлургии, зависят от химического и гранулометрического состава порошков, технологии приготовления шихты, способов формования прессовок, температуры, времени и условий спекания изделий; методов и режима термического или термомеханического воздействия [1–4]. В частности, на эксплуатационную надежность сталей и сплавов, применяемых для изготовления седел клапанов двигателей внутреннего сгорания, влияет не только содержание хрома, никеля, кремния и других добавок, но состав и температура отработанных газов, способность материала противостоять динамическим нагрузкам при высоких температурах [5–8]. Исследования многих спе-

циалистов показывают, что для повышения износостойкости и окислостойкости порошковые стали целесообразно легировать хромом и другими элементами, влияющими на кристаллическую структуру и физико-химические свойства окислы, а для улучшения вязкости эффективно использовать добавки никеля и меди [9–12].

Целью данной работы является исследование влияния химического состава шихты, способов введения легирующих добавок и технологии получения образцов на структурообразование и ударную износостойкость высокохромистых порошковых сталей, полученных различными методами, оценка их жаростойкости (окислостойкости) и составление рекомендаций по использованию данных материалов для изготовления седел клапанов, работающих в условиях высокотемпературной газовой коррозии.

Материалы и методика исследований

Для испытаний на жаростойкость и ударную износостойкость изготавливали цилиндрические образцы (\varnothing 21,6 мм, h = 5 мм) статическим холодным прессованием при давлении прессования 600–800 МПа из распыленных порошков высокохромистой быстрорежущей стали РХ-НСХ23 фирмы Högans (Швеция). Для улучшения технологических и эксплуатационных свойств получаемых материалов в шихту добавляли порошок никеля ПНК-1Л5. Для биметаллических образцов базовый слой получали из порошка железа ПЖРВ 2.200.28 с добавками порошка меди ПМС-1. Часть образцов была получена из шихт с применением порошка стали ШХ 15, сепарированного из шлифовального шлама подшипников, феррохрома и карбида хрома. В качестве пластификатора применяли стеарат цинка ZN 55 производства фирмы Тере Кимуа (Турция). Химический состав использованных порошков приведен в **таблице**.

Механическую активацию шихты проводили в планетарной шаровой мельнице САНД-1 при скорости вращения 180 об/мин в течение 120 мин и соотношении массы шаров к массе шихты 4:1. Образцы спекали в диссоциированном аммиаке (ДА) (75% H_2 и 25% N_2) при 1120°C 1,5 ч, в вакуумной печи (~ 0,133 Па) при 1150°C – 4,5 ч. Для получения высокоплотных образцов проводили горячую штамповку пористых заготовок.

Часть формовок с исходной пористостью 20–30% спекали в камерной печи при температуре 1150°C в среде диссоциированного аммиака в течение 1,5–4,5 ч, а часть – в вакуумной печи при температуре 1150°C с выдержкой 1,5–4,5 ч. Плотность спеченных образцов колебалась в пределах 6,5–7,2 г/см³. Формовки пористостью

22–24% нагревали в диссоциированном аммиаке при температуре 1120°C 5 мин и подвергали горячей штамповке. Приведенная работа уплотнения составляла $W_{\text{привед}} = 250$ МДж/м³. Остаточная пористость высокоплотных образцов не превышала 2–4%.

Для сравнительных испытаний дополнительно были изготовлены цилиндрические образцы из порошков шарикоподшипниковой стали ШХ15, полученной магнитоволновой технологией сепарации шламов [13], и шихты на основе порошков железа и феррохрома [14].

Микроструктурные исследования проводили на металлографическом микроскопе «Altami MET-1M» и растровом электронном микроскопе Quanta 200. Рентгенофазовый анализ проводили на рентгеновском порошковом дифрактометре ARL X'TRA Thermo Fisher Scientific с вертикальным гониометром радиусом 260 мм в шаговом режиме с временем интеграции 1 с в диапазоне $2\theta = 50\text{--}900^\circ$. Качественный фазовый анализ осуществляли путём сравнения полученных дифрактограмм с эталонами из базы данных ICDD PDF-2 2012. Характеристики пиков рассчитывали при помощи программного комплекса WinXRD 2.0.8 (модельная функция – Pearson 7, количество итераций – 30).

Испытания исследуемых образцов на жаростойкость проводили согласно методике [15]. Износостойкость материала определяли на специально разработанной лабораторной установке [16]. Энергию удара регулировали количеством пружин различных типоразмеров, такие регулировки дают возможность в процессе испытаний варьировать ударными нагрузками на испытуемый образец, приближаясь к реальным рабочим эксплуатационным условиям, характерным для систем седло-клапан двигателей внутреннего сгорания.

Таблица. Химический состав использованных порошков
Table. Chemical composition of the used powders

Материал	Химический состав, %												
	C	Cr	Mo	Si	V	W	O	Fe	Mn	P	S	Cu	Ni
РХ-НСХ23	1,5	23	2,8	0,5	1,8	2,8	0,15	Ост.	-	-	-	-	-
ПЖРВ 2.200.28	0,02	-	-	0,05	-	-	0,25	Ост.	0,15	0,02	0,015	-	-
ПМС-1	-	-	-	-	-	-	0,2	0,018	-	0,05	-	Ост.	-
ПНК- 1Л5	0,28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	99,7
Шихта ШХ15	1	1,5	-	0,17	-	-	-	Ост.	0,2	0,027	0,02	0,25	0,3
35% ФХ850 + 65% ПЖРВ 2.200.28	2,8	23	-	0,3	-	-	-	Ост.	-	-	-	-	-

Известно, что температура отработанных газов бензиновых двигателей при средних нагрузках колеблется в пределах 600–800°C, а на сжиженном нефтяном газе 680–900°C. Поэтому жаростойкость оценивали по увеличению массы образца после нагрева и выдержки образцов 1 ч в интервале от 600 до 1000°C, а ударную износостойкость определяли по изменению высоты Δh_t в трех точках после испытания цилиндрических образцов.

Результаты исследований и их обсуждение

Как и следовало ожидать, с увеличением температуры спекания образцов из порошка РХ-НСХ23 в диссоциированном аммиаке после нагрева в газовой среде их поверхность интенсивно окисляется (рис. 1, а, кривая 1). Толщина оксидного слоя образцов такого же состава, спеченных в вакууме, примерно в два раза меньше, чем у спеченных в диссоциированном аммиаке (рис. 1, б, кривая 2). Такое различие интенсивности окисления исследуемых формовок связано с макро- и микроструктурой материала после спекания.

Как известно, у компактных хромистых и хромоникелевых сталей микроструктура практически не влияет на жаростойкость. Исследования показывают, что на газовую коррозию спеченных материалов существенно влияет не только химический состав частиц порошка, но и условия спекания.

После спекания прессовок в вакууме границы частиц порошка РХ-НСХ23 практически не различаются (рис. 2, б), так как при высокой температуре более интенсивно протекает диффузионный массоперенос на межчастичных контактах, а на начальной стадии спекания в результате дегазации пор, диссоциации оксидов металла на поверхности частиц снижается общее содержание оксидов. После спекания образцов в диссоциированном аммиаке хорошо видны окисленные границы частиц (рис. 2, а), это стимулирует диффузию ионов кислорода и других газов из пор в объем тела порошкового материала, соответственно, возрастает количество оксидов железа и хрома, которые можно идентифицировать на дифрактограммах (рис. 3, а). Очевидно, что такие же оксиды присутствуют в материале после спекания в вакууме (рис. 3, б), но их рефлексы более слабые и их сложно однозначно выделить.

На газовую коррозию хромистых порошковых сталей в большей степени влияет способ введения и концентрация хрома в шихту. В частности, спеченные прессовки, полученные из смеси порошков железа и феррохрома, содержащие такое же количество хрома, как в порошке РХ-НСХ23, около 23% Cr, независимо от условий спекания активно окисляются с повышением температуры нагрева. Более интенсивно окислились образцы, полученные из шихты с добавками порошка стали ШХ 15 (см. рис. 1, а и б, кривые 3).

Поскольку основные реакции окисления металлов при нагреве стимулируются активацией объемной диффузии атомов из металлической матрицы на поверхность частиц и поверхностной диффузией молекул газов, адсорбируемых на поверхности частиц порошка, то возникает необходимость оценки природы диффузионного массопереноса нагретых газов по поверхности частиц формовок в межчастичные контакты и в частицы порошков. Известно, что сложный микрорельеф частиц порошков обуславливает наличие вогнутых и выпуклых поверхностей металлического каркаса формовки, что приводит к изменению химического потенциала атомов μ_i в зависимости от размеров, формы пор и частиц порошков. Поэтому плотность диффузионного потока атомов компонентов сплавов и ионов нагретых газов за единицу времени сквозь рассматриваемое сечение прессовки площадью S пропорциональна градиенту их химического потенциала:

$$J_i = -\frac{1}{V_i^a} \sum_{j=1}^s L_{ij} \nabla \mu_i, \quad (1)$$

где L_{ij} – кинетические коэффициенты; $\nabla \mu_i$ – градиент химического потенциала ионов газа; S – число окислителей; V_i^a – объем i -го атома или иона.

Поскольку химический потенциал атомов металла и ионов газа в изотермических условиях меняется в результате изменения состава материала и поверхностного давления, то

$$\nabla \mu_i = \sum_{j=1}^s \frac{\partial \mu_i}{\partial c_j} \nabla c_j + \frac{\partial \mu_i}{\partial P} \nabla P, \quad (2)$$

где $\nabla c_j, \nabla P$ – градиенты концентрации и давления на поверхности порошковых образцов.

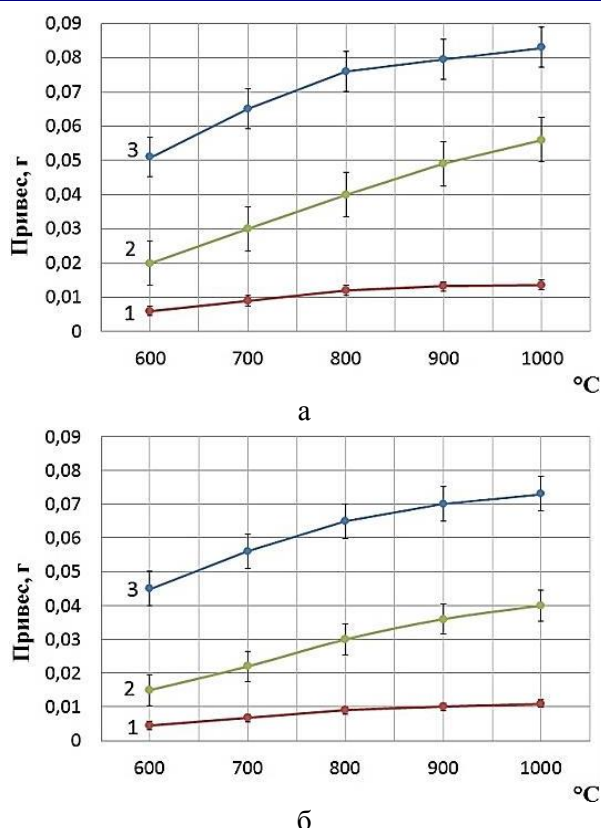


Рис. 1. Влияние температуры нагрева на жаростойкость спеченных в диссоциированном аммиаке (а) и вакууме (б) образцов из смеси порошков: 1 – РХ-НСХ23; 2 – шихта 35%ФХ850 + 65%ПЖРВ; 3 – из шлама ШХ15

Fig. 1. The influence of the heating temperature on the heat resistance of the samples sintered in dissociated ammonia (a) and vacuum (б) from a mixture of powders: 1 is RKh-NSKh23; 2 is 35%FeCr850 + 65% atomized reduced iron powder Fe; 3 is from sludge ShKh15

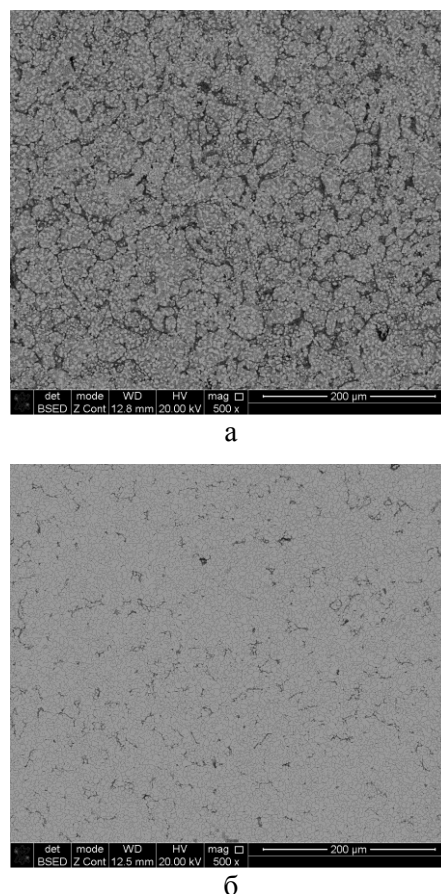


Рис. 2. Микроструктура образцов из порошка РХ-НСХ23 после спекания: а – в диссоциированном аммиаке; б – в вакуумной печи

Fig. 2. Microstructure of RKh-NSKh23 powder samples after sintering: a is in dissociated ammonia; б is in a vacuum furnace

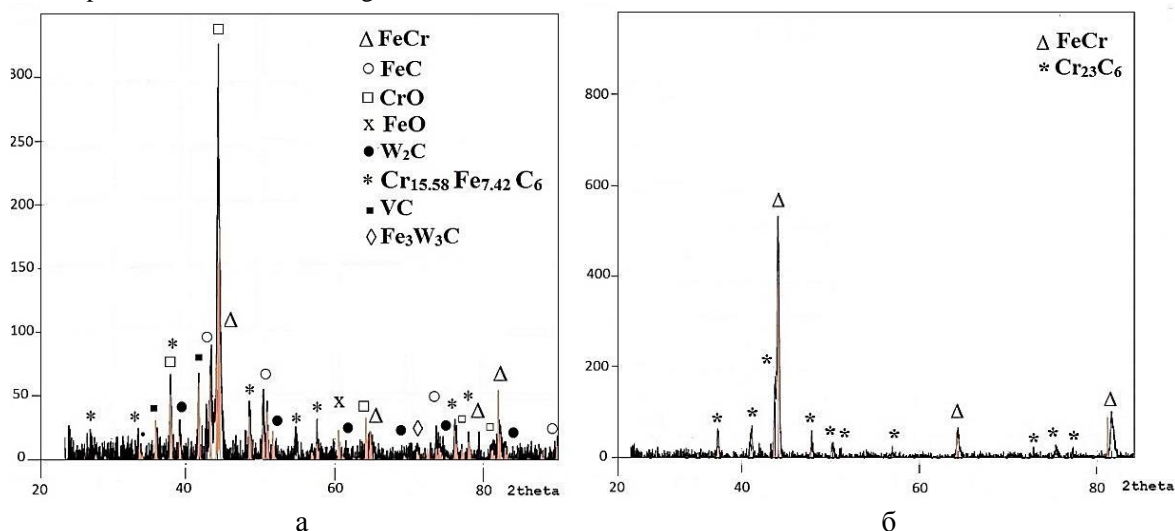


Рис. 3. Фрагменты дифрактограмм образцов из порошка РХ-НСХ23, спеченных перед испытанием в диссоциированном аммиаке (а) и в вакууме (б)

Fig. 3. Fragments of diffractograms of the samples from RKh-NSKh23 powder sintered before testing in dissociated ammonia (a) and in vacuum (б)

Градиент химического потенциала атомов компонентов сплава (например, хрома) в поверхностном слое частиц определяется градиентом кривизны профиля контактного перешейка и самих частиц. Тогда направленный поток атомов хрома (компонент A) по поверхности частиц из выпуклых его участков в вогнутые участки и в том числе в контактный перешеек можно определить по следующей формуле [17]:

$$J_A^s = -\frac{D_A^s c_A \nabla \mu_s}{kT}, \quad (3)$$

где c_A – поверхностная концентрация компонента A в частице.

Градиент вакансий по объему частиц обусловлен значениями радиуса кривизны в наиболее вогнутой и выпуклой части профиля, диффузионный поток атомов компонентов сплавов по поверхности частиц порошков на каждом участке связан с изменением радиуса кривизны по всему профилю. Поэтому для элемента длины профиля ds

$$\nabla \mu_s = \alpha_A V_A^e \frac{\partial k}{\partial s}. \quad (4)$$

С учетом зависимости (4) выражение (3) после преобразования имеет следующий вид [17]:

$$J_A^s \approx -D_A^s \frac{c_A \alpha_A V_A^a}{kTR_{\Pi}^2}. \quad (5)$$

Из выражения (5) следует, что чем больше коэффициент поверхностной диффузии компонента A D_A^s , его концентрация c_A , коэффициента поверхностного натяжения α_A и меньше радиус контактного перешейка R_{Π} в зоне контакта частиц, тем больше образуются оксиды металлов при нагреве спеченных образцов.

Интенсивность окисления поверхности частиц порошков образцов при спекании пористых систем связана с процессом адсорбции и испарения ионов газа с поверхности одной частицы и конденсацией на поверхности. Поэтому атомы металлов и ионы адсорбированного газа испаряются с выступов и конденсируются на вогнутые поверхности. Этим обусловлено также увеличение концентрации оксидов металлов в зонах межчастичных контактов (см. **рис. 2**). Поскольку на интенсивность окисления поверхности частиц при спекании влияет не только количество испа-

рившихся атомов с поверхности частиц, но и количество конденсированных атомов на поверхности соседней частицы или в зону контактного перешейка, то количественные расчеты влияния пористости и гранулометрического состава производят по диффузионным потокам конденсированных атомов.

Если предположить, что поверхность частиц порошков достаточно гладкая и α_i мало зависит от состава сплавов, то диффузионный поток атомов компонента молекул (атомов или ионов) газов зоны контактного перешейка можно определить по следующей зависимости [17]:

$$J_A^{\Gamma} = \frac{P_O \alpha_A V_A^a}{(kT)^{\frac{3}{2}}} \left(\frac{m_A}{2\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{1}{R_{\Pi}} + \frac{1}{R_B} \right). \quad (6)$$

Из формулы (6) следует, что диффузия молекул газа с поверхности образцов в частицы порошков сплавов в результате воздействия лапласовских сил с увеличением радиуса кривизны перешейка снижается в квадратической зависимости и при сфероидизации пор ($R_{\Pi} \approx R_{\text{пор}}$) и

$\alpha_i = \alpha_{ij}$ направленный поток атомов компонента A обусловлен только градиентом концентрации, то есть кинетический фактор не играет роли в окислении материала матрицы порошковых материалов.

Анализ уравнений (5) и (6) показывает, что в беспористых образцах окисление металла частиц протекает только в результате объемной диффузии ионов газа и атомов компонентов, что подтверждают результаты экспериментов (**рис. 4**). В частности, жаростойкость образцов из порошка РХ-НСХ23 остаточной пористостью не более 2–3%, полученных горячей штамповкой спеченных формовок, значительно выше, чем у спеченных сплавов аналогичного химического состава (см. **рис. 1, 4**). Однако с увеличением температуры нагрева выше 800°C горячештампованные стали тоже окисляются достаточно интенсивно.

Известно, что хромоникелевые стали с пониженным содержанием углерода отмечают хорошей жаростойкостью при нагреве до 1000–1050°C. Поэтому было исследовано влияние содержания никеля в сплавах на основе порошка РХ-НСХ23 на жаростойкость и ударную износостойкость нагретых образцов.

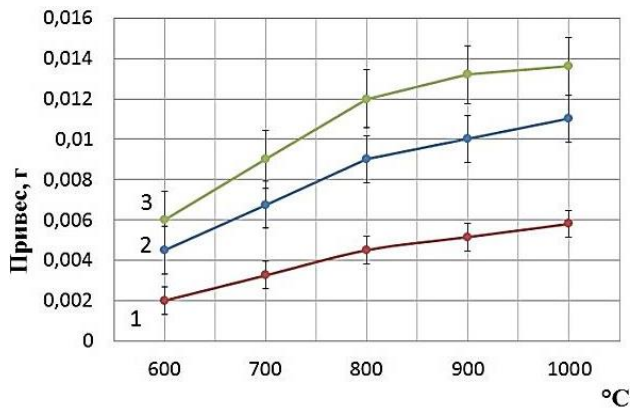


Рис. 4. Влияние температуры нагрева на жаростойкость образцов из порошка РХ-НСХ23, полученных ГШПЗ (1) и спеченных в вакууме (2) и в диссоциированном аммиаке (3)

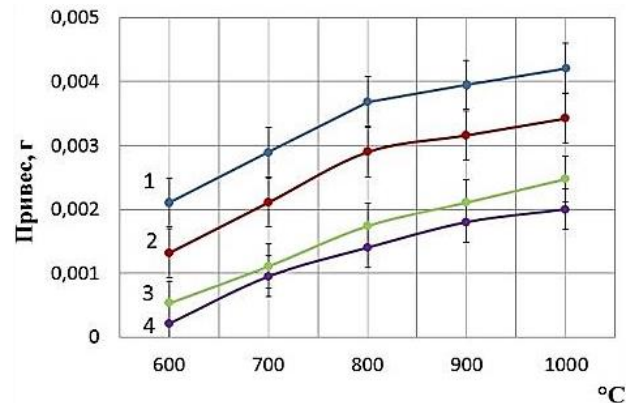
Fig. 4. The influence of the heating temperature on the heat resistance of the samples from RKh-NSKh23 powder produced by hot forging (1) and sintered in vacuum (2) and in dissociated ammonia (3)

Полученные результаты показывают, что жаростойкость исследуемых образцов на основе порошка РХ-НСХ23 с введением в шихту 15–20% Ni значительно возрастает (рис. 5, а и б, кривые 3 и 4). Анализ результатов экспериментальных исследований влияния химического состава и температуры спекания материала на основе порошка РХ-НСХ23 показывает, что с учетом погрешности измерений связь между скоростью окисления (приращения массы) и временем t близка к линейной и можно выразить уравнением типа $\Delta m = K_c t$. Здесь K_c константа скорости окисления.

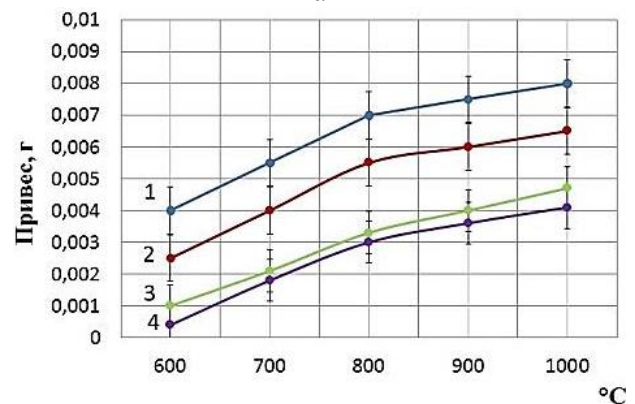
Испытания исследуемых материалов на ударную износостойкость $i_{уд}$ показали, что наиболее высокие значения $i_{уд}$ имеют образцы из порошка РХ-НСХ23, полученные горячей штамповкой пористых заготовок (ГШПЗ), а спеченные в вакууме образцы незначительно уступают им по $i_{уд}$ во всем температурном интервале (рис. 6, кривая 1). Максимальный износ имеют образцы, спеченные в диссоциированном аммиаке (рис. 6, кривая 3). Например, после испытания при 800°C 1 ч. износ спеченных в диссоциированном аммиаке сплавов составлял 0,32 мм (рис. 6, кривая 3).

Образцы с добавками никеля в пределах 15–20% отличаются более высокой ударной износостойкостью, как полученные ГШПЗ, так и спеченные (рис. 7, а–в). Как видно из рис. 7, у сплавов из порошка РХ-НСХ23 с добавками никеля в пределах 15–20% после испытания при

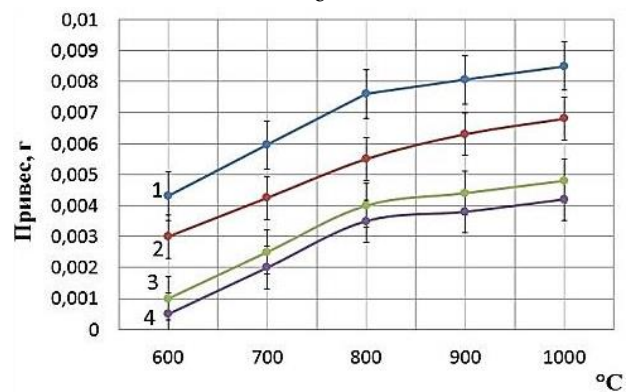
800°C 1 ч $i_{уд}$ горячештампованных и спеченных в вакууме образцов отличается незначительно (см. рис. 7, а и б, кривые 1 и 2).



а



б



в

Рис. 5. Влияние температуры нагрева на жаростойкость образцов из смеси на основе порошка РХ-НСХ23, полученных ГШПЗ (а), спеченных в вакууме (б) и в диссоциированном аммиаке (в), при содержании Ni, мас. %: 1–5; 2–10; 3–15; 4–20

Fig. 5. The influence of the heating temperature on the heat resistance of the samples from a mixture based on RKh-NSKh23 powder produced by hot forging (а), sintered in vacuum (б) and in dissociated ammonia (в), at a Ni content, wt%: 1–5; 2–10; 3–15; 4–20

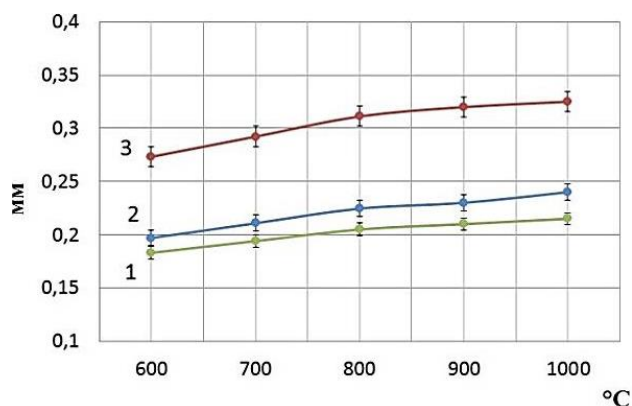
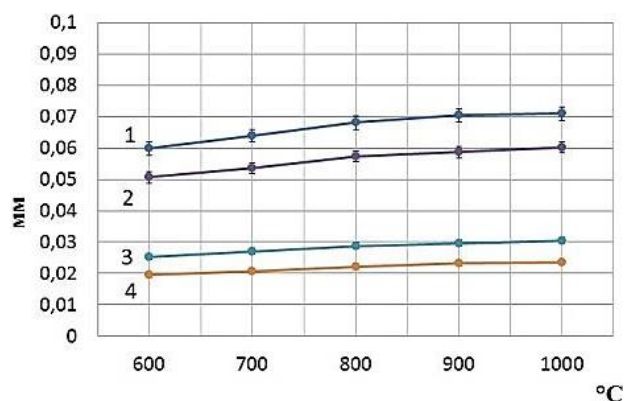


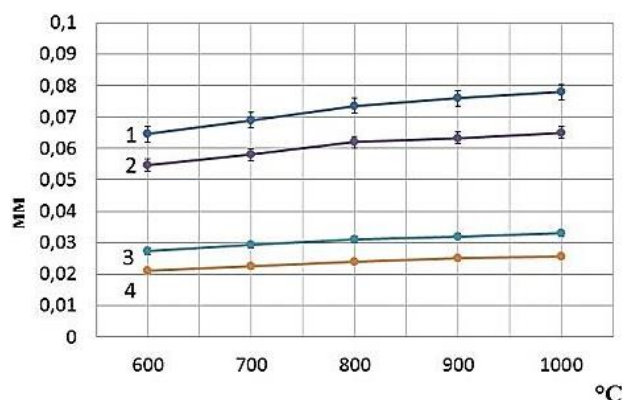
Рис. 6. Влияние температуры нагрева на ударную износостойкость образцов из порошка РХ-НСХ23, полученных ГШПЗ (1), спеченных в вакууме (2) и в диссоциированном аммиаке (3)
Fig. 6. The influence of the heating temperature on the impact wear resistance of the samples from RKh-NSKh23 powder produced by hot forging (1), sintered in vacuum (2) and in dissociated ammonia (3)

Как было показано в работе [12], для производства седел клапанов двигателей внутреннего сгорания перспективны исследования, связанные с разработкой технологии получения биметаллических седел клапанов на основе распыленных порошков высоколегированных сталей и сплавов, так как снижается стоимость готовых изделий и повышается их рабочий ресурс за счет незначительного изменения структуры и свойств в процессе эксплуатации. Для проведения испытаний на ударную износостойкость были изготовлены биметаллические цилиндрические образцы, базовая часть которых составляет порошок железа, легированный медью, а рабочая часть из порошков на основе высокохромистой быстрорежущей стали РХ-НСХ23 (рис. 8, а, б).

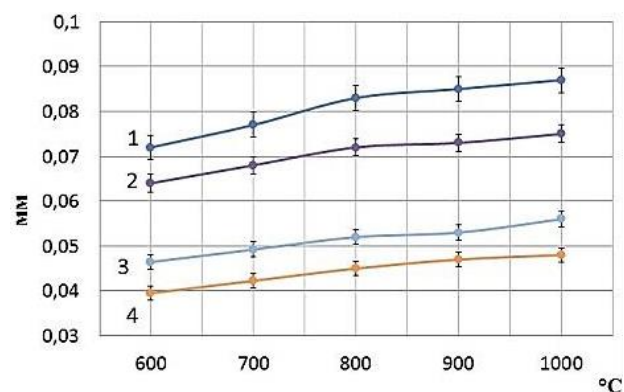
Было исследовано влияние остаточной пористости на окалиностойкость и ударную износостойкость спеченных образцов из смеси порошков РХ-НСХ23+15%Ni. Исследования показали, что после испытания образцов, нагретых при 800°C в течение 1 ч, $i_{уд}$ возрастает плавно при повышении пористости с 15 до 25%, а при $P = 30\%$ ударная износостойкость спеченных в вакууме образцов составила 0,22 мм. Привес окалины при этом не превышал 0,01–0,012 г (рис. 9, а). Эти показатели у сплава, спеченного в ДА, несколько хуже (рис. 9, б).



а

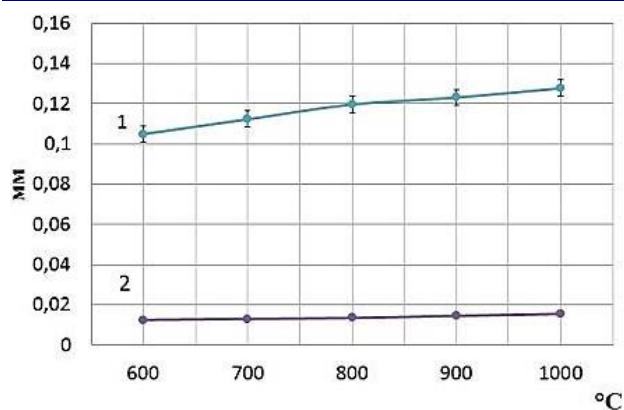


б

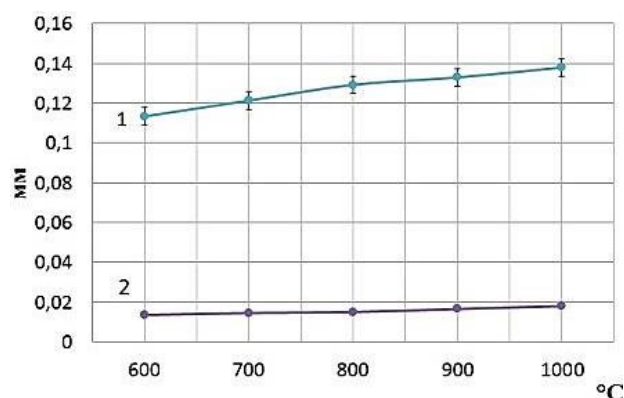


в

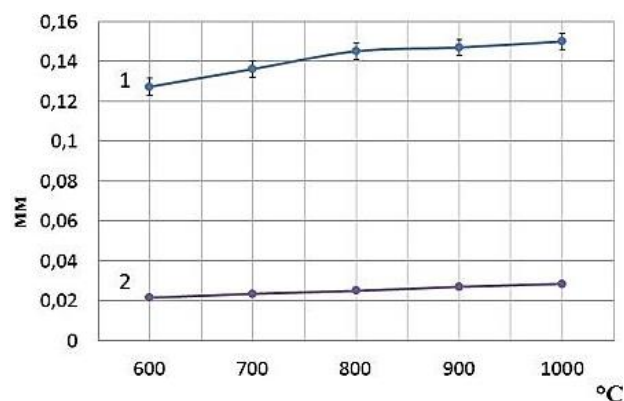
Рис. 7. Зависимость ударной износостойкости образцов из смеси на основе порошка РХ-НСХ23 от содержания никеля (мас. %: 1–5; 2–10; 3–15; 4–20): а – полученных ГШПЗ; б – спеченных в вакууме; в – спеченных в диссоциированном аммиаке
Fig. 7. Dependence of the impact wear resistance of the samples from a mixture based on RKh-NSKh23 powder on the nickel content (wt%: 1–5; 2–10; 3–15; 4–20): а is produced by hot forging; б is sintered in vacuum; в is sintered in dissociated ammonia



а



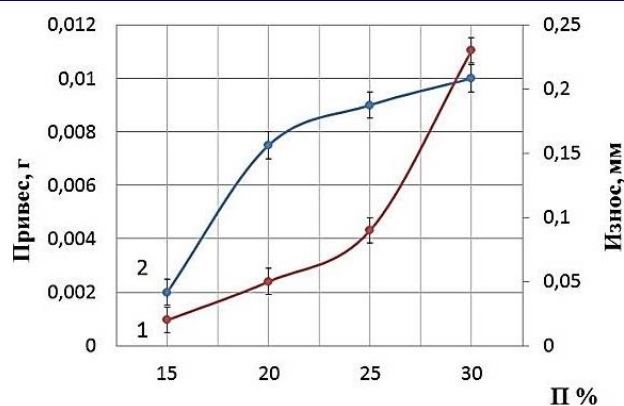
б



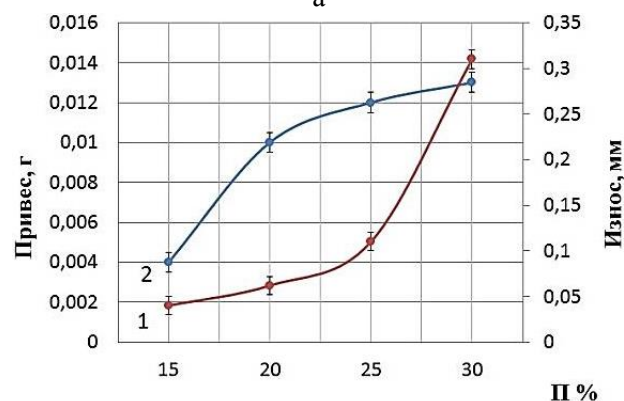
в

Рис. 8. Влияние температуры нагрева на ударную износостойкость биметаллических образцов с рабочим слоем из порошка РХ-НСХ23 (1) и РХ-НСХ23+15% Ni (2): а – полученных ГШПЗ; б – спеченных в вакууме; в – спеченных в диссоциированном аммиаке

Fig. 8. The influence of the heating temperature on the impact wear resistance of the bimetallic samples with a working layer of powder RKh-NSKh23 (1) and RKh-NSKh23 +15% Ni (2): а is produced by hot forging; б is sintered in vacuum; в is sintered in dissociated ammonia



а



б

Рис. 9. Зависимость ударной износостойкости (1) и жаростойкости (2) от пористости (%), спеченных в вакууме (а) и в диссоциированном аммиаке (б) образцов из смеси порошка РХ-НСХ23+15%Ni

Fig. 9. Dependence of impact wear resistance (1) and heat resistance (2) on porosity (%) of the samples sintered in vacuum (а) and in dissociated ammonia (б) from a mixture of RKh-NSKh23 +15%Ni powder

Заключение

Исследовано влияние химического состава, способа введения легирующих компонентов в шихту на основе высокохромистых порошков быстрорежущей стали и феррохрома, исходной пористости прессовок, режима и условий спекания и горячей штамповки пористых формовок и биметаллических образцов на жаростойкость и ударную износостойкость.

Теоретически обосновано и экспериментально установлено, что независимо от состава и способа введения добавок порошковые высокохромистые стали РХ-НСХ23 с плотностью 6,0–6,5 г/см³, спеченные в диссоциированном аммиаке, обладают низкой жаростойкостью и

ударной износостойкостью. Выявлен механизм окисления поверхности пористых систем и показано, что на кинетику образования оксидов металлов на поверхности прессовок при спекании влияет интенсивность диффузионного массопереноса атомов металлов и ионов адсорбированного газа по поверхности части и в зоны межчастичного контакта. Показано, что при сфероидизации поверхностных пор или закрытии их толщина оксидной пленки зависит в основном от химического состава материала и температуры испытания.

У горячештампованных высокохромистых сталей из порошка РХ-НСХ23, остаточной пористостью не более 2–4%, жаростойкость и ударная износостойкость повысились более чем в 2–3 раза по сравнению со спеченными. При добавлении никеля в пределах 15–20% мас. в порошок стали РХ-НСХ23 и механической активации шихты существенно возрастают жаростойкость и ударная износостойкость материалов, спеченных в вакууме и полученных ГШПЗ.

Впервые выявлено, что у спеченных биметаллических образцов с рабочим слоем из порошка РХ-НСХ23 и корпуса из смеси порошков ПЖРВ 2.200.28 + ПМС-1 исследуемая ударная износостойкость примерно в 1,5–2 раза выше, чем у цельных образцов из активированных распыленных порошков высокохромистых быстрорежущих сталей.

Список литературы

1. Щедров К.П., Гакман Э.Л. Жаростойкие материалы. М.; Л.: Машиностроение, 1965. 168 с.
2. Гуляев А.П. Металловедение. М.: Металлургия, 1986. 544 с.
3. Металловедение и термическая обработка. В 3-х т. / под ред. Бернштейна М.Л., Рахштадта А.Г. // Методы испытания и исследования. В 2-х кн. Кн. 2. М.: Металлургия, 1991. 462 с.
4. Лабораторные работы по коррозии и защите металлов / Н.Д. Томашов, Н.П. Жук, В.А. Титов, М.А. Веденева. М.: Металлургия, 1961. 238 с.
5. Basshuysen R., Schäfer F. Internal Combustion Engine. Basics, Components, Systems, and Perspectives // Handbook. Warrendale, Pa, 2004, pp. 174–182.
6. Abrasion Resistant Improvement of the Valve Seat for Automobile Engines by the Oxidation and the Turn. Kenji Matsumoto, Akira Sasaki. TRACK: ENGINE & DRIVETRAIN VII (7C), 2016. 6 p.
7. Study of the mechanical and metallurgical properties of sintered steels for valve seat inserts application / Gomes M.P., Santos I.P., Mucsi C.S., Colosio M.A., Rossi J.L. // Proceedings of the VII Encontro Científico de Física Aplicada. Serra, ES, Brazil, 2016, pp. 59–61.

8. Sintered Valve Seat Inserts – Microstructural Characterization / Filho E.S. Jesus, E.R.B. Jesus, L. Salgado, S.L. Jesus, M.A. Colosio, J.C. Santos, et al // Materials Science Forum, 2006, pp. 65–70.
9. Machining. P/M High-Speed Tool Steels / Pinnow K.E., Stasko W. // ASM Handbook, 1995, pp. 127–145.
10. The Development of a High-Speed Steel Based Sintered Material for High Performance Exhaust Valve Seat Inserts / Kawata H., Hayashi K., Ishii K., Maki K., Ehirra A., Toriumi M. // SAE Technical Paper in United States. 1998.
11. Kawata H., Maki K. Development of high performance valve seat insert materials for gas engines // Powder Metallurgy Technology, 2011, pp. 64–65.
12. Гасанов Б.Г., Бабец А.В., Баев С.С. Получение биметаллических колец для седел клапанов ДВС из активированных порошков быстрорежущей стали // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №2. С. 79–89.
13. Vernigorov Yu.M., Gasanov B.G., Baev S.S. Magnetic Wave Technology of Grinding Slime Separation. Solid State Phenomena [электрон. журнал]. 2017. Vol. 265. P. 1020–1025.
14. Влияние режима двухступенчатого спекания на структурообразование и свойства порошковых цельнопрессованных биметаллических материалов на основе железа/ Гасанов Б.Г., Передерий В.Г., Ефимов А.Д., Баев С.С. // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2018. № 2. С. 23–34.
15. ГОСТ 6130-71. Металлы. Методы определения жаростойкости.
16. Пат. 204755 РФ. Установка для испытания на износостойкость и жаростойкость порошковых и композиционных материалов.
17. Гасанов Б. Г. Взаимная диффузия и гомогенизация в порошковых сплавах. Новочеркасск: ЮРГТУ, 2002. 113 с.

References

1. Shchedrov K.P., Gakman E.L. *Zharostoikie materialy* [Heat-resistant materials]. Moscow-Leningrad: Mechanical Engineering, 1965, 168 p. (In Russ.)
2. Gulyaev A.P. *Metallovedenie* [Metal science]. Moscow: Metallurgy, 1986, 544 p. (In Russ.)
3. Bernshtein M.L., Rakhshadt A.G. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka. Metody ispytaniya i issledovaniya* [Metal science and heat treatment. Test methods and studies]. Moscow: Metallurgy, 1991, 462 p. (In Russ.)
4. Tomashov N.D., Zhuk N.P., Titov V.A., Vedeneva M.A. *Laboratornye raboty po korrozii i zashchite metallov* [Laboratory classes on corrosion and protection of metals]. Moscow: Metallurgy, 1961, 238 p. (In Russ.)
5. Basshuysen R., Schäfer F. Internal combustion engine. Basics, components, systems, and perspectives. Handbook. Warrendale, PA, 2004, pp. 174–182.

6. Kenji Matsumoto, Akira Sasaki. Abrasion resistant improvement of the valve seat for automobile engines by the oxidation and the turn. TRACK: ENGINE & DRIVETRAIN VII (7C), 2016. 6 p.
7. Gomes M.P., Santos I.P., Mucsi C.S., Colosio M.A., Rossi J. L. Study of the mechanical and metallurgical properties of sintered steels for valve seat inserts application. Proceedings of the VII Encontro Científico de Física Aplicada. Serra, ES, Brazil, 2016, pp. 59–61.
8. Filho E.S. Jesus, E.R.B. Jesus, L. Salgado, S.L. Jesus, M.A. Colosio, J.C. Santos, et al. Sintered valve seat inserts - Microstructural characterization. Materials Science Forum, 2006, pp. 65–70.
9. Pinnow K.E., Stasko W. Machining. P/M high-speed tool steels. ASM Handbook, 1995, pp. 127–145.
10. Kawata H., Hayashi K., Ishii K., Maki K., Ehira A., Toriumi M. The development of a high-speed steel based sintered material for high performance exhaust valve seat inserts. SAE Technical Paper in United States. 1998.
11. Kawata H., Maki K. Development of high performance valve seat insert materials for gas engines. Powder Metallurgy Technology, 2011, pp. 64–65.
12. Gasanov B.G., Babets A.V., Baev S.S. Producing bimetallic rings for valve seats of internal combustion engines from activated powders of high-speed steel. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2021, vol. 19, no. 2, pp. 79–89. (In Russ.)
13. Vernigorov Yu.M., Gasanov B.G., Baev S.S. Magnetic wave technology of grinding slime separation. Solid State Phenomena. 2017, vol. 265, pp. 1020–1025.
14. Gasanov B.G., Perederiy V.G., Efimov A.D., Baev S.S. Influence of the two-stage sintering schedule on the structure formation and properties of solid-pressed bimetallic iron-based powder materials. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Poroshkovaya metallurgiya i funktsionalnye pokrytiya* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Powder Metallurgy and Functional Coatings], 2018, no. 2, pp. 23–34. (In Russ.)
15. GOST 6130-71. Metals. Methods for determining heat resistance. (In Russ.)
16. *Ustanovka dlya ispytaniya na iznosostoykost i zharostoykost poroshkovykh i kompozitsionnykh materialov* [Installation for testing wear resistance and heat resistance of powder and composite materials]. Patent RF, no. 204755.
17. Gasanov B.G. *Vzaimnaya diffuziya i gomogenizatsiya v poroshkovykh splavakh* [Mutual diffusion and homogenization in powder alloys]. Novocherkassk: SRSPU, 2002, 113 p. (In Russ.)

Поступила 25.10.2021; принята к публикации 15.11.2021; опубликована 24.12.2021
Submitted 25/10/2021; revised 15/11/2021; published 24/12/2021

Гасанов Бадрудин Гасанович – доктор технических наук, профессор, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, Новочеркасск, Россия.

Email: gasanov.bg@gmail.com

Бабец Александр Васильевич – кандидат технических наук, директор ООО «Композит Нчк», Новочеркасск, Россия. Email: babets@kompozite.ru

Баев Сергей Сергеевич – аспирант, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, Новочеркасск, Россия.

Email: baiev93@mail.ru

Badrudin G. Gasanov – DrSc (Eng.), Professor, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia. Email: gasanov.bg@gmail.com

Alexander V. Babets – PhD (Eng.), Director of LLC Kompozit Nchk, Novocherkassk, Russia. Email: babets@kompozite.ru

Sergey S. Baev – postgraduate student, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia. Email: baiev93@mail.ru

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

УДК 678.7-1:544.23

DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-4-56-63



СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БИОРАЗЛАГАЕМЫХ И СИНТЕТИЧЕСКИХ ПОЛИМЕРОВ

Ершова О.В., Медяник Н.Л., Мишурина О.А., Бессонова Ю.А., Багреева К.В.

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

Аннотация. В статье представлен сравнительный анализ свойств биоразлагаемых и синтетических полимерных материалов. Цель работы заключалась в определении физико-механических характеристик биоразлагаемых и синтетических полимеров: водопоглощения, стойкости к проколу, деформационно-прочностных и теплофизических характеристик различных биоразлагаемых образцов на основе полилактидов (PLA) и синтетических полимерных образцов (полипропилена и полиэтилена) с целью рассмотрения возможности улучшения прочностных свойств готовой продукции. Также в работе представлены результаты исследования водопоглощающей способности полимерных материалов различной природы. Приведены результаты испытаний, позволяющие установить температурно-временные параметры переработки полилактида по расплавному методу. Проанализированы данные, полученные методом ДСК по установлению релаксационных и фазовых переходов, происходящих в полимере при термолизе. Кроме того, были рассмотрены экологические аспекты практического применения указанных полимерных материалов. В ходе проведения эксперимента были проведены экспериментальные исследования химических свойств биоразлагаемых материалов на основе полилактидов (PLA) китайского производства, представлен сравнительный анализ физико-механических характеристик исследуемых синтетических и биоразлагаемых полимеров. Рассмотрены основные преимущества и недостатки исследуемых образцов полимеров. Сформулированы выводы о возможности и безопасности применения представленных материалов в различных отраслях народного хозяйства. На основании полученных результатов эксперимента установлено, что синтетические полимерные материалы по всем основным значениям физико-механических характеристик превосходят биоразлагаемые полимерные материалы, но при этом они уступают в экологичности их использования. Отмечено, что для улучшения эксплуатационных свойств готовой продукции в случае использования биоразлагаемых полимеров рекомендуется использование упрочняющих и гидрофобизирующих добавок.

Ключевые слова: полилактид, биоразлагаемые полимеры, синтетические полимеры, водопоглощение, деформационно-прочностные, теплофизические характеристики.

© Ершова О.В., Медяник Н.Л., Мишурина О.А., Бессонова Ю.А., Багреева К.В., 2021

Для цитирования

Сравнительный анализ физико-механических свойств биоразлагаемых и синтетических полимеров / Ершова О.В., Медяник Н.Л., Мишурина О.А., Бессонова Ю.А., Багреева К.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №4. С. 56–63. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-4-56-63>



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

COMPARATIVE ANALYSIS OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF BIODEGRADABLE AND SYNTHETIC POLYMERS

Ershova O.V., Medyanik N.L., Mishurina O.A., Bessonova Yu.A., Bagreeva K.V.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. The paper presents a comparative analysis of the properties of biodegradable and synthetic polymer materials. The purpose of the research was to determine the physical and mechanical characteristics of biodegradable and synthetic polymers: water absorption, puncture resistance, deformation strength and thermophysical characteristics of various biodegradable samples based on polylactides (PLA) and synthetic polymer samples (polypropylene and polyethylene) in order to consider the possibility of improving the strength properties of finished products. The paper also presents the results of a study on the water-absorbing ability of polymer materials of various nature. It describes the results of tests to establish temperature and time parameters of polylactide processing by the melt production method. The authors analyzed the data obtained by the DSC method to determine relaxation and phase transitions occurring in the polymer during thermolysis. In addition, the paper considers environmental aspects of the practical application of these polymer materials. During the experiment, the authors have studied the chemical properties of biodegradable materials based on polylactides (PLA) produced in China, carried out a comparative analysis of the physical and mechanical characteristics of the synthetic and biodegradable polymers under study. The authors have outlined main advantages and disadvantages of the polymer samples under study and made conclusions about the possibility and safety of using the presented materials in various sectors of the national economy. The experimental results have shown that synthetic polymer materials are superior to biodegradable ones in all basic values of physical and mechanical characteristics, but at the same time they are inferior in environmental friendliness of their use. It is noted that in order to improve the operational properties of finished products, in case of biodegradable polymers it is recommended to use strengthening and hydrophobic additives.

Keywords: polylactide, biodegradable polymers, synthetic polymers, water absorption, deformation strength, thermophysical characteristics.

For citation

Ershova O.V., Medyanik N.L., Mishurina O.A., Bessonova Yu.A., Bagreeva K.V. Comparative Analysis of Physical and Mechanical Properties of Biodegradable and Synthetic Polymers. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021, vol. 19, no. 4, pp. 56–63. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-4-56-63>

Введение

Сегодня проблема утилизации пластиковых отходов обострилась до уровня современной экологической катастрофы, связанной с чрезмерным потреблением полимерных материалов. По данным статистики совокупная масса произведенных за всю историю человечества пластмасс превышает 6 миллиардов тонн, из которых переработке или уничтожению подверглись лишь 20% [1].

В настоящее время ~30% полимерных отходов сжигается, 30% – перерабатывается вторично, и около 30% – не утилизируется вовсе. Крупные страны, стараясь решить эти проблемы, всё чаще задумываются о создании и использовании инновационных полимерных материалов, как частный случай – биополимеры. Это полимеры, которые сохраняют эксплуатационные свойства только в течение периода потребления и использования [2–4]. Срок жизни биоразлагаемых полимеров, как правило, составляет до нескольких месяцев. Счи-

тается, что биоразлагаемые материалы по своим свойствам схожи с синтетическими полимерами [3–5]. Поэтому они способны заменить пластмассы, полимерные пленки и другие упаковочные материалы. Упаковка из биоразлагаемых полимерных материалов в отличие от синтетической полимерной упаковки обладает рядом преимуществ, заключающихся в легкости вторичной переработки и решении экологических проблем. Именно поэтому изучение свойств биополимеров и сравнение их с синтетическими материалами является актуальным научным направлением [3, 6, 7].

Целью работы является определение физико-механических характеристик: водопоглощения, стойкости к проколу, деформационно-прочностных и теплофизических характеристик различных биоразлагаемых полимерных материалов на основе полилактидов (PLA) и образцов синтетических полимеров с целью рассмотрения возможности улучшения прочностных свойств готовой продукции.

Полученные результаты и их обсуждение

В ходе проведения экспериментальных исследований были изучены свойства биополимеров на основе полилактидов (PLA) различных производителей (Китай), обозначенных в работе под номерами №1–5, произведенных в Китае. В работе проведен сравнительный анализ физико-механических характеристик биоразлагаемых материалов и наиболее широко используемых синтетических полимерных материалов полиэтилена низкой плотности (ПЭНП) и полипропилена (ПП).

В ходе исследования использовались следующие методики: методика испытания полимерных пленок на растяжение согласно ГОСТ 14236-81 «Пленки полимерные. Метод испытания на растяжение». Определение водопоглощения проводилось согласно ГОСТ 4650-2014 (ISO 62:2008) «Пластмассы. Методы определения водопоглощения». Определение стойкости к проколу проводилось по ГОСТ 12.4.118-82 «Пленочные полимерные материалы и искусственные кожи для средств защиты рук. Метод определения стойкости к проколу». Исследование теплофизических характеристик и состава биоразлагаемых полимеров методом синхронного термического анализа проводилось согласно ISO 11357 «Пластмассы. Дифференциальная сканирующая калориметрия».

Результаты экспериментального исследования по водопоглощению анализируемых образцов представлены в **табл. 1**. Анализ полученных результатов показал, что наилучшая водопоглощающая способность отмечена у образцов PLA №2. Кроме того, в ходе исследования на водопоглощение полимерных материалов было установлено, что данный показатель в целом выше у биоразлагаемых материалов, чем у синтетических. Это позволяет сделать вывод о том, что биополимеры более сильно подвержены разложению в водных средах, в сравнении с синтетическими полимерными материалами [8, 9].

Результаты испытания исследуемых образцов по показателю стойкости к проколу представлены в **табл. 2**. В результате исследования было установлено, что стойкость к проколу биоразлагаемых и синтетических материалов сопоставима, а в некоторых случаях и значительно выше, следовательно, рассматриваемые образцы полилактидных материалов могут найти практическое применение для получения транспортной упаковки, а также в производстве упаковочных материалов для пищевой продукции [1, 3, 10, 11].

Таблица 1. Результаты испытаний полимерных материалов по показателям водопоглощения
Table 1. Results of tests of polymer materials on water absorption indicators

Исследуемые образцы полимерных материалов	Масса образца до испытания m_1 , г	Масса образца после испытания m_2 , г	Водопоглощение C , %
PLA №1	0,149650	0,16840	7,94423
PLA №2	0,04955	0,06605	15,32531
PLA №3	0,01015	0,01125	10,48361
PLA №4	0,06545	0,06670	9,28450
PLA №5	0,03291	0,04245	5,70109
ПЭНП	0,04190	0,04551	9,87996
ПП	0,07170	0,07475	2,98851

Таблица 2. Результаты испытаний полимерных материалов по показателям стойкости к проколу
Table 2. Results of tests of polymer materials in terms of puncture resistance

Исследуемые образцы полимерных материалов	Толщина образца, мм	Усилие прокола, Н	Нормальное растягивающее напряжение при проколе σ , МПа
PLA №1	0,03	0,83	1,057
PLA №2	0,03	0,5	0,637
PLA №3	0,06	1,06	1,35
PLA №4	0,02	0,43	0,547
PLA №5	0,03	0,4	0,509
ПЭНП	0,02	0,56	0,713
ПП	0,02	0,4	0,509

Результаты прочностных характеристик исследуемых образцов полимерных материалов представлены в **табл. 3**. Испытание образцов на растяжение проводилось в двух направлениях – поперечном и продольном. Анализ полученных результатов показал что, максимальные значения растяжения материала (при поперечном направлении) отмечены у синтетического полимера ПЭНП. Максимальные значения растяжения материала (в продольном направлении) характерны для образца PLA №2. Из этого можно сделать вывод, что полилактидные пленки ориентированы в двух направлениях, но в поперечном направлении прочность полилактидных материалов при разрыве выше. Полилактидные плёнки очень эластичны, хорошо тянутся и практически не уступают по данному параметру синтетическим полимерным материалам [2, 6, 12].

Таблица 3. Результаты испытаний полимерных материалов по деформационно-прочностным показателям
 Table 3. Results of tests of polymer materials on deformation and strength indicators

Исследуемые образцы полимерных материалов	Прочность при растяжении, МПа	Относительное удлинение, %	Прочность при разрыве, МПа	Относительное удлинение при разрыве, %
Поперечное направление				
PLA №1	2,16	18,964	0,91	35,153
PLA №2	2,7	5,638	0,77	45,974
PLA №3	6,21	6,708	4,1	9,336
PLA №4	2,22	5,45	1,39	11,626
PLA №5	1,6	4,45	0,45	20,584
ПЭНП	4,84	14,968	1,78	26,087
ПП	4,01	2,24	1,16	41,261
Продольное направление				
PLA №1	1,4	8,3	0,38	32,283
PLA №2	3,64	10,01	1,01	20,597
PLA №3	8,6	8,27	2,11	34,56
PLA №4	2,73	11,12	1,33	18,049
PLA №5	2,7	18,73	0,946	25,08
ПЭНП	4,7	39,84	2,43	45,902
ПП	1,99	3,764	0,53	20,533

Изучение теплофизических характеристик биоразлагаемых материалов и их состава проводили методом термогравиметрической и дифференциально-сканирующей колориметрии (ТГ и ДСК) на приборе синхронного термического анализа STA 449 F3 Jupiter (NETZSCH, Германия).

Для проведения испытания образцы исследуемого материала помещали в алюминиевый тигель. Тигель с образцами материала закрывали крышкой и устанавливали на держателе прибора с термопарой типа S чувствительностью 1 мкВт. По заданной температурной программе (нагрев от 30 до 600°C со скоростью 10°C/мин) проводили испытание в атмосфере аргона (20 мл/мин). При помощи электронной системы и пакета программ NETZSCH-Proteus осуществлялся контроль и сбор данных. Анализ данных выполнялся в программе Proteus Analysis [1, 13].

Кривые синхронного термического анализа образца PLA №1 представлены на **рис. 1**.

На ДСК-кривой отмечено несколько эндотермических пиков. Пик при 42,9°C характеризует удаление из образца легколетучих компонентов, к которым могут относиться вода, растворители и ряд других веществ. Данная кривая имеет два пика плавления (пики при 145,1 и 161,3°C). Остальные указанные пики соответ-

ствуют стадиям разложения органических компонентов, входящих в состав полилактидных материалов.

На кривой производной по термогравиметрической кривой (ДТГ-кривой) выделено четыре пика разложения (пики при 40,1; 324,7; 377,4 и 513,0°C). Пик с вершиной при температуре 40,1°C характеризует удаление из образца легколетучих компонентов (соответствующая потеря массы, установленная по термогравиметрической кривой (ТГ-кривой), составляет 0,79%). При 270,7°C начинается процесс разложения полилактида (ПЛА), который протекает в две стадии (пики при 324,7 и 377,4°C) с общей потерей массы 65,71%. При 513,0°C разлагается более термостойкий компонент материала с общей потерей массы 12,08%. Указанные потери массы для каждого из компонентов приблизительно соответствуют их долям (масс.) в составе материала.

По ТГ-кривой определено, что остаточная масса при температуре 599,7°C равна 17,82%. Её образуют углерод и неорганические компоненты, которые, например, могут входить в состав наполнителя.

Кривые синхронного термического анализа образца PLA №3 представлены на **рис. 2**.

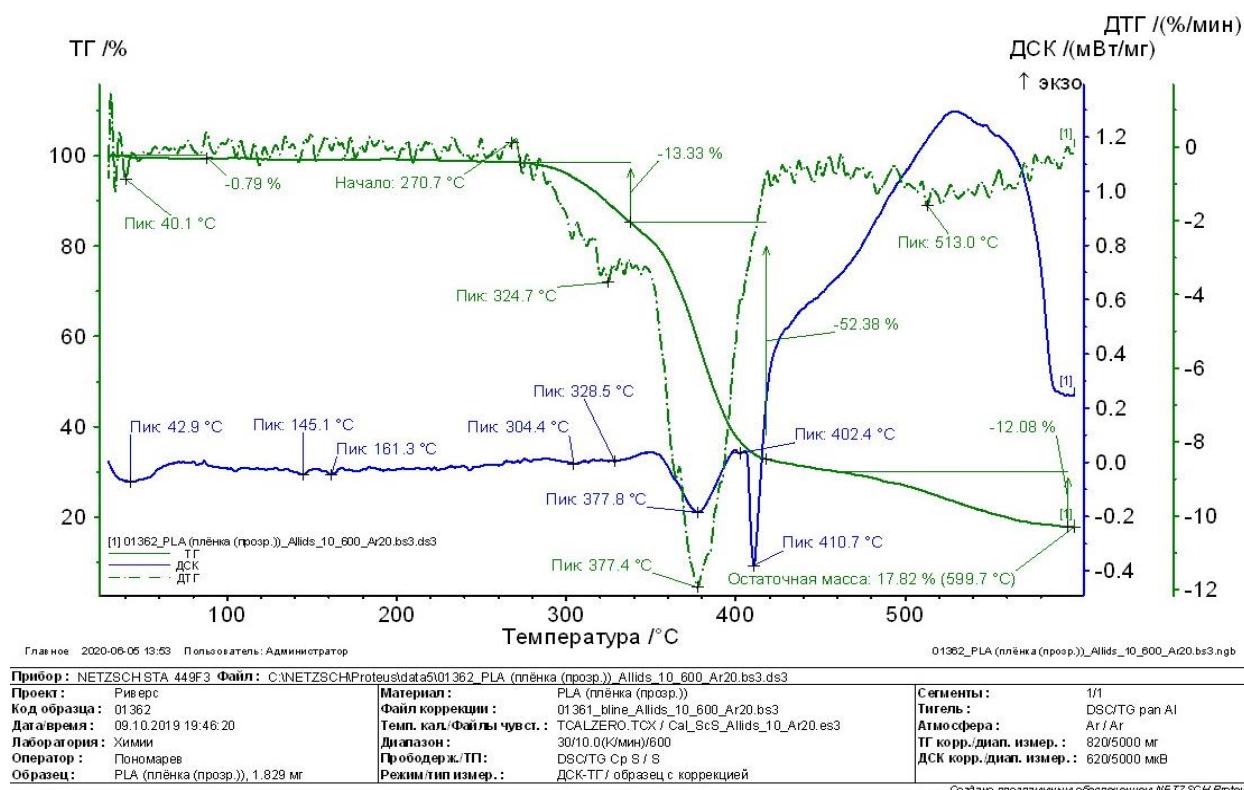


Рис. 1. Кривые синхронного термического анализа образца PLA №1

Fig. 1. Curves of simultaneous thermal analysis of sample PLA No. 1

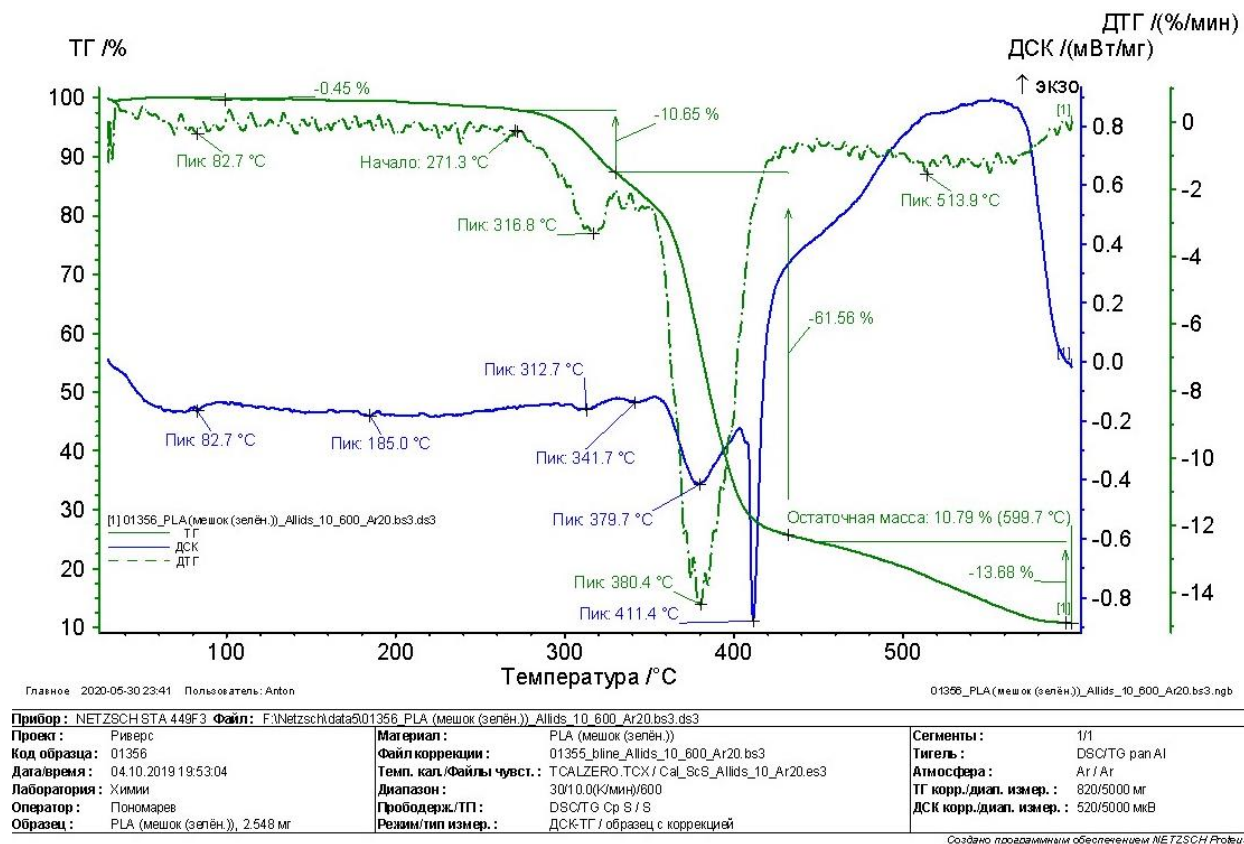


Рис. 2. Кривые синхронного термического анализа образца PLA №3

Fig. 2. Curves of simultaneous thermal analysis of sample PLA No. 3

На ДСК-кривой отмечено несколько эндотермических пиков. Пик при температуре 82,7°C характеризует удаление из образца легколетучих компонентов, к которым могут относиться вода, растворители и ряд других веществ. Данная кривая имеет один пик плавления при 185,0°C. Остальные указанные пики соответствуют стадиям разложения органических компонентов, входящих в состав полилактидных материалов.

На ДТГ-кривой выделено четыре пика разложения (пики при 82,7; 316,8; 380,4 и 513,9°C). Пик с вершиной при температуре 82,7°C характеризует удаление из образца легколетучих компонентов (соответствующая потеря массы, установленная по термогравиметрической кривой (ТГ-кривой), составляет 0,45%). При 271,3°C начинается процесс разложения полилактида (ПЛА), который протекает в две стадии (пики при 316,8 и 380,4°C) с общей потерей массы 72,21%. При 513,9°C разлагается более термостойкий компонент материала с общей потерей массы 13,68%. Указанные потери массы для каждого из компонентов приблизительно соответствуют их долям (масс.) в составе материала.

По ТГ-кривой определено, что остаточная масса при температуре 599,7°C равна 10,79%. Ее образуют углерод и неорганические компоненты, которые, например, могут входить в состав наполнителя.

Заключение

По результатам исследований физико-механических свойств синтетических и биоразлагаемых полимеров можно сделать вывод о том, что представленные образцы PLA легко разлагаются под действием воды, обладают достаточной эластичностью и стойкостью к проколу.

Методом термогравиметрической и дифференциально-сканирующей колориметрии (ТГ и ДСК) установлены температурно-временные параметры переработки полилактида по расплавному методу. А также идентифицировано наличие неорганического компонента в составе исследуемых образцов биополимера, что может указывать на наличие в них связующих и модифицирующих добавок.

Синтетические полимерные материалы по исследуемым физико-механическим характеристикам превосходят биоразлагаемые полимерные материалы, однако в отличие от биополимеров практически не утилизируются в природе естественным путем.

Биоразлагаемые полимерные материалы

можно широко применять в упаковочном производстве, медицине и других отраслях народного хозяйства [5, 10, 13]. Для улучшения эксплуатационных свойств готовой продукции, рекомендуется использовать специальные модифицирующие (упрочняющие и гидрофобизирующие) добавки [14, 15].

Список литературы

1. Ершова О.В., Багреева К.В. Исследование физико-механических свойств биоразлагаемых и синтетических полимеров // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докладов 79-й Международной научно-технической конференции. 2021. Т.2. 603 с.
2. Биоразлагаемые полимеры. Современное состояние и перспективы использования / Вальданов Ф.Ш., Латыпова Ф.Н., Красуцкий П.А., Чанышев Р.Р. // Промышленные биотехнологии. Москва, 2014. 52 с.
3. Ивановский С.К., Бахаева А.Н. Экологические аспекты проблемы утилизации отходов полимерной упаковки и техногенных минеральных ресурсов // Успехи современного естествознания. 2015. № 1–5. С. 813–817.
4. Adamcová Dana, Vavrková Magdalena, Toman František: Repeated research of biodegradability of plastics materials in real composting conditions. Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis, 2013, LXI, № 6, pp.1557–1564.
5. Влияние химической природы проклеивающих компонентов на гидрофильные и гидрофобные свойства целлюлозных материалов / Муллина Э.Р., Мишурина О.А., Чупрова Л.В., Ершова О.В. // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6. С. 250.
6. Annemette Kjeldsen, Marcus Price, Charlotte Lilley, Ewa Guzniczak, Ian Archer. A Review of Standards for Biodegradable Plastics // industrial Biotechnology Innovation Centre, 2017, pp. 33.
7. Dr. Rolf-Joachim Miller. Biodegradability of Polymers: Regulations and Methods for Testing. Gesellschaft für Biotechnologische Forschung, 2016, pp. 388.
8. Изучение влияния состава неорганического наполнителя на физико-химические свойства полимерного композиционного материала / Ершова О.В., Муллина Э.Р., Чупрова Л.В., Мишурина О.А., Бодьян Л.А. // Фундаментальные исследования. 2014. № 12–3. С. 487–491.
9. Биодegradируемые пленочные материалы на основе синтетических и микробиологически синтезированных полимеров / Закирова А.Ш., Канарская З.А., Михайлова О.С., Василенко С.В. // Промышленные биотехнологии. Казань, 2013. 61 с.
10. Коляда Л.Г., Медяник Н.Л., Ефимов Ю.Ю. Синтез и исследование наночастиц серебра и возможность их использования в пищевой упаковке // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №2 (50). С. 65–69.

11. Yershova O.V., Chuprova L.V., Mullina E.R., Mishurina O.A., Permyakov M.B. The solution of environmental problems during plastic package recycling // International Journal of Applied Engineering Research. 2015. T. 10. № 24. Pp. 44896–44899.
12. Мухаметдинова А.А. Определение деструкции био-разлагаемых полимеров // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докладов 78-й международной научно-технической конференции. 2020. С. 30.
13. Ершова О.В. Деструкция полимерных пленок, модифицированных оксибиоразлагаемой добавкой d2W // Успехи современного естествознания. 2016. № 11–2. С. 221–225.
14. Ершова О.В., Чупрова Л.В. Решение проблемы утилизации отходов полимерных материалов // Фундаментальные исследования. 2016. № 11–2. С. 271–275.
15. Magdalena Vavercová, Jana Kotovicová, Dana Adamcová. Testing the biodegradability and biodegradation rates of degradable/biodegradable plastics within simulated environment // Polska Akademia Nauk. Oddział w Krakowie. 2011, pp. 93–101.
- zovaniya [Modern Problems of Science and Education], 2014, no. 6, 250 p. (In Russ.)
6. Annemette Kjeldsen, Marcus Price, Charlotte Lilley, Ewa Guzniczak, Ian Archer. A review of standards for biodegradable plastics. Industrial Biotechnology Innovation Centre, 2017, 33 p.
7. Dr. Rolf-Joachim Miller. Biodegradability of polymers: regulations and methods for testing. Gesellschaft für Biotechnologische Forschung, 2016, 388 p.
8. Ershova O.V., Mullina E.R., Chuprova L.V., Mishurina O.A., Bodyan L.A. Studying the effect of the composition of an inorganic filler on the physical and chemical properties of a polymer composite material. *Fundamentalnye issledovaniya* [Fundamental Research], 2014, no. 12–3, pp. 487–491. (In Russ.)
9. Zakirova A.Sh., Kanarskaya Z.A., Mikhailova O.S., Vasilenko S.V. Biodegradable film materials based on synthetic and microbiologically synthesized polymers. Industrial Biotechnologies, Kazan, 2013, 61 p.
10. Kolyada L.G., Medyanik N.L., Efimov Yu. Yu. Synthesis and research on silver nanoparticles and their possible application in food packaging. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2015, no. 2 (50), pp. 65–69. (In Russ.)
11. Yershova O.V., Chuprova L.V., Mullina E.R., Mishurina O.A., Permyakov M.B. The solution of environmental problems during plastic package recycling. International Journal of Applied Engineering Research, 2015, vol. 10, no. 24, pp. 44896–44899.
12. Mukhametdinova A.A. Determination of destruction of biodegradable polymers. *Aktualnye problemy sovremennoi nauki, tekhniki i obrazovaniya: tezisy докладов 78-i Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Current problems of modern science, technology and education: abstracts of the 78th International Scientific and Technical Conference], 2020, p. 30. (In Russ.)
13. Ershova O.V., Mishurina O.A. Destruction of polymer films modified with oxy biodegradable additive d2W. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* [Advances in Current Natural Sciences], 2016, no. 11–2, pp. 221–225. (In Russ.)
14. Ershova O.V., Chuprova L.V. Solving the problem of polymer material waste disposal. *Fundamentalnye issledovaniya* [Fundamental Research], 2016, no. 11–2, p. 271–275. (In Russ.)
15. Magdalena Vavercová, Jana Kotovicová, Dana Adamcová. Testing the biodegradability and biodegradation rates of degradable/biodegradable plastics within simulated environment. Polska Akademia Nauk. Branch in Krakow. 2011, pp. 93–101.

References

1. Ershova O.V., Bagreeva K.V. Study on physical and mechanical properties of biodegradable and synthetic polymers. *Aktualnye problemy sovremennoi nauki, tekhniki i obrazovaniya: tezisy докладов 79-i Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Current problems of modern science, technology and education: abstracts of the 79th International Scientific and Technical Conference], 2021, vol. 2, 603 p. (In Russ.)
2. Vildanov F.Sh., Latypova F.N., Krasutsky P.A., Chanyshev R.R. Biodegradable polymers: Current state and prospects of use. *Bashkirskii khimicheskii zhurnal* [Bashkir Chemical Journal], 2012, vol. 19, no. 1, pp. 135–139. (In Russ.)
3. Ivanovsky S.K., Bakhaeva A.N. Ecological aspects of the problem of recycling polymer packaging waste and man-made mineral resources. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* [Advances in Current Natural Sciences], 2015, no. 1–5, pp. 813–817. (In Russ.)
4. Adamcová Dana, Vavercová Magdalena, Toman František: Repeated research of biodegradability of plastics materials in real composting conditions. Journal of the University of Agriculture and Silviculturae Mendelianae Brunensis, 2013, LXI, no. 6, pp.1557–1564.
5. Mullina E.R., Mishurina O.A., Chuprova L.V., Ershova O.V. Influence of the chemical nature of sizing components on hydrophilic and hydrophobic properties of cellulose materials. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern Problems of Science and Education], 2014, no. 6, 250 p. (In Russ.)
6. Annemette Kjeldsen, Marcus Price, Charlotte Lilley, Ewa Guzniczak, Ian Archer. A review of standards for biodegradable plastics. Industrial Biotechnology Innovation Centre, 2017, 33 p.
7. Dr. Rolf-Joachim Miller. Biodegradability of polymers: regulations and methods for testing. Gesellschaft für Biotechnologische Forschung, 2016, 388 p.
8. Ershova O.V., Mullina E.R., Chuprova L.V., Mishurina O.A., Bodyan L.A. Studying the effect of the composition of an inorganic filler on the physical and chemical properties of a polymer composite material. *Fundamentalnye issledovaniya* [Fundamental Research], 2014, no. 12–3, pp. 487–491. (In Russ.)
9. Zakirova A.Sh., Kanarskaya Z.A., Mikhailova O.S., Vasilenko S.V. Biodegradable film materials based on synthetic and microbiologically synthesized polymers. Industrial Biotechnologies, Kazan, 2013, 61 p.
10. Kolyada L.G., Medyanik N.L., Efimov Yu. Yu. Synthesis and research on silver nanoparticles and their possible application in food packaging. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2015, no. 2 (50), pp. 65–69. (In Russ.)
11. Yershova O.V., Chuprova L.V., Mullina E.R., Mishurina O.A., Permyakov M.B. The solution of environmental problems during plastic package recycling. International Journal of Applied Engineering Research, 2015, vol. 10, no. 24, pp. 44896–44899.
12. Mukhametdinova A.A. Determination of destruction of biodegradable polymers. *Aktualnye problemy sovremennoi nauki, tekhniki i obrazovaniya: tezisy докладов 78-i Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Current problems of modern science, technology and education: abstracts of the 78th International Scientific and Technical Conference], 2020, p. 30. (In Russ.)
13. Ershova O.V., Mishurina O.A. Destruction of polymer films modified with oxy biodegradable additive d2W. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* [Advances in Current Natural Sciences], 2016, no. 11–2, pp. 221–225. (In Russ.)
14. Ershova O.V., Chuprova L.V. Solving the problem of polymer material waste disposal. *Fundamentalnye issledovaniya* [Fundamental Research], 2016, no. 11–2, p. 271–275. (In Russ.)
15. Magdalena Vavercová, Jana Kotovicová, Dana Adamcová. Testing the biodegradability and biodegradation rates of degradable/biodegradable plastics within simulated environment. Polska Akademia Nauk. Branch in Krakow. 2011, pp. 93–101.

Поступила 25.11.2021; принята к публикации 09.12.2021; опубликована 24.12.2021
Submitted 25/11/2021; revised 09/12/2021; published 24/12/2021

Ершова Ольга Викторовна – кандидат педагогических наук, доцент кафедры химии, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: yershova_mgtu@mail.ru

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

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

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

Багреева Ксения Викторовна – студентка гр.ТТПб-19,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: ksushabagreeva@gmail.com

Olga V. Ershova – PhD (Pedagogy), Associate Professor, Chemistry Department,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: yershova_mgtu@mail.ru

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

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

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

Ksenia V. Bagreeva – student of group TTPb-19,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: ksushabagreeva@gmail.com

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

MATERIALS SCIENCE AND HEAT TREATMENT OF METALS

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

УДК 620.1

DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-4-64-70



ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ 3D-ПЕЧАТИ НА СТРУКТУРУ И ХЛАДОСТОЙКОСТЬ СТАЛИ 08Г2С

Кабалдин Ю.Г., Аносов М.С., Рябов Д.А., Колчин П.В., Шатагин Д.А., Киселев А.В.

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

Аннотация. В настоящей работе проведен комплекс исследований стали 08Г2С, полученной методом 3D-печати электродуговой наплавкой при различных значениях погонной энергии Q . Были выполнены микроструктурные исследования и низкотемпературные испытания на ударный изгиб исследуемой стали после различных режимов наплавления. Установлено, что с увеличением погонной энергии Q процесса 3D-печати наблюдается монотонное увеличение среднего размера зерна металла. Исследование показывает, что в качестве оптимального с точки зрения получения однородной мелкозернистой микроструктуры стали 08Г2С, обеспечивающей высокую хладостойкость, может быть выбран режим 3D-печати с погонной энергией $Q = 425$ Дж/мм. По результатам низкотемпературных испытаний на ударный изгиб стали 08Г2С установлено, что с понижением температуры наблюдается увеличение хрупкой составляющей в изломе и монотонное снижение значений ударной вязкости. Температура вязкохрупкого перехода t_{50} для стали 08Г2С составила -40°C . Также была установлена связь ударной вязкости исследуемого материала со средним размером зерна в широком диапазоне пониженных температур. Проведенная в ходе исследования цифровая обработка изображений микроструктур с использованием разработанного в среде MATLAB программного обеспечения показала, что фрактальная размерность D изображения микроструктуры стали 08Г2С имеет линейную зависимость со средним размером зерна d и может быть использована в качестве количественного показателя для оперативной оценки хладостойкости. С практической стороны полученные в результате работы зависимости могут быть использованы для прогнозирования ударной вязкости и среднего размера зерна низкоуглеродистых марганцовистых сталей в зависимости от режимов 3D-печати.

Ключевые слова: 3D-печать, сталь 08Г2С, структура, ударная вязкость, хладостойкость, фрактальная размерность.

Исследование выполнено при поддержке гранта Президента Российской Федерации МК-370.2021.4 «Оценка хладостойкости и изучение механизмов разрушения металлов, полученных на основе 3D-печати, для обеспечения безопасной эксплуатации технических объектов в условиях Арктики и Крайнего Севера».

© Кабалдин Ю.Г., Аносов М.С., Рябов Д.А., Колчин П.В., Шатагин Д.А., Киселев А.В., 2021

Для цитирования

Исследование влияния режимов 3D-печати на структуру и хладостойкость стали 08Г2С / Кабалдин Ю.Г., Аносов М.С., Рябов Д.А., Колчин П.В., Шатагин Д.А., Киселев А.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №4. С. 64–70. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-4-64-70>



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

STUDY ON THE INFLUENCE OF 3D PRINTING MODES ON THE STRUCTURE AND COLD RESISTANCE OF STEEL GRADE 08G2S

Kabaldin Yu.G., Anosov M.S., Ryabov D.A., Kolchin P.V., Shatagin D.A., Kiselev A.V.

Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. This paper describes a set of studies carried out on steel grade 08G2S produced by 3D printing by electric arc surfacing at various values of heat input Q . The authors performed a microstructure analysis and low-temperature impact bending tests of the steel grade under study after different deposition schedules. It was found that there was a monotonic increase in the average grain size of the steel with an increase in heat input Q of the 3D printing process. The study shows that the 3D printing mode with heat input Q of 425 J/mm can be selected as optimal from the point of view of producing a homogeneous fine-grained microstructure of steel grade 08G2S, providing high cold resistance. According to the results of low-temperature impact bending tests of steel grade 08G2S, there was an increase in a brittle component in the fracture and a monotonic decrease in impact toughness with decreasing temperature. Ductile-brittle transition temperature t_{50} for steel grade 08G2S was -40°C . The authors also found a relationship between impact strength of the material under study and the average grain size in a wide range of low temperatures. The digital processing of microstructure images carried out in the course of the study using software developed in the MATLAB environment showed that fractal dimension D of the microstructure image of steel grade 08G2S had a linear relationship with average grain size d and can be used as a quantitative indicator for a quick assessment of cold resistance. From the practical side, the dependences found as a result of the research can be used to predict impact strength and an average grain size of low-carbon manganese steels depending on 3D printing modes.

Keywords: 3D printing, steel grade 08G2S, structure, impact strength, cold resistance, fractal dimension.

The research was funded by grant of the President of the Russian Federation MK-370.2021.4 "Assessment of cold resistance and study on mechanisms of fracture of metals produced by 3D printing to ensure a safe operation of facilities in the Arctic and the Far North".

For citation

Kabaldin Yu.G., Anosov M.S., Ryabov D.A., Kolchin P.V., Shatagin D.A., Kiselev A.V. Study on the Influence of 3D Printing Modes on the Structure and Cold Resistance of Steel Grade 08G2S. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021, vol. 19, no. 4, pp. 64–70. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-4-64-70>

Введение

В настоящее время все большее количество деталей механизмов и конструкций северного исполнения получают с использованием технологии 3D-печати металлами [1]. Наиболее универсальной и перспективной технологией 3D-печати металлами является электродуговая наплавка. Данная технология позволяет оперативно изготавливать новые детали и восстанавливать изношенные компоненты в непосредственной близости от места, где это необходимо. При этом уменьшается время не только на изготовление, но и на доставку [2].

При выборе материалов для изготовления деталей, длительно работающих в условиях Арктики и Крайнего Севера, возникает необходимость обеспечения мониторинга изменений физико-механических характеристик материала в процессе эксплуатации. Однако такая оценка, особенно при пониженных температурах, является трудо-

емкой, а в ряде случаев практически нереализуемой задачей. Поэтому требуется применение экспресс-методов оценки служебных свойств материала, в частности на основе анализа изображений структур металла.

Наиболее важной характеристикой металла, работающего в условиях пониженных температур, является показатель ударной вязкости, характеризующий работу, затраченную на поглощение энергии удара и отражающий вероятность хрупкого разрушения [3].

Известно, что значения ударной вязкости металлов зависят от размера зерна [4]. В связи с этим ключевой задачей является исследование связи характеристик микроструктуры (размер зерна, фрактальная размерность) полученного металла со значениями ударной вязкости с целью оценки хладостойкости.

В настоящее время для определения среднего размера зерна металла, кроме классических методов (ГОСТ 5639), все чаще применяются подходы

фрактального анализа, основанные на взаимосвязи показателя фрактальной размерности микроструктуры с размером зерна металла [5, 6].

Таким образом, цель настоящего исследования заключается в установлении связи режимов 3D-печати электродуговой наплавкой со структурными и механическими характеристиками материала для прогнозирования его хладостойкости.

Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования выступала марганцовистая хладостойкая сталь 08Г2С. Химический состав стали 08Г2С приведен в табл. 1. Исследуемая сталь получена методом 3D-печати электродугой наплавкой на станке с ЧПУ (рис. 1) в среде защитного газа (CO_2) при различных режимах печати. После 3D-печати, с целью улучшения эксплуатационных характеристик, сталь 08Г2С была подвергнута отжигу (930°C , охлаждение с печью).

Таблица 1. Химический состав исследуемой стали, мас. %

Table 1. Chemical composition of the steel grade under study, wt %

Материал	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	Fe
08Г2С	0,08	0,9	1,9	0,12	0,008	0,12	0,14	0,09	Ост.

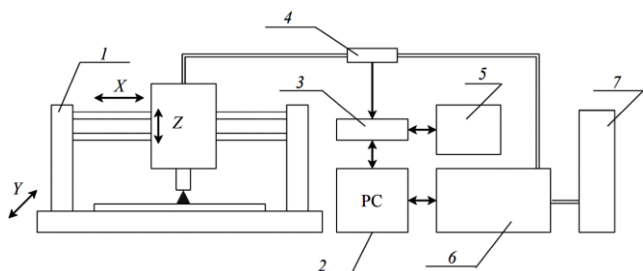


Рис. 1. Экспериментальный стенд по 3D-наплавке на базе станка с ЧПУ: 1 – 3-координатный станок с ЧПУ портального типа; 2 – ПК; 3 – АЦП/ЦАП; 4 – датчики силы тока и напряжения; 5 – система ЧПУ; 6 – сварочный полуавтомат; 7 – баллоны с защитным газом

Fig. 1. 3D surfacing experimental bench based on a CNC machine: 1 is a 3-axis gantry-type CNC machine; 2 is a personal computer; 3 is ADC/DAC; 4 is current and voltage sensors; 5 is a CNC system; 6 is a welding semi-automatic device; 7 is shielding gas cylinders

Режим наплавки задавали с использованием следующих параметров: сила тока I , напряжение U , дуговой зазор z , скорость подачи проволоки V и расход защитного газа. При этом дуговой зазор, скорость подачи проволоки и расход защитного газа был постоянным для всех экспериментов и составляли 11 мм и 350 мм/мин соответственно.

По режимам 3D-печати определялась погонная энергия Q процесса (электрическая энергия, расходуемая на единицу длины шва) как один из комплексных информативных параметров по зависимости согласно ГОСТ Р ИСО 857-1-2009 с учетом коэффициента энергетических потерь 0,8:

$$Q = \frac{0,8 \cdot I \cdot U}{V}.$$

Погонная энергия процесса изменялась в диапазоне от 150 до 1200 Дж/мм, с учетом возможностей стенда.

Для оценки хладостойкости и показателей ударной вязкости стали проводились испытания образцов типа Шарпи на ударный изгиб по ГОСТ 9454 в широком диапазоне пониженных температур. Изготовление образцов на ударный изгиб производилось на том же экспериментальном стенде (см. рис. 1), при этом наплавляющее оборудование заменили на оборудование для последующей механической обработки [7]. Испытания на ударный изгиб проводились на маятниковом копре МК-30А в диапазоне температур $-80 \dots +20^\circ\text{C}$ в соответствии с требованиями ГОСТ 9454. Охлаждение образцов до необходимой температуры осуществлялось в специально разработанной криокамере [8].

Исследование микроструктуры стали проводили на оптическом микроскопе KYENCE-VHX 1000. Размер зерна металла определялся по методике, изложенной в ГОСТ 5639.

Фрактальная размерность D является одним из количественных показателей изображения. На основе показателя фрактальной размерности структуры и (или) изломов материала могут быть выявлены различные его характеристики, в частности ударная вязкость. Согласно методике, описанной авторами [9], определялась фрактальная размерность по изображениям микроструктуры после предварительной обработки с использованием специально разработанного программного обеспечения в среде MATLAB.

Полученные результаты и их обсуждение

Результаты микроструктурного анализа стали 08Г2С, полученной при различных режимах 3D-печати, представлены на рис. 2. Показано, что равномерность распределения и форма ферритных зерен структуры стали 08Г2С значительно зависят от подведенной при наплавлении энергии. Таким образом, наиболее однородной (с точки зрения распределения размеров зерен) и приемлемой (наименьшая анизотропия) структурой обладает материал, полученный при значениях погонной энергии $Q = 425$ Дж/мм.

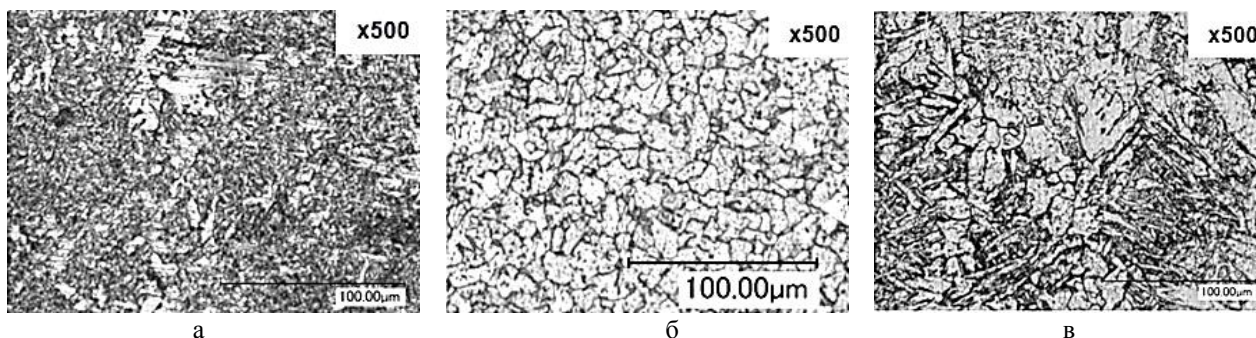


Рис. 2. Микроструктура стали 08Г2С при значениях погонной энергии: а – 190 Дж/мм; б – 425 Дж/мм; в – 475 Дж/мм

Fig. 2. Microstructure of steel grade 08G2S at heat input values: а is 190 J/mm; б is 425 J/mm; в is 475 J/mm

На основании микроструктурного анализа и рассчитанного среднего размера зерна структуры стали 08Г2С получена зависимость среднего размера зерна d от погонной энергии процесса 3D-печати Q , показанная на рис. 3.

Как видно из рис. 3, полученные данные хорошо аппроксимируются линейной зависимостью с величиной достоверности $R^2=0,95$. Данная зависимость дает возможность прогнозировать размер зерна стали 08Г2С в зависимости от режимов 3D-печати и хорошо согласуется с результатами исследований в процессе сварки стали 09Г2С [10].

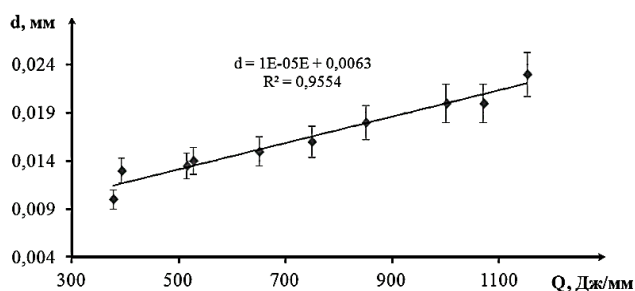


Рис. 3. Зависимость среднего размера зерна d от погонной энергии Q процесса 3D-печати электродуговой наплавкой

Fig. 3. Dependence of average grain size d on heat input Q of the 3D printing process with electric arc surfacing

Известно, что понижение среднего размера зерна металла приводит к росту механических свойств, включая показатели ударной вязкости [11, 12]. По результатам микроструктурных исследований (см. рис. 2) установлено, что при погонной энергии) ниже 190 Дж/мм наблюдаются дефекты структуры в виде пор и не расплавившейся проволоки. В связи с этим в качестве оптимального режима печати выбран режим с погонной энергией $Q = 425$ Дж/мм, обеспечивающий однородную структуру стали 08Г2С, без дефектов и с малым средним размером зерна.

В результате испытаний на ударный изгиб получены данные по ударной вязкости и механизмам разрушения стали 08Г2С, наплавленной при оптимальном режиме 3D-печати (табл. 2).

Таблица 2. Результаты испытаний на ударный изгиб стали 08Г2С (при величине погонной энергии $Q = 425$ Дж/мм)

T a b l e 2. Impact bending test of steel grade 08G2S (with heat input $Q = 425$ J/mm)

Температура испытания $t, ^\circ\text{C}$	Ударная вязкость KCV, Дж/см ²	Механизм (характер) разрушения
+20	105	В
0	100	С (80%)
-20	90	С (65%)
-40	66	С (50%) – T_{50}
-60	46	С (15%)
-80	22	Х

Примечание. В – полностью вязкий (волокнустый) излом; Х – полностью хрупкий излом (преимущественно скол и фасетки скола); С – смешанный излом (% вязкой составляющей в изломе)

Как видно из полученных данных (см. табл. 2), с понижением температуры испытания наблюдается снижение ударной вязкости и монотонное увеличение хрупкой составляющей в изломе. Так, при температуре $t = -40^\circ\text{C}$, вблизи которой наблюдается вязкохрупкий переход (t_{50}), происходит значительное снижение ударной вязкости, в связи с этим эксплуатация конструкций из исследуемого металла при данных температурах небезопасна и значительно увеличивает вероятность хрупкого разрушения.

Также по результатам испытаний на ударный изгиб были получены значения ударной вязкости и при других значениях погонной энергии. По полученным статистическим данным построена зависимость ударной вязкости от среднего разме-

ра зерна при температурах $t = +20^{\circ}\text{C}$ и температуре вязкохрупкого перехода $t_{50} = -40^{\circ}\text{C}$. Полученные зависимости отображены на **рис. 4**.

Полученные зависимости ударной вязкости от величины зерна подтверждают их связь и схожи с результатами проведенных ранее исследований [11, 12].

По результатам предварительной обработки (показаны на 4-х этапах на **рис. 5**) изображений микроструктур получена линейная зависимость фрактальной размерности изображения D от средней величины зерна стали 08Г2С (**рис. 6**), что согласуется с результатами исследований других авторов [5, 6].

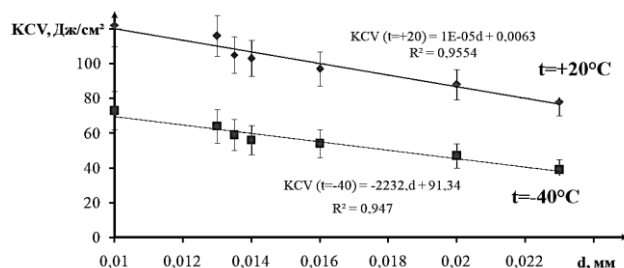


Рис. 4. Зависимость ударной вязкости стали 08Г2С от средней величины зерна

Fig. 4. Dependence of impact toughness of steel grade 08G2S on the average grain size

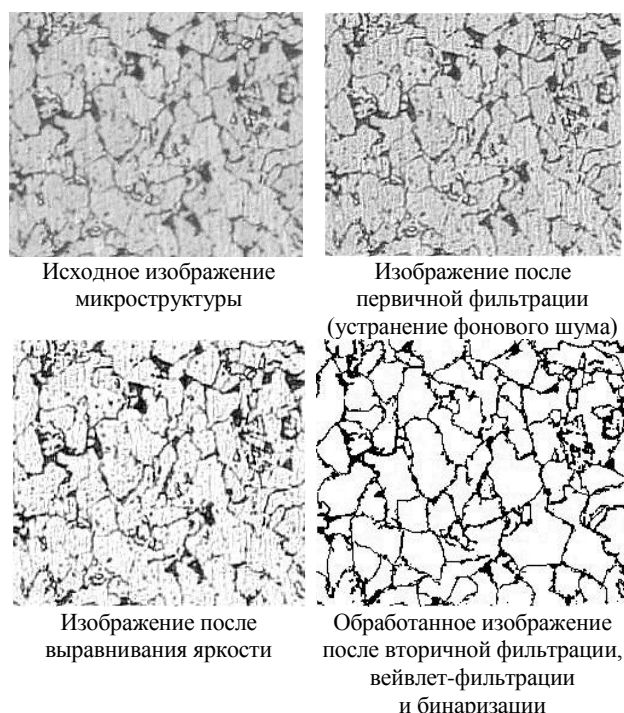


Рис. 5. Предварительная обработка изображений микроструктур

Fig. 5. Pre-processing of microstructure images

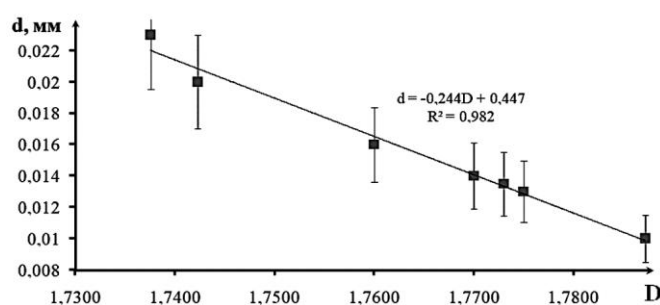


Рис. 6. Зависимость фрактальной размерности изображения микроструктуры стали 09Г2С от средней величины зерна

Fig. 6. Dependence of the fractal dimension of the microstructure image of steel grade 09G2S on the average grain size

Закключение

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Между погонной энергией процесса 3D-печати Q и величиной зерна стали 08Г2С имеется линейная зависимость. Показано, что при увеличении погонной энергии 3D-печати электродуговой наплавкой наблюдается монотонное увеличение размера зерна.

2. Установлено, что при значениях погонной энергии ниже 190 Дж/мм наблюдаются дефекты структуры металла (поры и элементы нерасплавившейся проволоки).

3. Оптимальным режимом 3D-печати электродуговой наплавкой стали 08Г2С является режим с погонной энергией $Q = 425$ Дж/мм, обеспечивающий однородную структуру стали 08Г2С. При таком режиме формируется мелкая зернистая структура с отсутствием макродефектов.

4. Показана связь ударной вязкости с величиной зерна для стали 08Г2С, позволяющая прогнозировать ударную вязкость металла без проведения испытаний на ударный изгиб с высокой степенью достоверности.

5. Для экспресс-прогнозирования хладостойкости стали 08Г2С может быть использован подход фрактального анализа изображения микроструктуры материала.

Список литературы

1. Елистратова А.А., Коршакевич И.С. Технологии 3D-печати: преимущества и недостатки // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2015. Т. 1. С. 557–559.
2. Comparison and analysis of different 3D printing techniques. International Journal of Latest Trends in Engi-

neering and Technology. Vol. (8). Issue (4–1), pp. 264–272. DOI:10.21172/1.841.44

3. Tong L. Low temperature impact toughness of high strength structural steel / L. Tong, L. Niu, S.Jing, L. Ai, X. Zhao // *Thin-Walled Structures*. 2018. Is. 132. pp. 410–420. DOI: 10.1016/j.tws.2018.09.009
4. Khlybov A.A. et al. The effect of low temperatures on the operability of products 20GL steel. 2020 J. Phys.: Conf. Ser. 1431 012063. DOI:10.1088/1742-6596/1431/1/012063
5. Шахов В. Н., Богданов В. В. Оценка балла зерна методом фрактального анализа // *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*. 2014. №10. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-balla-zerna-metodom-fraktalnogo-analiza> (дата обращения: 27.07.2021).
6. Малых М.В., Собко С.А., Титова О.В. Применение фрактального анализа для определения размера зерна деформированных материалов. URL: <https://www.sphti.ru/wp-content/uploads> (дата обращения: 27.07.2021).
7. Kabaldin Yu. G. Diagnostics of 3D printing on a CNC machine by machine learning / Yu.G. Kabaldin, D.A. Shatagin, M.S. Anosov, P.V. Kolchin, A.V. Kiselev // *Russian Engineering Research*. 2021, vol. 41, № 4, pp. 320–324.
8. Проблемы обеспечения безопасной эксплуатации тележек грузовых вагонов при отрицательных температурах / А.А. Хлыбов, Ю.Г. Кабалдин, М.С. Аносов, Д.А. Рябов, В.И. Сентюрева // *Вестник ИжГТУ им. М.Т. Калашникова*. 2019. Т. 22, № 4. С. 18–26. DOI: 10.22213/2413-1172-2019-4-18-26
9. Kabaldin Yu.G., Anosov M.S., Shatagin D.A. Evaluation of the mechanism of the destruction of metals based on approaches of artificial intelligence and fractal analysis. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 709 (2020) 033076 IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/709/3/033076
10. Полетаев Ю.В. Однопроходная электродуговая сварка под тонким слоем шлака толстолистовых конструкций стали 09Г2С / Ю.В. Полетаев, В.Ю. Полетаев // *Вестник Дон. гос. техн. ун-та*. 2018. Т. 18, № 1. С. 50–58.
11. Узлов И.Г. Влияние параметров микроструктуры колесной стали на её вязкие свойства / И.Г. Узлов, А.И. Бабченко, Ж.А. Дементьева, А.А. Кононенко, А.Л. Сафронов // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: сб. науч. тр. Днепропетровск.: ИЧМ НАН Украины*, 2007. Вип. 14. С. 202–210.
12. Топоров Г.В., Смокотин Г.Я. Влияние величины зерна на ударно-усталостную стойкость стали 45 // *Известия Томского политехнического института [Известия ТПИ]*. 1958. Т. 106: Бурильные машины. С. 153–164.

References

1. Elistratova A.A., Korshakevich I.S. 3D printing technologies: advantages and disadvantages. *Aktualnye problemy aviatsii i kosmonavтики* [Current problems of aviation and cosmonautics], 2015, vol. 1, pp. 557–559. (In Russ.)
2. Comparison and analysis of different 3D printing techniques. *International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology*. 2017, vol. (8), issue (4–1), pp. 264–272. DOI:10.21172/1.841.44
3. Tong L., Niu L., Jing S., Ai L., Zhao X. Low temperature impact toughness of high strength structural steel. *Thin-Walled Structures*. 2018, issue 132, pp. 410–420. DOI: 10.1016/j.tws.2018.09.009
4. Khlybov A.A. et al. The effect of low temperatures on the operability of products 20GL steel. 2020 J. Phys.: Conf. Ser. 1431 012063. DOI:10.1088/1742-6596/1431/1/012063
5. Shakhov V.N., Bogdanov V.V. Evaluation of grain points by a fractal analysis method. *Aktualnye problemy aviatsii i kosmonavтики* [Current problems of aviation and cosmonautics], 2014, no. 10. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-balla-zerna-metodom-fraktalnogo-analiza> (Accessed on July 27, 2021).
6. Malykh M.V., Sobko S.A., Titova O.V. Application of a fractal analysis to determine the grain size of deformed materials. Available at: <https://www.sphti.ru/wp-content/uploads> (Accessed on July 27, 2021).
7. Kabaldin Yu.G., Shatagin D.A., Anosov M.S., Kolchin P.V., Kiselev A.V. Diagnostics of 3D printing on a CNC machine by machine learning. *Russian Engineering Research*, 2021, vol. 41, no. 4, pp. 320–324.
8. Khlybov A.A., Kabaldin Yu.G., Anosov M.S., Ryabov D.A., Sentyureva V.I. Problems of ensuring a safe operation of freight car bogies at negative temperatures. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova* [Bulletin of Kalashnikov ISTU], 2019, vol. 22, no. 4, pp. 18–26. DOI: 10.22213 / 2413-1172-2019-4-18-26
9. Kabaldin Yu.G., Anosov M.S., Shatagin D.A. Evaluation of the mechanism of the destruction of metals based on approaches of artificial intelligence and fractal analysis. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 709 (2020) 033076 IOP Publishing. doi:10.1088/1757-899X/709/3/033076
10. Poletaev Yu.V., Poletaev V.Yu. Single-pass electric arc welding under a thin layer of slag of thick-sheet structures of 09G2S steel. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo univetsiteta* [Bulletin of Don State Technical University], 2018, vol. 18, no. 1, pp. 50–58. (In Russ.)
11. Uzlov I.G., Babchenko A.I., Dementyeva Zh.A., Kononenko A.A., Safronov A.L. Influence of microstructure parameters of wheel steel on its ductility properties.

Fundamentalnye i prikladnye problemy chernoy metallurgii: sb. nauch. tr. [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy: Collection of research papers]. Dnipropetrovsk: IFM NAS of Ukraine, 2007, no. 14, pp. 202–210. (In Russ.)

12. Toporov G.V., Smokotin G.Ya. Influence of a grain size on impact-fatigue resistance of steel 45. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo instituta* [Bulletin of Tomsk Polytechnic Institute], 1958, vol. 106: Drilling machines, pp. 153–164. (In Russ.)

Поступила 23.08.2021; принята к публикации 07.10.2021; опубликована 24.12.2021
Submitted 23/08/2021; revised 07/10/2021; published 24/12/2021

Кабалдин Юрий Георгиевич – доктор технических наук, профессор, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия. Email: uru.40@mail.ru. ORCID 0000-0003-4300-6659

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

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

Колчин Павел Владимирович – аспирант, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия. Email: posledny@mail.ru. ORCID 0000-0002-2875-7377

Шатагин Дмитрий Александрович – кандидат технических наук, доцент, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия. Email: dmitsanych@gmail.com. ORCID 0000-0003-1293-4487

Киселев Андрей Викторович – аспирант, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия. Email: andrey.ak93@yandex.ru. ORCID 0000-0003-3710-1609

Yury G. Kabaldin – DrSc (Eng.), Professor, Alexeev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia. Email: uru.40@mail.ru. ORCID 0000-0003-4300-6659

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

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

Pavel V. Kolchin – postgraduate student, Alexeev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia. Email: posledny@mail.ru. ORCID 0000-0002-2875-7377

Dmitry A. Shatagin – PhD (Eng.), Associate Professor, Alexeev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia. Email: dmitsanych@gmail.com. ORCID 0000-0003-1293-4487

Andrey V. Kiselev – postgraduate student, Alexeev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia. Email: andrey.ak93@yandex.ru. ORCID 0000-0003-3710-1609

НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

NANOMATERIALS AND NANOTECHNOLOGIES

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

УДК 621.396.6

DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-4-71-81



КОМПОЗИЦИОННЫЙ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЙ МАТЕРИАЛ МУНТ/ПОЛИУРЕТАН ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Щегольков А.В.¹, Щегольков А.В.¹, Комаров Ф.Ф.², Парфимович Д.И.²

¹Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия

²НиУ «Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко», Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Интенсивное распространение систем сотовой связи, а также появление новых технологий передачи информации, таких как 4G и 5G и формирование разветвленной системы высоковольтных линий электропередач привело к увеличению электромагнитного излучения в окружающую среду. Для минимизации воздействия электромагнитного излучения могут быть использованы материалы, способные поглощать или отражать его. В работе представлены исследования морфологии и свойств взаимодействия нанокomпозиционных материалов на основе полиуретана и многослойных углеродных нанотрубок (МУНТ) с электромагнитным излучением (ЭМИ). Проведены исследования полиуретана с МУНТ в диапазоне массовых концентраций от 0,5 до 8 мас.%. Для определения оптических характеристик композитных материалов в СВЧ-диапазоне (эффектов пропускания, отражения и поглощения электромагнитного излучения) использован скалярный анализатор цепей, построенный на основе генератора качающейся частоты, волноводного измерительного тракта, блока анализатора и системы обработки сигналов. Проведенные исследования показали, что для композитов на основе полиуретана с массовой концентрацией МУНТ 2 и 4 мас.% характерны наибольшие коэффициенты поглощения от ~ 55 до ~ 62% ЭМИ в диапазоне частот от 9,5 до 12 ГГц. Выявлено, что для полиуретана с массовой концентрацией МУНТ равной 8 мас.% следует незначительное изменение коэффициента поглощения от ~ 37 до ~ 42%. Повышение концентрации МУНТ в полиуретане до 4 мас.% приводит к появлению на верхней стороне образца включений МУНТ. Максимальная концентрация МУНТ 8 мас.% приводит к тому, что верхняя сторона образца получается неоднородной – с развитой поверхностью, большая часть которой занята сгустками МУНТ. Все композиты показали немонотонное падение коэффициента отражения и рост коэффициента поглощения с возрастанием частоты измерения.

Ключевые слова: многослойные углеродные нанотрубки, модификация, эластомеры, полиуретан, электромагнитное излучение, поверхностно-активные вещества, просвечивающая электронная микроскопия.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта N 18-53-00032 Бел_а.

© Щегольков А.В., Щегольков А.В., Комаров Ф.Ф., Парфимович Д.И., 2021

Для цитирования

Композиционный наноструктурированный материал МУНТ/полиуретан для защиты от электромагнитных излучений / Щегольков А.В., Щегольков А.В., Комаров Ф.Ф., Парфимович Д.И. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №4. С. 71–81. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-4-71-81>



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

COMPOSITE NANOSTRUCTURED MWCNT/POLYURETHANE MATERIAL FOR PROTECTION AGAINST ELECTROMAGNETIC RADIATION

Shchegolkov A.V., Shchegolkov A.V., Komarov F.F., Parfimovich D.I.

Tambov State Technical University, Tambov, Russia

Abstract. An active distribution of cellular systems, new data transfer technologies, such as 4G and 5G, and a distributed system of high-voltage electric transmission lines have resulted in an increase in electromagnetic radiation to environment. To minimize effect of electromagnetic radiation, we may use materials capable of absorbing or reflecting it. The paper presents studies on the morphology and properties of the interaction between nanocomposite materials based on polyurethane and multiwall carbon nanotubes (MWCNTs) with electromagnetic radiation (EMR). The authors studied polyurethane with MWCNT within a range of mass concentration from 0.5 to 8% by weight. To determine optical characteristics of composite materials within a microwave range (effects of electromagnetic radiation transmission, reflection and absorption), the authors used a scalar network analyzer built on a sweep generator, a waveguide slotted line, a block of an analyzer and a signal processing system. The research conducted showed that the composites based on polyurethane with 2 and 4% by weight of MWCNT were characterized by the highest absorption coefficients, namely from ~ 55 to ~ 62% of EMR in the frequency range from 9.5 to 12 GHz. It was revealed that polyurethane with 8 % by weight of MWCNT showed a slight change in the absorption coefficient from ~ 37 to ~ 42%. An increase in the concentration of MWCNT in polyurethane to 4% by weight results in forming inclusions of MWCNT on the upper side of the sample. Maximum concentration of MWCNT, amounting to 8% by weight, results in non-uniformity of the upper side of the sample with a developed surface, which is mostly covered with agglomerations of MWCNT. All the composites showed a non-monotonic decrease in the reflection coefficient and an increase in the absorption coefficient with increasing measuring frequency.

Keywords: multiwall carbon nanotubes, modification, elastomers, polyurethane, electromagnetic radiation, surfactants, transmission electron microscopy.

The research was funded by the Russian Foundation for Basic Research as part of research project N 18-53-00032 Bel_a.

For citation

Shchegolkov A.V., Shchegolkov A.V., Komarov F.F., Parfimovich D.I. Composite Nanostructured MWCNT/Polyurethane Material for Protection Against Electromagnetic Radiation. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021, vol. 19, no. 4, pp. 71–81. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-4-71-81>

Введение

Эффективное экранирование от ЭМИ может быть обеспечено углеродно-полимерными нанокompозитами [1, 2]. Для углеродно-полимерных нанокompозитов характерно формирование развитых электропроводящих сетей при низких концентрациях проводящего наполнителя [3]. Можно выделить три возможных направления получения углеродно-полимерных нанокompозитов, которые включают в себя использование пенополимеров и угольных пен [4], гибридных наполнителей на углеродной основе [5], а также формирование сегрегированных структур в проводящем полимерном композите [4]. В качестве электропроводящих добавок в полимерные композиты могут быть использованы разнообразные углеродные матери-

алы, такие как технический углерод [6], графен [7] и углеродных нанотрубки (УНТ) [8–10].

Важным направлением формирования эффективных ЭМИ является использование гибридных нанокompозитов, так как улучшение свойств материала может быть обеспечено синергетическим эффектом наполнителей. Примером эффективности гибридных нанокompозитов является проводящий гибридный материал на основе полиуретана. В состав гибрида входили гибридные графеновые нанопластины и УНТ с содержанием от 0 до 10 мас.%. Благодаря синергетическому взаимодействию двух видов нанонаполнителей электрическая проводимость составила $\sim 10^{-2}$ См/см, что было достигнуто за счет образования проводящей сетки из УНТ, перекрывающей промежутки между графеновыми нанопластинка-

ми по всей электроизолирующей полиуретановой (ПУ) матрице. Гибридные наноккомпозиты позволяют снизить ЭМИ на 47 дБ в Ку-диапазоне для матрицы с гибридграфеновыми нанопластинками и УНТ с массовой концентрацией 10 мас. %. [5]

В работе [7] описана теория эффективной среды, которая показывает, что аспектное отношение графена и межфазная связь с полимером играют решающую роль в результирующих электрических/диэлектрических свойствах материалов для защиты от ЭМИ. Универсальная природа графена и композитов позволяет создавать материалы с регулируемыми свойствами, адаптированными к конкретным техническим задачам.

Для модификации полиуретановой матрицы могут быть использованы графеновые нанолиты (GNS) [8], обернутые меламиновой пеной (MF) (GNSs @ MF). Полиуретановый наноккомпозит модифицированный GNSs @ MF (TPU-GNSs @ MF) обладает высокой электропроводностью 45,2 См/м при значении эффективности экранирования от ЭМИ на уровне 35,6 дБ в X-диапазоне и объемной концентрации GNS, равной 2,01 об.%, с толщиной композитов 2 мм.

Важную роль в создании материалов для защиты от ЭМИ играют УНТ, которые могут быть дополнены серебряными фрактальными дендритами (AgFD) [9], что позволяет в полиуретановой матрице по технологии послойного нанесения с сушкой вымораживанием сформировать электропроводящие градиентные слои. Между тем электропроводящие градиентные слои УНТ и термопластичного полиуретана (ТПУ), полученные послойным методом, значительно уменьшают отражение электромагнитных волн и удлиняют пути их рассеяния, что при толщине композита равной 3,4 мм обеспечивает экранирование на уровне 88 дБ и объемной концентрации AgFD 0,103 об.% в полиуретане. Кроме того, благодаря направленному замораживанию композитные пенопласты демонстрируют хорошее восстановление свойств после циклического сжатия.

Улучшение свойств УНТ при совмещении с наночастицами Ag показано в работе [11]. Трехмерный проводящий каркас на основе губки из УНТ был декорирован наночастицами Ag. Гибкие композиты Ag/УНТ/PDMS демонстрируют высокие и регулируемые характеристики защиты от ЭМИ с улучшенной механической прочностью и высокой проводимостью. Экранирование ЭМИ находится на уровне 90 дБ в X-диапазоне (8–12 ГГц) при концентрации Ag (3 мас.%) и УНТ (4 мас.%). Это связано с тем, что трехмер-

ная структура взаимосвязанных пор позволяет ЭМИ многократно отражаться внутри гибридов Ag/УНТ, что приводит к сильной абсорбционной способности.

УНТ способны образовывать взаимосвязанные электропроводящие сети в полимерной матрице при условии применения различных типов УНТ. В работе [10] разработаны композиты на основе ТПУ и УНТ на основе метода смешивания в растворе с разделением фаз. Композит с УНТ большой длины (10 мас.%) обеспечивает экранирование от ЭМИ 42,5 дБ и удельную электропроводность $1,9 \cdot 10^{-3}$ См/см, тогда как композит с короткими УНТ показал теплопроводность на уровне 0,51 Вт/м·К, что на 145% выше по сравнению с чистым термопластичным полиуретаном.

В работе [12] было проанализировано влияние координационных соединений переходных металлов (Fe (III+) или Cr (III+)) на характеристики защиты от ЭМИ и проницаемость для парамагнитного зонда из полимерных композитов на основе сшитого полиуретана и смеси несовместимых полимеров (semi-IPN на основе сшитого полиуретана и линейного поли(метилметакрилата), заполненных электропроводящими и магнитными частицами. Сшитые композиты – полиуретан/УНТ, смесь полимеров/УНТ и полимеров/УНТ/никель с массовой концентрацией проводящих наполнителей от 1,5 до 3 мас.% – были модифицированы координационными соединениями, обладающими различной комплексобразующей способностью – Fe (III+) или Cr (III+). Авторами исследований было показано, что противоположное влияние комплексов Fe (III+) и Cr(III+) на фазовое разделение в полимерной смеси позволяет регулировать уровень многократного отражения электромагнитной волны на межфазных границах в полимерах, содержащих проводящие структуры. Эффективность экранирования хромофицированного композита в диапазоне частот (25,8–37,5) ГГц составила 25 дБ.

УНТ могут быть использованы для создания иерархической структуры в полимерной матрице, с помощью которой возможно реализовать широкополосное электромагнитное экранирование [13]. На свойства УНТ влияет тип катализатора, на основе которого осуществляется синтез МУНТ [14], а также предварительная механическая обработка с применением аппарата вихревого слоя [15] и применение функционализации МУНТ с помощью поверхностно активных веществ (ПАВ) [16].

Для получения нанокомпозитов может быть использована технология электростатического напыления [17]. Наибольшее распространение получила технология ультразвукового (УЗ) распределения МУНТ в полимерных матрицах [18, 19]. Ультразвук может быть использован без растворителя в полимере [18] и с применением растворителя [19]. С целью создания материала для защиты от ЭМИ может быть использовано одновременное перемешивание и воздействие УЗ [20]. При формировании сложных композитных материалов [21] установлено, что способ диспергирования магнитопроводящего наполнителя с помощью УЗ-обработки дает лучшую проводящую и экранирующую эффективность по сравнению с методом механической гомогенизации из-за лучшего распутия УНТ.

Существующие материалы для защиты от ЭМИ на данный момент не решают всех представленных проблем единым образом, для каждой задачи электромагнитного экранирования необходимо использование конкретного набора характеристик проводящих добавок, а также диэлектрических свойств полимерных матриц.

За счет использования в материалах для защиты от ЭМИ многосоставных компонентов, возможно варьировать составом и размерами покрытия, что позволяет решать широкий комплекс задач, связанных с созданием эффективных материалов для защиты от ЭМИ.

Целью работы является повышение эффективности материалов для защиты от ЭМИ путем подбора концентрации углеродных нанотрубок в полиуретане. В соответствии с целью были поставлены следующие задачи:

- 1) исследовать влияние массовой концентрации МУНТ в полиуретановой матрице на свойства поглощения, отражения и пропускания ЭМИ;
- 2) исследовать морфологические свойства полиуретана модифицированного МУНТ с различной концентрацией с помощью оптической микроскопии.

Материалы и методы

В качестве полиуретановой матрицы для создания нанокомпозита с углеродными нанотрубками использован двухкомпонентный полиуретановый компаунд «Адваформ Марка 40» (ТУ 2257-159-22736960-2013). Компаунды «Адваформ» – не вспененные, похожие на резину полиуретаны без наполнителей, затвердевающие при комнатной или повышенной до 50–70°C

температуре, которые получают при смешивании двух компонентов (компоненты А и Б) в определенных пропорциях. Компонент А – это смесь полифункциональных гидроксилсодержащих продуктов (полиолов или полиэфиров). Компонент Б представляет собой полиизоцианат – соединение, содержащее высокореакционные изоцианатные группы ($-N=C=O$). В соответствии с ТУ время от начала смешивания до потери текучести композиции компаунда «Адваформ Марка 40» составляет около 20 мин.

Синтез МУНТ осуществлялся методом CVD с применением катализатора Co-Mo/ Al_2O_3 -MgO и газовой пропан-бутановой смеси. Для распределения МУНТ в полиуретане (жидкое состояние) и предотвращения возможного образования агломератов использовался ультразвуковой диспергатор UP 400 St (Hielscher Ultrasonics GmbH, Германия) мощностью 400 Вт и частотой излучения 24 кГц. При этом МУНТ вводили в жидкий двухкомпонентный полиуретан по методике, которая включала в себя следующие стадии:

- подготовка исходного полиуретана с компонентами в жидкой фазе А и Б (компонент А/компонент Б = 1/1,5; общий объем смешиваемых компонентов составлял ≈ 25 мл);
- расчёт массы МУНТ по отношению к массе полиуретана проведен по выражению

$$M_{\text{ПУ-УНТ}} = \frac{(M_{\text{ПУ}} \cdot C_{\text{УНТ}})}{(100 \text{ мас.}\% - C_{\text{УНТ}})}, \quad (1)$$

где $M_{\text{ПУ-УНТ}}$ – масса УНТ и ПУ, кг; $M_{\text{ПУ}}$ – масса полиуретанового образца (Компонент А + Компонент Б), кг; $C_{\text{УНТ}}$ – массовая концентрация МУНТ в случае исследований поглощения ЭМИ в диапазоне 8–12 ГГц, концентрация МУНТ по отношению к чистому исходному полиуретану в мас.% рассчитывалась кратно в ряду: 0,5; 1; 2; 4; 8;

- засыпка МУНТ в компонент А при механическом перемешивании;
- в компонент полиуретана А с МУНТ добавлялся компонент Б так, чтобы соотношение объемов компонента А (без учета УНТ) и компонента Б составляло $\approx 1/1,5$;
- полимеризация полиуретана с МУНТ при температуре $(70 \pm 5)^\circ\text{C}$ составляла 10 ч.

Для оценки возможности повышения однородности диспергирования МУНТ был изготовлен набор из двух образцов полиуретана с концентрацией 4 и 6 мас.% МУНТ. В этих образцах

МУНТ перед смешиванием с компонентом А растворялся в ацетоне. Раствор МУНТ в ацетоне обрабатывали ультразвуком в течение 10 мин, чтобы разбить агломераты МУНТ, а затем оставляли на воздухе до тех пор, пока весь ацетон не испарялся. После этого МУНТ диспергировались в компоненте А, смешивались с компонентом Б и выдерживались при $70 \pm 5^\circ\text{C}$ в течение 4 часов для проведения полимеризации.

Для исследования морфологии поверхности полученных нанокомпозитов и оценки степени однородности распределения МУНТ в полимере использовался оптический бинокулярный микроскоп Nikon Eclipse LV 150 (Япония). Просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ) МУНТ была проведена с помощью электронного микроскопа «Hitachi H-800» (Hitachi, Япония).

Для определения оптических характеристик композитных материалов в СВЧ-диапазоне (эффектов пропускания, отражения и поглощения электромагнитного излучения) использован скалярный анализатор цепей, построенный на основе генератора качающейся частоты, волноводного измерительного тракта, блока анализатора и системы обработки сигналов. Измерения проводились в диапазоне частот 8–12 ГГц. Образцы композитов формовались в форме параллелепипеда с длиной, шириной и высотой $23 \times 10 \times 5$ мм, что соответствует размерам волноводного тракта.

Результаты и их анализ

На **рис. 1** представлено ПЭМ-изображение МУНТ, синтезированных на катализаторе Co-Mo/Al₂O₃-MgO.

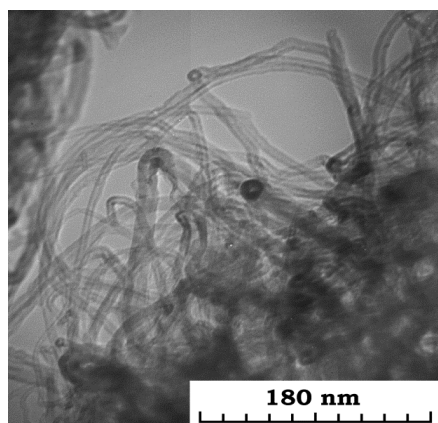


Рис. 1. ПЭМ-изображение МУНТ, синтезированных на катализаторе Co-Mo/Al₂O₃-MgO

Fig. 1. TEM image of MWCNTs synthesized on the Co-Mo/Al₂O₃-MgO catalyst

Из анализа **рис. 1** следует, что отдельные УНТ имеют разброс по диаметру, который укладывается в диапазон от 40 до 70 нм. УНТ имеют многочисленные места излома, перегиба, с различными радиусами скругления. УНТ переплетаются между собой, формируя развитую электро- и теплопроводящую сеть.

На **рис. 2** приведены оптические микрофотографии поверхности исходного полиуретана.

На **рис. 3** приведены оптические микрофотографии поверхности исходного полиуретана с различным содержанием МУНТ 0,5 мас. %.

На **рис. 4** приведены оптические микрофотографии поверхности полиуретана с различным содержанием 1 мас. % МУНТ.

На **рис. 5** приведены оптические микрофотографии поверхности полиуретана с содержанием 4 мас. % МУНТ.

На **рис. 6** приведены оптические микрофотографии поверхности полиуретана с различным содержанием 8 мас. % МУНТ.

Из визуального анализа **рис. 2–6** следует, что исходный полиуретановый компаунд характеризуется гладкой поверхностью с одиночными крупными порами. Нижняя сторона образца повторяет рельеф поверхности, которая являлась удерживающей при полимеризации. Массовая концентрация МУНТ 0,5 и 1 мас. % (см. **рис. 3** и **4**) в полиуретане не приводит к заметным изменениям морфологии верхней стороны образцов, однако на нижней стороне наблюдаются сгустки МУНТ. Увеличение массовой концентрации МУНТ в полимерном композите до 4% (см. **рис. 5**) приводит к появлению на верхней и нижней стороне образца включений МУНТ и при этом нижняя сторона получается более насыщенной МУНТ, что связано с оседанием МУНТ в стадиях до полимеризации. Для полиуретанового композита с максимальной массовой концентрацией 8 мас. % МУНТ (см. **рис. 6**) верхняя сторона образца получается неоднородной, с развитой поверхностью, большая часть которой плотно заполнена сгустками и агломератами МУНТ. Нижняя сторона композита, напротив, относительно однородная, на отдельных участках наблюдаются поры неправильной формы (см. **рис. 6, в**).

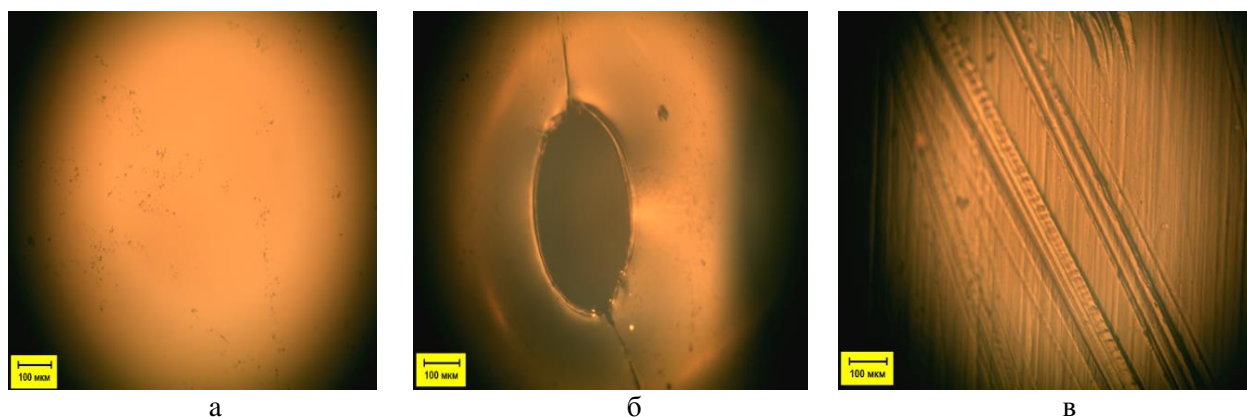


Рис. 2. Оптические микрофотографии исходного полиуретана (без добавления МУНТ): а и б – верхняя сторона образца (на в показан участок поверхности с порой); в – нижняя сторона образца
Fig. 2. Optical micrographs of the original polyurethane (without MWCNTs): a and б are the upper side of the sample (v shows a surface area with a pore); в is the lower side of the sample

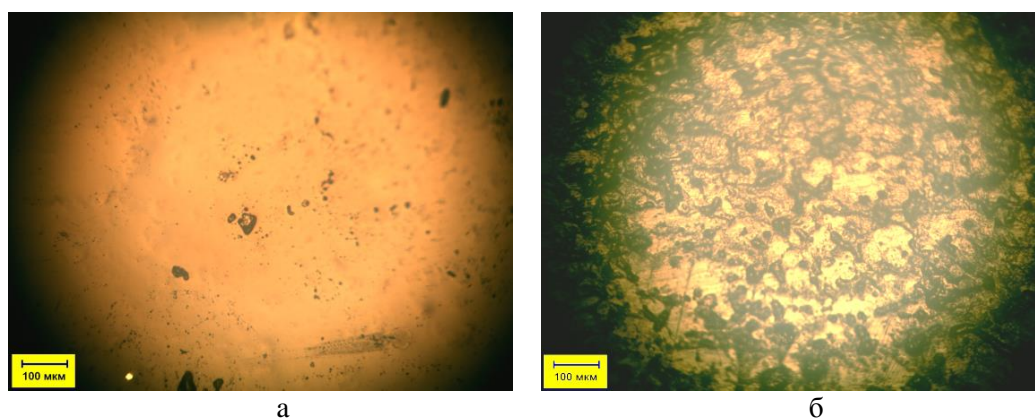


Рис. 3. Оптические микрофотографии полиуретана с 0,5 мас.% МУНТ: а – верхняя сторона образца; б – нижняя сторона образца
Fig. 3. Optical micrographs of polyurethane with 0.5 wt% MWCNT: upper (a) and lower (б) sides of the sample

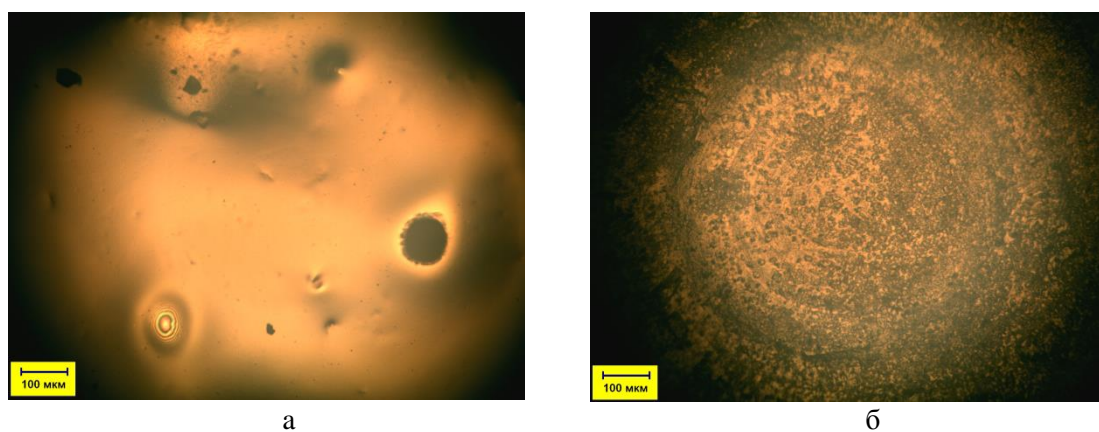
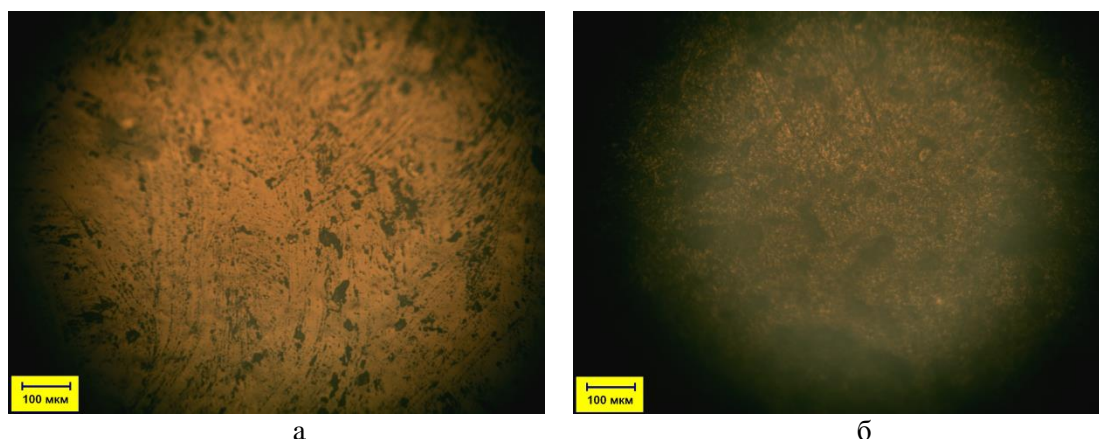


Рис. 4. Оптические микрофотографии полиуретана с 1 мас.% МУНТ: а – верхняя сторона образца; б – нижняя сторона образца
Fig. 4. Optical micrographs of polyurethane with 1 wt% MWCNT: upper (a) and lower (б) sides of the sample

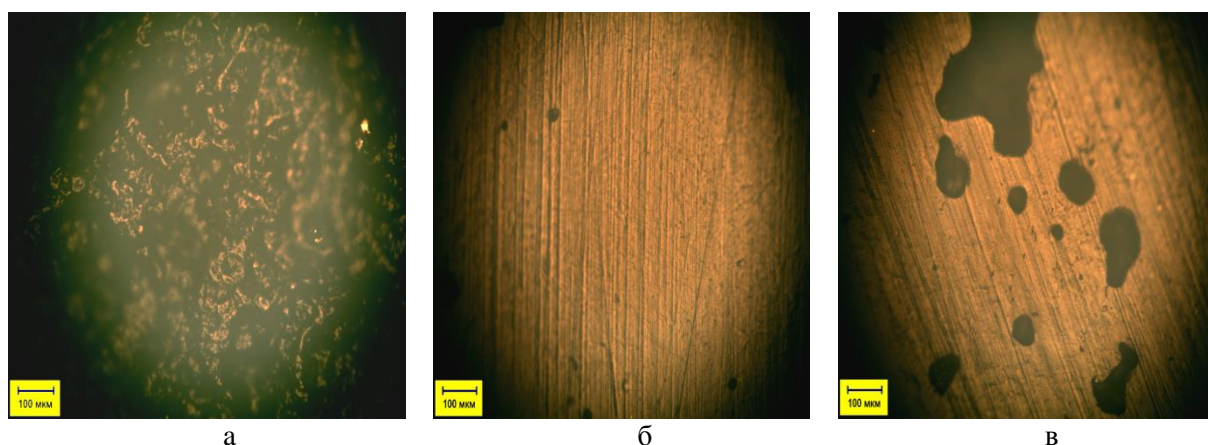


а

б

Рис. 5. Оптические микрофотографии полиуретана с 4 мас.% МУНТ: а – верхняя сторона образца; б – нижняя сторона образца

Fig. 5. Optical micrographs of polyurethane with 4 wt% MWCNT: upper (a) and lower (б) sides of the sample



а

б

в

Рис. 6. Оптические микрофотографии полиуретана с 8 мас.% МУНТ: а – верхняя сторона образца; б – нижняя сторона образца, в – участок поверхности с порами

Fig. 6. Optical micrographs of polyurethane with 8 wt% MWCNT: upper (a) and lower (б) sides of the sample (в shows a surface area with pores)

Характеристики нанокомпозитов в СВЧ-диапазоне

Сравнительные параметры коэффициентов пропускания, отражения и поглощения для образцов композитов в СВЧ-диапазоне на основе полиуретанового компаунда «Адваформ Марка 40» с различным массовым содержанием МУНТ (от 0,5 до 8 мас.%) показаны на **рис. 7**.

Из анализа **рис. 7** следует, что для образца полиуретанового компаунда без добавок УНТ наблюдается возрастание коэффициента пропускания с ростом частоты (от 47% на частоте измерений 8 ГГц до 65% на частоте 12 ГГц). Для образцов композитов с добавками МУНТ пропускание во всем исследованном диапазоне частот слабо изменяется с частотой. Однако наблюдается уменьшение коэффициента про-

пускания с увеличением массовой концентрации МУНТ. Коэффициенты пропускания композитов полиуретана с 0,5 мас.% МУНТ и полиуретана с 1 мас.% МУНТ изменяются от 37 до 42% во всем исследуемом диапазоне частот. Для полиуретана с 2 и 4 мас.% МУНТ значения коэффициента пропускания в диапазоне частот 8–12 ГГц очень близки и составляют 25–27%. Полиуретан с 8 мас.% МУНТ в данном диапазоне частот практически не пропускает излучения.

Для коэффициентов отражения и поглощения наблюдается более сложная картина зависимости от частоты измерений и от массовой концентрации МУНТ в полиуретановом компаунде. Для всех образцов, включая исходный компаунд без добавок МУНТ, наблюдается немонокотное падение коэффициента отражения и рост коэффициента поглощения с возрастанием частоты измерения.

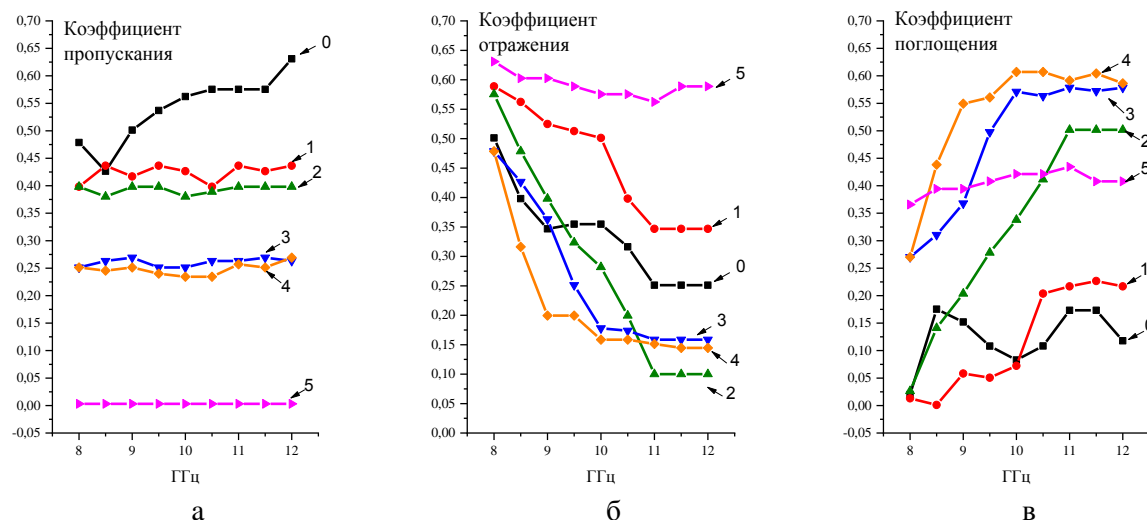


Рис. 7. Коэффициенты пропускания (а), отражения (б) и поглощения (в) электромагнитного излучения наномодифицированного полиуретана (толщина образцов ~ 5 мм): 0 – исходный ПУ; 1–0,5 мас.% МУНТ; 2–1 мас.% МУНТ; 3–2 мас.% МУНТ; 4–4 мас.% МУНТ; 5–8 мас.% МУНТ
 Fig. 7. Transmission (а), reflection (б) and absorption (в) coefficients of electromagnetic radiation of nanomodified polyurethane (sample thickness is ~ 5 mm): 0 is initial PU, 1 is 0.5 wt% MWCNT; 2 is 1 wt% MWCNT; 3 is 2 wt% MWCNT; 4 is 4 wt% MWCNT; 5 is 8 wt% MWCNT

Для образца чистого компаунда коэффициент отражения падает от 50% на частоте 8 ГГц до 25% на частоте 2 ГГц, причем на кривой наблюдается два «плато» в диапазонах частот 9–10 и 11–12 ГГц. Значения коэффициента поглощения чистого компаунда сложным образом изменяются с частотой от 2,5 до 17%. Из всех исследованных образцов максимальное падение коэффициента отражения с ростом частоты (от 60% при 8 ГГц до 10% при 12 ГГц) наблюдается для образца «ПУ + 1% МУНТ». Максимальные значения коэффициента отражения во всем исследованном частотном диапазоне наблюдались для образца «ПУ + 8 % МУНТ», причем изменения данного параметра при различной частоте были незначительными (от 65% при 8 ГГц до 60% при 12 ГГц).

Закключение

Установлено, что для композитов на основе полиуретана с массовой концентрацией МУНТ, равной 2 и 4 мас.%, характерны наибольшие коэффициенты поглощения – от ~ 55 до ~ 62% электромагнитного излучения (ЭМИ) в диапазоне частот от 9,5 до 12 ГГц. Для полиуретана с массовой концентрацией МУНТ 8 мас.% свойственно незначительное изменение коэффициента поглощения – от ~ 37 до ~ 42%. При концентрации МУНТ 8 мас.% в полиуретане композит практически не пропускает ЭМИ в диапазоне частот 8–12 ГГц, а коэффициент отражения

ЭМИ при этом составляет 60–65%.

Следует отметить стабилизирующее воздействие добавок МУНТ на оптические характеристики полиуретанов нанокомпозитов в диапазоне 8 до 12 ГГц. Минимальный разброс коэффициентов отражения и поглощения с частотой от 8 до 12 ГГц наблюдался для образца полиуретана с 8 мас.% МУНТ.

Повышение концентрации МУНТ в полиуретане до 4 мас.% приводит к появлению на верхней стороне образца включений МУНТ. В случае композита с максимальной концентрацией МУНТ (8 мас.%) верхняя сторона образца неоднородная, с развитой поверхностью, большая часть которой занята сгустками нанотрубок.

Список литературы

1. Liu C., Wang L., Liu S., Tong L., Liu X. Fabrication strategies of polymer-based electromagnetic interference shielding materials. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 2020, vol. 3, no. 4, pp. 149–159. <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2020.10.002>
2. Kumar K.S., Rengaraj R., Venkatakrishnan G.R., Chandramohan A. Polymeric materials for electromagnetic shielding – A review. *Materials Today: Proceedings*, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.720>
3. Menzer K., Krause B., Boldt R., Kretzschmar B., Weidisch R., Pötschke P. Percolation behaviour of multi-walled carbon nanotubes of altered length and primary agglomerate morphology in melt mixed isotactic poly-

- propylene-based composites. *Composites Science and Technology*, 2011, vol. 71, no. 16, pp. 1936–1943. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2011.09.009>
4. Liu S., Qin S., Jiang Y., Song P., Wang H. Lightweight high-performance carbon-polymer nanocomposites for electromagnetic interference shielding. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2021, vol. 145, pp. 106376. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2021.106376>
5. Verma M., Chauhan S.S., Dhawan S.K., Choudhary V. Graphene nanoplatelets/carbon nanotubes/polyurethane composites as efficient shield against electromagnetic polluting radiations. *Composites Part B: Engineering*, 2017, vol. 120, pp. 118–127. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.03.068>
6. Zhang W., Wei L., Ma Zh., Fan Q., Ma J. Advances in waterborne polymer/carbon material composites for electromagnetic interference shielding. *Carbon*, 2021, vol. 177, pp. 412–426. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2021.02.093>
7. Anderson L., Govindaraj P., Ang A., Mirabedini A., Hameed N. Modelling, fabrication and characterization of graphene/polymer nanocomposites for electromagnetic interference shielding applications. *Carbon Trends*, 2021, vol. 4, pp. 100047. <https://doi.org/10.1016/j.cartre.2021.100047>
8. Fu B., Ren P., Guo Z., Du Y., Jin Y., Sun Z., Dai Z., Ren F. Construction of three-dimensional interconnected graphene nanosheet network in thermoplastic polyurethane with highly efficient electromagnetic interference shielding. *Composites Part B: Engineering*, 2021, vol. 215, pp. 108813. <https://doi.org/10.1007/s10570-021-03722-z>
9. Lei Z., Tian D., Liu X., Wei J., Rajavel K., Zhao T., Hu Y., Zhu P., Sun R., Wong C.-B. Electrically conductive gradient structure design of thermoplastic polyurethane composite foams for efficient electromagnetic interference shielding and ultra-low microwave reflectivity. *Chemical Engineering Journal*, 2021, vol. 424, pp. 130365. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130365>
10. Shin B., Mondal S., Lee M., Kim S., Huh Y., Nah Ch. Flexible thermoplastic polyurethane-carbon nanotube composites for electromagnetic interference shielding and thermal management. *Chemical Engineering Journal*, 2021, vol. 418, pp. 129282. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.129282>
11. Zhang J., Li H., Xu T., Wu J., Zhou S., Hang Z.H., Zhang X., Yang Z. Homogeneous silver nanoparticles decorating 3D carbon nanotube sponges as flexible high-performance electromagnetic shielding composite materials. *Carbon*, 2020, vol. 165, pp. 404–411. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2020.04.043>
12. Kozak N., Matzui L., Vovchenko L., Kosyanchuk L., Oliynyk V., Antonenko O., Nesin S., Gagolkina Z. Influence of coordination complexes of transition metals on EMI-shielding properties and permeability of polymer blend/carbon nanotube/nickel composites. *Composites Science and Technology*, 2020, vol. 200, pp. 108420. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2020.108420>
13. Аспекты направленного синтеза углеродных нанотрубок для создания иерархических радиопоглощающих композитных материалов / Щегольков А.В., Щегольков А.В., Парфимович И.Д., Буракова Е.А., Кобелев А.В., Дьячкова Т.П. // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий, 2018, т. 80, № 4(78), с. 337–343. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2018-4-337-343>
14. Применение эластомеров, модифицированных углеродными нанотрубками при создании саморегулируемых электронагревателей и материалов для защиты от электромагнитного излучения / Щегольков А.В., Щегольков А.В., Комаров Ф.Ф., Парфимович И.Д. // Российский химический журнал. 2020. Т. 64. № 4. С. 39–45. <https://doi.org/10.6060/rcj.2020644.4>
15. Щегольков А.В. Многоступенчатая механоактивация МУНТ для улучшения перколяционных переходов в системе эластомер/МУНТ: подходы для реализации и практика модификации эластомеров // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т. 19. № 2. С. 58–67. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-2-58-67>
16. Komarov F.F., Parfimovich I.D., Tkachev A.G., Shchegolkov A.V., Shchegolkov A.V., Mil'chanin O.V., Bondarev V. Effect of Methods for Fabrication of Polymer Composites with Carbon Nanotubes on Conduction Processes. *Tech. Phys.* 66, 461–469 (2021). <https://doi.org/10.1134/S1063784221030129>
17. Bakshi S.R., Tercero J.E., Agarwal A. Synthesis and characterization of multiwalled carbon nanotube reinforced ultra high molecular weight polyethylene composite by electrostatic spraying technique. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2007, vol. 38, no. 12, pp. 2493–2499. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2007.08.004>
18. Ghaleb Z.A., Mariatti M., Ariff Z.M. Properties of graphene nanopowder and multi-walled carbon nanotube-filled epoxy thin-film nanocomposites for electronic applications: The effect of sonication time and filler loading. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2014, vol. 58, pp. 77–83. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2013.12.002>
19. Xia T., Zeng D., Li Zh., Young R.J., Vallés C., Kinloch I. Electrically conductive GNP/epoxy composites for out-of-autoclave thermoset curing through Joule heating. *Composites Science and Technology*, 2018, vol. 164, pp. 304–312. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.05.053>
20. Yan D.-X., Pang H., Li B., Vajtai R., Xu L., Ren P.-G., Wang J.-H., Li Zh.-M. Structured Reduced Graphene Oxide/Polymer Composites for Ultra-Efficient Electromagnetic Interference Shielding. *Advanced Functional Materials*, 2015, vol. 25, no. 4, pp. 559–566. <https://doi.org/10.1002/adfm.201403809>

21. Vyas M.K., Chandra A. Magneto-dielectric and magneto-conducting fillers based polymer composites: Effect of functionalization, coating and dispersion process on electromagnetic shielding properties. *Journal of Applied Polymer Science*, 2021, vol. 138:e50602. <https://doi.org/10.1002/app.50602>

References

1. Liu C., Wang L., Liu S., Tong L., Liu X. Fabrication strategies of polymer-based electromagnetic interference shielding materials. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 2020, vol. 3, no. 4, pp. 149–159. <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2020.10.002>
2. Kumar K.S., Rengaraj R., Venkatakrishnan G.R., Chandramohan A. Polymeric materials for electromagnetic shielding - A review. *Materials Today: Proceedings*, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.720>
3. Menzer K., Krause B., Boldt R., Kretschmar B., Weidisch R., Pötschke P. Percolation behaviour of multi-walled carbon nanotubes of altered length and primary agglomerate morphology in melt mixed isotactic polypropylene-based composites. *Composites Science and Technology*, 2011, vol. 71, no. 16, pp. 1936–1943. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2011.09.009>
4. Liu S., Qin S., Jiang Y., Song P., Wang H. Lightweight high-performance carbon-polymer nanocomposites for electromagnetic interference shielding. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2021, vol. 145, pp. 106376. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2021.106376>
5. Verma M., Chauhan S.S., Dhawan S.K., Choudhary V. Graphene nanoplatelets/carbon nanotubes/polyurethane composites as efficient shield against electromagnetic polluting radiations. *Composites Part B: Engineering*, 2017, vol. 120, pp. 118–127. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.03.068>
6. Zhang W., Wei L., Ma Zh., Fan Q., Ma J. Advances in waterborne polymer/carbon material composites for electromagnetic interference shielding. *Carbon*, 2021, vol. 177, pp. 412–426. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2021.02.093>
7. Anderson L., Govindaraj P., Ang A., Mirabedini A., Hameed N. Modelling, fabrication and characterization of graphene/polymer nanocomposites for electromagnetic interference shielding applications. *Carbon Trends*, 2021, vol. 4, pp. 100047. <https://doi.org/10.1016/j.cartre.2021.100047>
8. Fu B., Ren P., Guo Z., Du Y., Jin Y., Sun Z., Dai Z., Ren F. Construction of three-dimensional interconnected graphene nanosheet network in thermoplastic polyurethane with highly efficient electromagnetic interference shielding. *Composites Part B: Engineering*, 2021, vol. 215, pp. 108813. <https://doi.org/10.1007/s10570-021-03722-z>
9. Lei Z., Tian D., Liu X., Wei J., Rajavel K., Zhao T., Hu Y., Zhu P., Sun R., Wong C.-B. Electrically conductive gradient structure design of thermoplastic polyurethane composite foams for efficient electromagnetic interference shielding and ultra-low microwave reflectivity. *Chemical Engineering Journal*, 2021, vol. 424, pp. 130365. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130365>
10. Shin B., Mondal S., Lee M., Kim S., Huh Y., Nah Ch. Flexible thermoplastic polyurethane-carbon nanotube composites for electromagnetic interference shielding and thermal management. *Chemical Engineering Journal*, 2021, vol. 418, pp. 129282. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.129282>
11. Zhang J., Li H., Xu T., Wu J., Zhou S., Hang Z.H., Zhang X., Yang Z. Homogeneous silver nanoparticles decorating 3D carbon nanotube sponges as flexible high-performance electromagnetic shielding composite materials. *Carbon*, 2020, vol. 165, pp. 404–411. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2020.04.043>
12. Kozak N., Matzui L., Vovchenko L., Kosyanchuk L., Oliynyk V., Antonenko O., Nesin S., Gagolkina Z. Influence of coordination complexes of transition metals on EMI-shielding properties and permeability of polymer blend/carbon nanotube/nickel composites. *Composites Science and Technology*, 2020, vol. 200, pp. 108420. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2020.108420>
13. Shchegolkov A.V., Shchegolkov A.V., Parfimovich I.D., Burakova E.A., Kobelev A.V., Dyachkova T.P. Aspects of the directional synthesis of carbon nanotubes to create hierarchical radio-absorbing composite materials. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologii* [Proceedings of Voronezh State University of Engineering Technologies]. 2018, vol. 80, no. 4 (78), pp. 337–343. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2018-4-337-343>
14. Shchegolkov A.V., Shchegolkov A.V., Komarov F.F., Parfimovich I.D. The use of elastomers modified with carbon nanotubes in the creation of self-regulating electric heaters and materials for protection against electromagnetic radiation. *Rossiiskii khimicheskii zhurnal* [Russian Chemical Journal]. 2020, vol. 64, no. 4, pp. 39–45. <https://doi.org/10.6060/rcj.2020644.4>
15. Shchegolkov A.V. Multistage mechanical activation of MWCNTs to improve percolation transitions in the elastomer/MWCNTs system: Approaches to the implementation and practice of modifying elastomers. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021, vol. 19, no. 2, pp. 58–67. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-2-58-67>
16. Komarov F.F., Parfimovich I.D., Tkachev A.G., Shchegolkov A.V., Shchegolkov A.V., Milchanin O. V., Bondarev V. Effect of methods for fabrication of polymer composites with carbon nanotubes on conduction processes. *Tech. Phys.* 66, 461–469 (2021). <https://doi.org/10.1134/S1063784221030129>
17. Bakshi S.R., Tercero J.E., Agarwal A. Synthesis and characterization of multiwalled carbon nanotube reinforced ultra-high molecular weight polyethylene composite by electrostatic spraying technique. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2007, vol. 38, no. 12, pp. 2493–2499. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2007.08.004>

18. Ghaleb Z.A., Mariatti M., Ariff Z.M. Properties of graphene nanopowder and multi-walled carbon nanotube-filled epoxy thin-film nanocomposites for electronic applications: The effect of sonication time and filler loading. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2014, vol. 58, pp. 77–83. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2013.12.002>
19. Xia T., Zeng D., Li Zh., Young R.J., Vallés C., Kinloch I. Electrically conductive GNP/epoxy composites for out-of-autoclave thermoset curing through Joule heating. *Composites Science and Technology*, 2018, vol. 164, pp. 304–312. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.05.053>
20. Yan D.-X., Pang H., Li B., Vajtai R., Xu L., Ren P.-G., Wang J.-H., Li Zh.-M. Structured Reduced Graphene Oxide/Polymer Composites for Ultra-Efficient Electromagnetic Interference Shielding. *Advanced Functional Materials*, 2015, vol. 25, no. 4, pp. 559–566. <https://doi.org/10.1002/adfm.201403809>
21. Vyas M.K., Chandra A. Magneto-dielectric and magneto-conducting fillers based polymer composites: Effect of functionalization, coating and dispersion process on electromagnetic shielding properties. *Journal of Applied Polymer Science*, 2021, vol. 138:e50602. <https://doi.org/10.1002/app.50602>

Поступила 25.10.2021; принята к публикации 18.11.2021; опубликована 24.12.2021
Submitted 25/10/2021; revised 18/11/2021; published 24/12/2021

Щегольков Александр Викторович – кандидат технических наук, доцент,
Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия.
Email: Energynano@yandex.ru. ORCID 0000-0002-4317-0689

Щегольков Алексей Викторович – исследователь,
Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия.
Email: alexxx5000@mail.ru. ORCID 0000-0002-1838-3842

Комаров Фадей Фадеевич – заведующий лабораторией, доктор физико-математических наук, профессор,
член-корреспондент НАНБ, Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко», Минск, Республика Беларусь.
Email: komarovF@bsu.by. ORCID 0000-0001-8292-8942

Парфимович Иван Дмитриевич – младший научный сотрудник, Научно-исследовательское учреждение
«Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко», Минск, Республика Беларусь.
Email: parfimovich@bsu.by (8017)3983909. ORCID 0000-0002-5922-6333

Alexander V. Shchegolkov – PhD (Eng.), Associate Professor,
Tambov State Technical University, Tambov, Russia.
Email: Energynano@yandex.ru. ORCID 0000-0002-4317-0689

Alexey V. Shchegolkov – Researcher, Tambov State Technical University, Tambov, Russia.
Email: alexxx5000@mail.ru. ORCID 0000-0002-1838-3842

Fadey F. Komarov – Head of the Laboratory, DrSc (Physics and Mathematics), Professor, Corresponding Member
of the National Academy of Sciences of Belarus, Sevchenko Institute of Applied Physical Problems Research Institute, Minsk, Belarus.
Email: komarovF@bsu.by. ORCID 0000-0001-8292-8942

Ivan D. Parfimovich – Junior Researcher, Sevchenko Institute of Applied Physical Problems Research Institute,
Minsk, Belarus.
Email: parfimovich@bsu.by. (8017)3983909. ORCID 0000-0002-5922-6333

СТАНДАРТИЗАЦИЯ, СЕРТИФИКАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ

STANDARDIZATION, CERTIFICATION AND QUALITY MANAGEMENT

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

УДК 658.562

DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-4-82-90



ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ ВНЕДРЕНИЯ РИСК-ОРИЕНТИРОВАННОГО МЫШЛЕНИЯ

Солдатов В.Г., Вавилин Я.А., Манкевич И.Г.

Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия

Аннотация. В статье рассмотрена актуальная проблема внедрения риск-ориентированного мышления на промышленных предприятиях. Риск-ориентированное мышление позволяет существенно повысить результативность системы менеджмента качества (СМК) предприятия и обеспечить предотвращение неблагоприятных последствий. Любые инновации на первоначальных этапах сталкиваются с сопротивлением персонала. В первую очередь это связано с психологическими аспектами и не пониманием выгод от конструктивных изменений. Не стало исключением и внедрение риск-ориентированного мышления. Несмотря на широкое распространение сертифицированных систем менеджмента качества риск-ориентированное мышление на предприятиях остается формальным, что не позволяет в полной мере реализовать весь потенциал СМК. Статья посвящена решению трех проблем, возникающих при внедрении риск-ориентированного мышления: отсутствие культуры менеджмента риска; формальный подход к внедрению методов; затянувшийся процесс перехода к повсеместному применению цифровых технологий. Авторами предлагается структурированный подход к поэтапному «мягкому» переходу на риск-ориентированное мышление. Отражены ключевые проблемы и намечены возможные пути их решения. Предлагаемые решения базируются на широко известных методах системного анализа и процессного подхода. Рассмотрены и проанализированы следующие основные этапы внедрения риск-ориентированного мышления: создание условий для формирования культуры риск-ориентированного мышления; переход от формального внедрения к риск-ориентированному мышлению; переход к повсеместному применению цифровых технологий. Предложенный подход может быть основой для начала формирования культуры работы с рисками (возможностями) предприятия. В зависимости от специфики среды организации этапы могут претерпевать изменения. Авторы открыты к конструктивному диалогу и критике.

Ключевые слова: риск-ориентированное мышление, качество, метод, система, лидерство.

© Солдатов В.Г., Вавилин Я.А., Манкевич И.Г., 2021

Для цитирования

Солдатов В.Г., Вавилин Я.А., Манкевич И.Г. Проблемы и пути внедрения риск-ориентированного мышления // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №4. С. 82–90. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-4-82-90>



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

PROBLEMS AND WAYS OF INTRODUCING RISK-BASED THINKING

Soldatov V.G., Vavilin Ya.A., Mankevich I.G.

Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

Abstract. The paper describes a currently important issue of introducing risk-based thinking at industrial enterprises. Risk-based thinking can significantly increase effectiveness of the quality management system (QMS) of the enterprise and ensure the prevention of adverse consequences. At initial stages any innovations encounter resistance of the staff. First of all, this is due to psychological aspects and a lack of understanding of benefits from helpful changes. Introducing risk-based thinking is not an exception. Despite a widespread use of certified quality management systems, risk-based thinking at enterprises remains formal, which does not allow realizing completely a full potential of QMS. The paper is devoted to solving three problems that arise, when introducing risk-based thinking: a lack of risk management culture; a formal approach to introducing methods; and a lingering process of the transition to a common use of digital technologies. The authors suggest a structured approach to a gradual "soft" transition to risk-based thinking. The key problems are stated and possible ways of their solution are outlined. The suggested solutions are based on well-known methods of a system analysis and a process approach. The authors studied and analyzed the following main stages of introducing risk-based thinking: creating conditions for forming risk-based thinking culture; the transition from a formal introduction to risk-based thinking; the transition to a common use of digital technologies. The suggested approach can be the basis used to begin forming culture of dealing with risks (opportunities) of the enterprise. Depending on special features of the organization's environment, the stages may undergo changes. The authors are open to constructive dialogue and criticism.

Keywords: risk-based thinking, quality, method, system, leadership.

For citation

Soldatov V.G., Vavilin Ya.A., Mankevich I.G. Problems and Ways of Introducing Risk-Based Thinking. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021, vol. 19, no. 4, pp. 82–90. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-4-82-90>

Введение

Риск-ориентированное мышление на предприятии, с внедрением стандартов ИСО серии 9000 версии 2015 года [17], является неотъемлемой частью системы менеджмента качества и необходимым условием для ее сертификации.

Риск-менеджмент подразумевает под собой отдельную технологию, внедрение которой должно быть обеспечено разработанными инструкциями и иными локальными нормативными актами.

Ключевую роль в формировании мышления и ценностей играет принцип менеджмента качества «лидерство», который должен реализовываться, начиная с высшего руководства. Это должно прослеживаться во всех решениях и направлениях развития организации. Истинный лидер не только ставит задачи, но и сам активно участвует в выявлении и реализации путей их решения. Одной из задач лидера является формирование у персонала отношения к риск-ориентированному мышлению как к обязательной производственной технологии, выполнение которой обеспечит предприятию реальные выгоды в виде прямых доходов за счет снижения издержек или косвенные – за счет по-

вышения имиджа предприятия и его конкурентоспособности на рынке.

Как правило, руководитель организации при принятии решения о внедрении новой технологии производства или управления (в самом широком понятии, в том числе и риск-ориентированное мышление) руководствуется двумя понятиями: она принесет прибыль; она требуется в рамках законодательства [1–5]. Согласно концепции менеджмента качества если любая технология или методология, предлагаемая в рамках обеспечения качества, способна принести прибыль (либо посредством уменьшения издержек на процессы, либо за счет увеличения спроса), то такая технология должна быть внедрена.

Достижение поставленных предприятием целей в области качества за счет улучшения результативности и эффективности его процессов условно можно рассматривать на двух уровнях:

1. Качественные небольшие улучшения за счет постепенного внедрения выбранной методологии в течение относительно длительного периода времени (философия KAIZEN). Наиболее характерен для стран с развитой экономикой и высокой культурой производства. Точечное улучшение

отдельных процессов на основе глубокого анализа состояния производства с учетом рисков и возможностей организации.

2. Внедрение прорывной технологии в сравнительно небольшой период (KAIRYO). Наиболее характерен для стран с развивающейся экономикой, когда приоритетные направления улучшения выявляются спонтанно и все средства направляются на внедрение одной прорывной технологии.

Внедрение методов менеджмента качества, будь то TQM, бережливое производство, реинжиниринг бизнес-процессов, риск-менеджмент и пр., относится к улучшениям первого типа. Часто руководство предприятия рассчитывает прежде всего на улучшение второго типа в целях максимизации прибыли в кратчайшие сроки. Именно поэтому и остановились исследования в области риск-менеджмента на перечислении и применении некоторых методик оценки и инструментов анализа рисков, которые были указаны в соответствующих стандартах. Положения стандартов в области менеджмента риска носят рекомендательный характер, поэтому руководство организации находится в состоянии выбора, какую из предложенных методик использовать эффективнее в конкретной области деятельности. Однако для подтверждения соответствия системы качества организации требованиям стандарта ИСО серии 9000 версии 2015 года необходимо иметь внедренную систему анализа и оценки рисков [5–7, 12].

В связи с этим для оценки и анализа рисков на абсолютном большинстве средних и крупных российских промышленных предприятий применяется FMEA-анализ и его вариации или применение матриц значимости. Переход к технологии Качество 4.0 способствует полной интеграции различных систем менеджмента в общую цифровую платформу управления организацией и в этом случае становятся обязательными к исполнению требования по оценке риска, так как в эту платформу войдут такие системы менеджмента, как охрана труда и промышленная безопасность [14].

Выполнение принципов менеджмента качества (принятие решений, основанное на свидетельствах и лидерство) является неотъемлемой частью СМК и ключевыми аспектами для внедрения риск-ориентированного мышления. Нормативной базой являются стандарты ИСО серии 31000. В них даются основные понятия в предметной области (риск, неопределенность, менеджмент риска) и методы выполнения требований.

Методы исследований

Множество возможных подходов к определению риска, принятых в различных сферах (финансовые риски – наиболее развитая область; производственные; системные; техногенные), объединяет понятие неопределенности – потенциального отклонения от ожидаемого результата. Оно может иметь положительный (в этом случае стоит говорить о выявлении потенциальных возможностей организации) или отрицательный эффект (риск). Рекомендуемые методы для внедрения представлены в стандарте ГОСТ Р 58771-2019 Менеджмент риска. Технологии оценки риска [6–9, 20].

Эффективное внедрение риск-ориентированного мышления возможно только при комплексном процессном подходе, то есть необходимо выделить последовательность операций и ответственных лиц за внедрение. Процессный подход (цикл Plan-Do-Check (Study)-Act), доказавший эффективность при разработке и описании деятельности в области качества, применим и к рискам. Очевидным является различие в уровне подготовки кадров в организациях и вовлеченности (заинтересованности) их во внедрении инноваций. Для этого необходимо выделить уровни совершенствования процессов риск менеджмента, а следовательно, и применяемые методы [10–15].

Результаты исследования

Создание условий для формирования культуры риск-ориентированного мышления

Внедрение риск-ориентированного мышления в организации необходимо начинать с постановки задач на высшем уровне руководства. После формирования стратегических целей необходимо донести их до исполнителей, провести обучение и оценить потенциальные выгоды от проведения анализа. Применение методов оценивания риска связано с формированием межфункциональных экспертных групп, которые способны объективно и целостно определить все составляющие исследуемого объекта (процесса, изделия). Такая работа необходима для формирования понимания и вовлеченности сотрудников (исполнителей) – залога успешного функционирования процесса. При этом будут реализовываться важные принципы менеджмента качества: лидерство и взаимодействие работников.

Возможно выделить три направления развития работ по внедрению риск-ориентированного мышления (табл. 1). Работы расположены в рекомендованном порядке их внедрения.

*Переход от формального внедрения
к риск-ориентированному мышлению*

В общем случае процесс менеджмента рисков следует рассматривать как последовательность процессов (табл. 2). Работа с рисками должна проводиться на постоянной основе в рамках цикла PDC(S)A. Результативность и эффективность внедрения риск-ориентированного мышления заключается в снижении уровня (количества) выявленных потенциальных неопределенностей и их влияния.

В стандарте ГОСТ Р 58771-2019 «Менеджмент риска. Технологии оценки риска» предлагаемые методы обработки риска разделены по этапам и уровню сложности [18–22]. В этой связи целесообразно рекомендовать внедрять методы на основе анализа общего состояния процессов системы менеджмента качества по трехуровневой шкале: определенность (начальный), результативность (продвинутый) и эффективность (максимальный). Выбор методов обработки риска в зависимости от уровня совершенства процессов организации представлен в табл. 3 [16].

Таблица 1. Направления развития риск-ориентированного мышления

Table 1. Directions for the development of risk-based thinking

Направленность	Содержание работ	Особенности
Продукция	Определение рисков, связанных с конструкцией продукции и технологией ее производства	При реализации такого подхода предполагается исключить из рассмотрения риски, связанные с менеджментом и самим производственным процессом. Рассматривается только процесс разработки и содержание конструкторской и технологической документации. Требует незначительных финансовых затрат и формирование экспертной группы из небольшого количества сотрудников. Характерно на начальных этапах перехода к учету рисков
Организация	Определение рисков для организации в целом, то есть анализ процессов производства и менеджмента, независимо от вида продукции	При реализации такого подхода предполагается исключить из рассмотрения риски, связанные с выпускаемой продукцией. Требует больших финансовых затрат по сравнению с предыдущим, формирование экспертной группы из большого количества сотрудников
Комплексный	Определение рисков, связанных как с продукцией, так и с организацией производства	Наиболее ресурсоемкий. Характерен для организаций, полностью вовлеченных в изучение рисков. В итоге позволяет всесторонне оценить риски организации

Таблица 2. Последовательность этапов по внедрению риск-ориентированного мышления

Table 2. The sequence of stages for the introduction of risk-based thinking

Наименование этапа	Содержание работ	Особенности
Определение области исследования	Проводятся работы по определению области исследования риска с учетом специфики условий производства и характеристик продукции	Является начальным этапом работ и позволяет установить границу исследования. При слишком «широких» границах возможны ошибки первого рода (риск производителя) – избыток информации приведет к нерациональному распределению ресурсов, увеличению сроков проведения анализа и увеличению издержек производства. При слишком «узком» анализе возможны ошибки второго рода (риск потребителя) – повышается вероятность не выявления возможного риска
Обработка риска	Включает в себя работы по идентификации, анализу и сравнительной оценке риска	Является основным этапом реализации риск-менеджмента и характеризуется использованием конкретных методов в соответствии с рекомендациями стандартов
Отчетность	Формирование отчетов о результатах работы, выделение направлений для улучшения	Результаты анализа должны становиться основой для формирования стратегии постоянного улучшения, основанной на свидетельствах. Устанавливаются конкретные ответственные за проведение предупреждающих (корректирующих) мероприятий и срок их реализации

Таблица 3. Выбор методов обработки риска в зависимости от уровня совершенства процессов организации
Table 3. The choice of risk treatment methods depending on the level of excellence of the organization's processes

Наименование уровня	Уровень необходимых данных	Опыт специалиста	Затраты усилий
Определенность	Низкий/любой	Низкий	Низкие/средние
Результативность	Средний/высокий	Средний/высокий	Средние/высокие
Эффективность	Высокий	Высокий	Высокие

Например, при нахождении процессов на начальном этапе (определенность) внедрения методов риск-менеджмента может быть применен следующий набор инструментов, гарантирующий минимально допустимый уровень оценки: мозговой штурм, контрольные списки, диаграмма Исикавы, метод «галстук-бабочка» и регистрация риска.

Другим направлением развития риск-ориентированного мышления на предприятиях становится разработка реестров рисков. Назначение реестра рисков:

1) является планом действий, так как в нем кроме идентификации опасностей и оценки риска определены необходимые мероприятия по его снижению, сроки их внедрения и ответственные за выполнение;

2) является основой для обмена информацией руководства с персоналом и другими заинтересованными лицами, поскольку содержит перечень текущих проблем организации, связанных с рисками, и сведения о том, как, кто и когда этими проблемами управляет.

Согласно рекомендациям стандарта [21, 22] реестр рисков организации является формой ведения записей об идентифицированных опасных событиях, оценке соответствующего им риска, способах и сроках его обработки. Однако здесь кроется одна деталь: если создавать реестры рисков под каждый процесс организации, что характерно для дедуктивных исследований, то образуется большая база данных с перечислением рисков и их источников (вплоть до указания конкретной единицы оборудования). Это все приводит к росту затрат времени проведения анализа и повышению общей трудоемкости процесса, что может поставить под сомнение эффективность проводимого анализа рисков. В данном случае актуальным является применение IT-технологий и автоматизации.

Очевидно, что конкретные риски процессов могут иметь одни обобщенные источники. Поэтому есть смысл создавать не реестр рисков, а реестр их обобщенных источников, которые могут быть использованы не только в рамках конкретного процесса, а охватывать целые области

деятельности организаций, тем самым унифицируя применение технологий риск-менеджмента.

Переход к повсеместному применению цифровых технологий

Цифровизация производства (Индустрия 4.0) позволяет обеспечить ускоренный обмен информацией и сократить бюрократические издержки.

Целесообразно выделить две составляющие:

1) перемещение документооборота и работы экспертных групп в виртуальное пространство (вслед за цифровыми двойниками продукции);

2) использование информационных мощностей для проведения обработки bigdata, что способствует более точному прогнозированию.

Проведение собраний экспертных групп, особенно в современных условиях распространения болезней (пример, 2020/2021 года COVID-19), вполне может быть перенесено в цифровую среду с организацией параллельного доступа к информации. Удаленная работа специалиста в области менеджмента качества, технологии производства становится объективной реальностью.

Пример реализации предложенного подхода

Предлагаемые пути решения выделенных проблем были реализованы в рамках сотрудничества с предприятием, производящим подъемные платформы для лиц с ограниченными возможностями. Для анализа была представлена подъемная платформа БК450, являющаяся основной в линейке продукции предприятия.

На основе представленного выше подхода была сформирована программа улучшений деятельности в области формирования риск-ориентированного мышления в рамках предприятия (табл. 4).

Итогом проделанной работы является вовлечение в процесс риск-ориентированного мышления персонала не только службы качества, но и прочих структур. Обучение персонала по вопросам применения методов работы с рисками и система материального поощрения позволила обеспечить более полное выявление потенциальных рисков и поиск путей их устранения. Выбор методов обработки риска проводился с учетом их сложности и возможности получения высоких результатов.

Таблица 4. Мероприятия по улучшению деятельности в области риск-менеджмента
 Table 4. Measures taken to improve risk management activities

Наименование мероприятия	Выполняемые работы
Оценка общего состояния процесса риск-менеджмента в организации	Формирование экспертной группы. Сбор и анализ информации. Итоговая оценка организации
<i>Создание условий для формирования культуры риск-ориентированного мышления</i>	
Обучение персонала	Обучение высшего руководства и руководителей профильных служб
	Обучение персонала
Программа стимулирования	Разработка мер стимулирования за внесение предложений по улучшению деятельности организации или выпускаемой продукции
	Проведение тематических встреч с целью разъяснения важности оценки риска
Создание экспертных групп	Формирование межфункциональных групп. Реализация комплексного подхода
<i>Переход от формального внедрения к риск-ориентированному мышлению (на этом этапе важно показать персоналу получаемые выгоды от применения методов риск менеджмента)</i>	
Определение области исследования	Установление границ определения риска с учетом специфики продукции и производства
Обработка риска	Выполнение комплекса мер по обработке риска. Выбор методов анализа с учетом уровня облученности персонала и развития культуры работы с рисками
Отчетность	Формирование формы отчетности по итогам анализа. Разработка программы корректирующих (предупреждающих) действий. Наглядное представление выгод от сокращения опасностей в рамках подразделения и предприятия
Стимулирование	Программа материального и нематериального поощрения экспертных групп
<i>Переход к повсеместному применению цифровых технологий</i>	
Модернизация оборудования	Закупка нового высокоточного оборудования и средств цифровизации

В результате проведенных работ (описанных в табл. 4) снижение количества рекламации по модели подъемной платформы БК 450 составило 75%. Общий экономический эффект от совершенствования деятельности в области риск-менеджмента составил 15,3% от объема выручки.

Обсуждение

Предлагаемые авторами мероприятия по внедрению риск-ориентированного мышления в организации разумеется не могут претендовать на абсолютную правильность и безальтернативность. Важно оценивать уровень ресурсобеспеченности в рамках конкретного производства и степень внедрения СМК и иных систем менеджмента.

Формальное выполнение поставленных целей и задач в области менеджмента риска, естественно, приведет к получению сертификата на систему менеджмента качества, но не к реализации всего потенциала, который может быть достиг-

нут. Это краткосрочно обеспечит организации некоторое уменьшение затрат, связанных с исправлением возникающих несоответствий за счет «предугадывания» (а не анализа) общих событий, но расходы на содержание системы менеджмента риска перекроют выгоды от ее работы.

Доступность информации, осведомленность исполнителей о целях работы и постоянное обучение являются путем воспитания культуры производства и менеджмента, в том числе менеджмента риска. Последовательность выполнения работ и лидерство (приверженность) руководителя способны обеспечить устойчивое развитие организации во всех сферах.

Заключение и выводы

Неправильно рассматривать риск-ориентированное мышление как лекарство от всех болезней. Оно, в первую очередь, средство диагностики, выявления критических элементов продукции (производства), позволяющее своевременно при-

нять «лекарство». Как известно из теории производства, ошибка, выявленная на стадии конструкторского проекта изделия стоит условно 10 единиц, на стадии подготовки технологии производства – 100 единиц, на стадии производства – 1000 единиц.

В связи с нарастающим мировым кризисом и необходимостью общей экономии исследования в области применения методик оценки и анализа рисков и их эффективности сегодня обретают новую актуальность для всего мирового сообщества. Авторами сделана попытка предложить подход к поэтапному внедрению методов риск-менеджмента, начиная с постановки стратегических целей и обучения персонала, с постепенным внедрением более сложных и трудоемких методов. Такой подход способен обеспечить совершенствование навыков сотрудников и их вовлеченность в процесс анализа.

Проведение работ по выявлению и оценке рисков способствует обнаружению возможностей организации. Происходит решение стратегической задачи – сокращение неопределенности за счет более глубокого изучения «среды организации» посредством устранения рисков и более полного использования возможностей.

Авторы считают, что данная статья может стать основой для научной дискуссии по вопросу поиска причин низкой эффективности внедрения риск-ориентированного мышления и методов их устранения. Она может стать началом цикла статей, направленных на поиск путей улучшения деятельности в области обеспечения безопасности продукции. «Только в споре рождается истина» (Сократ).

Список литературы

- Бардина Т.Н., Макарова Л.В., Тарасов Р.В. Управление рисками процессов системы менеджмента качества // *Дневник науки*. 2019. № 1(25). С. 14.
- Hayashi Y., Kamei K. Risk management. In *Science of societal safety: living at times of risks and disasters*; Abe S., Ozawa M., Kawata Y.; Springer, Singapore, 2019, vol. 2, pp. 121–128. DOI: 10.1007/978-981-13-2775-9_11
- Oshikoya T.W. Risk management. In *Frontier capital markets and investment banking: principles and practice from Nigeria*; Routledge, England, 2019, pp. 80–90.
- Manzo C., Cochino E., Merchant L., & Mazzaglia G. Risk Management. In B. Strom, S. Kimmel, & S. Hennessy (a cura di), *Pharmacoepidemiology 6th Edition*. John Wiley & Sons, 2019, pp. 581–616.
- Buganova K., Simickova J. Risk management in traditional and agile project management In 13th International scientific conference on sustainable, modern and safe transport (Transcom 2019) Novy Smokovec, Slovakia, may 29–31, 2019; Bujnak J., Guagliano M., 2019, pp. 986–993. DOI: 10.1016/j.trpro.2019.07.138
- Kartashova O.I., Molchanova O.V., Turgaeva A. Insurance Risks Management Methodology. *Journal of risk and financial management* 2018, vol. 11. DOI: 10.3390/jrfm11040075
- Jenkins I.S. Risk and Safety Management. *Adventure tourism and outdoor activities management: a 21st century toolkit*, 2019, pp. 77–90.
- Romanskaya A., Berdnikov A. Project Risk Management Methodology. In *Integrated computer technologies in mechanical engineering: synergetic engineering*, 2020, pp. 427–436. DOI: 10.1007/978-3-030-37618-5_36
- Gatti S. Project Characteristics, Risk Analysis, and Risk Management. In *Project finance in theory and practice: designing, structuring, and financing private and public projects*, 3rd edition, 2018, pp. 63–103. DOI: 10.1016/B978-0-12-811401-8.00003-9
- Meyer T., Reniers G., Cozzani V. Introduction to risk management (RM). In *Risk management and education*, 2019, pp.1–14. DOI: 10.1515/9783110344578-001
- Цакаев А.Х., Саидов З.А. Трансформации в методологии менеджмента риска и их влияние на стандарты управления качеством // *Вестник Чеченского государственного университета*. 2019. №4. С. 7–14.
- Mishura L.G., Vasilyeva Yu.V., Abduraimova N.O. Technologies of risk assessment at the stages of the risk management process. *Modern economy success*, 2020, vol. 5, pp. 68–72.
- Solovyov V.P., Pereskokova T.A. Process and risk-oriented thinking of employees. *Economics in Industry*, 2020, vol. 13, pp. 206–217.
- Solovyov V.P., Pereskokova T.A. Commitment to quality and risk-oriented thinking of employees is the basis of the modern economy. *Sciences of Europe*, 2019, vol. 45–5, pp. 8–16.
- Chernov V.B. Risk analysis of an integrated investment project. *Risk Management*, 2018, vol. 3, pp. 56–64.
- Chistokletov N., Vavilin Y. Safety management system of machine-building production, *Engineering Review*. 2018, vol. 38, pp. 226–231.
- ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Системы менеджмента качества. Требования. М.: Стандартинформ, 2020. 32 с.
- ГОСТ Р ИСО 31000-2019. Менеджмент риска. Принципы и руководство. М.: Стандартинформ, 2020. 20 с.
- ГОСТ Р 51897-2011/ Руководство ИСО 73:2009. Менеджмент риска. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2020. 16 с.
- ГОСТ Р 58771-2019. Менеджмент риска. Технологии оценки риска. М.: Стандартинформ, 2020. 86 с.
- ГОСТ Р 51901.21-2012. Менеджмент риска. Реестр риска. Общие положения. М.: Стандартинформ, 2020. 12 с.

22. ГОСТ Р 51901.23-2012. Менеджмент риска. Реестр риска. Руководство по оценке риска опасных событий для включения в реестр риска. М.: Стандартинформ, 2020. 30 с.

References

1. Bardina T.N., Makarova L.V., Tarasov R.V. Managing risks of processes of the quality management system. *Dnevnik nauki* [Journal of Science], 2019, no. 1 (25), p. 14. (In Russ.)
2. Hayashi Y., Kamei K. Risk management. Science of societal safety: living at times of risks and disasters. Edited by Abe S., Ozawa M., Kawata Y.; Springer, Singapore, 2019; vol. 2, pp. 121–128. DOI: 10.1007/978-981-13-2775-9_11
3. Oshikoya T.W. Risk management. Frontier capital markets and investment banking: principles and practice from Nigeria. Routledge, England, 2019, pp. 80–90.
4. Manzo C., Cochino E., Merchant L., Mazzaglia G. Risk management. Edited by B. Strom, S. Kimmel, S. Hennessy. *Pharmacoeconomics*, 6th Edition, John Wiley & Sons, 2019, pp. 581–616.
5. Baganova K., Simickova J. Risk management in traditional and agile project management. 13th International Scientific Conference on Sustainable, Modern and Safe Transport (Transcom 2019). Novy Smokovec, Slovakia, May 29–31, 2019; Bujnak J., Guagliano M., 2019, pp. 986–993. DOI: 10.1016/j.trpro.2019.07.138
6. Kartashova O.I., Molchanova O.V., Turgaeva A. Insurance risks management methodology. *Journal of Risk and Financial Management*, 2018, vol. 11. DOI: 10.3390/jrfm11040075
7. Jenkins I.S. Risk and safety management. Adventure tourism and outdoor activities management: a 21st century toolkit, 2019, pp. 77–90.
8. Romanskaya A., Berdnikov A. Project risk management methodology. Integrated computer technologies in mechanical engineering: synergetic engineering, 2020, pp. 427–436. DOI: 10.1007/978-3-030-37618-5_36
9. Gatti S. Project characteristics, risk analysis, and risk management. *Project Finance in Theory and Practice: Designing, Structuring, and Financing Private and Public Projects*, 3rd edition, 2018, pp. 63–103. DOI: 10.1016/B978-0-12-811401-8.00003-9
10. Meyer T., Reniers G., Cozzani V. Introduction to risk management (RM). *Risk Management and Education*, 2019, pp.1–14. DOI: 10.1515/9783110344578-001
11. Tsakaev A.Kh., Saidov Z.A. Transformations in risk management methodology and their impact on quality management standards. *Vestnik Chechenskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Chechen State University], 2019, no. 4, pp. 7–14. (In Russ.)
12. Mishura L.G., Vasilyeva Yu.V., Abduraimova N.O. Technologies of risk assessment at the stages of the risk management process. *Modern Economy Success*, 2020, vol. 5, pp. 68–72. (In Russ.)
13. Soloviev V.P., Pereskokova T.A. Process and risk-oriented thinking of employees. *Russian Journal of Industrial Economics*, 2020, vol. 13, pp. 206–217. (In Russ.)
14. Solovyov V.P.; Pereskokova T.A. Commitment to quality and risk-oriented thinking of employees is the basis of the modern economy. *Sciences of Europe*, 2019, vol. 45–5, pp. 8–16.
15. Chernov V.B. Risk analysis of an integrated investment project. *Risk Management*, 2018, vol. 3, pp. 56–64.
16. Chistokletov N., Vavilin Y., Safety management system of machine-building production. *Engineering Review*, 2018, vol. 38, pp. 226–231.
17. ISO 9001:2015 *Sistemy menedzhmenta kachestva. Trebovaniya* [Quality management systems - Requirements]. Moscow: Standartinform, 2020, 32 p. (In Russ.)
18. ISO 31000:2018 *Menedzhment riska. Printsipy i rukovodstvo* [Risk management – Guidelines]. Moscow: Standartinform, 2020, 20 p. (In Russ.)
19. ISO Guide 73:2009 *Menedzhment riska. Terminy i opredeleniya* [Risk management – Vocabulary]. Moscow: Standartinform, 2020, 16 p. (In Russ.)
20. GOST R 58771-2019 *Menedzhment riska. Tekhnologii otsenki riska* [Risk management. Risk assessment technologies]. Moscow: Standartinform, 2020, 86 p. (In Russ.)
21. GOST R 51901.21-2012 *Menedzhment riska. Reestr riska. Obshchie polozheniya* [Risk management. Risk register. General]. Moscow: Standartinform, 2020, 12 p. (In Russ.)
22. GOST R 51901.23-2012 *Menedzhment riska. Reestr riska. Rukovodstvo po otsenke riska opasnykh sobytiy dlya vklucheniya v reestr riska* [Risk management. Risk register. Guide on assessment of hazards risk for inclusion in risk register]. Moscow: Standartinform, 2020, 30 p. (In Russ.)

Поступила 20.08.2021; принята к публикации 08.09.2021; опубликована 24.12.2021
Submitted 20/08/2021; revised 08/09/2021; published 24/12/2021

Солдатов Валерий Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент, декан механико-технологического факультета, Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия.
Email: soldat-tu@bk.ru. ORCID 0000-0001-6318-5522

Вавилин Ярослав Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление качеством, стандартизация и метрология», Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия.
Email: vavilin@bk.ru. ORCID 0000-0002-7339-1730

Манкевич Игорь Геннадьевич – старший преподаватель кафедры «Управление качеством, стандартизация и метрология», Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия.
Email: mankevich05@mail.ru

Valery G. Soldatov – PhD (Eng.), Associate Professor, Dean of the Mechanics and Technology Faculty, Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia.
Email: soldat-tu@bk.ru. ORCID 0000-0001-6318-5522

Yaroslav A. Vavilin – PhD (Eng.), Associate Professor, Department of Quality Management, Standardization and Metrology, Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia.
Email: vavilin@bk.ru. ORCID 0000-0002-7339-1730

Igor G. Mankevich – Senior Lecturer, Department of Quality Management, Standardization and Metrology, Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia.
Email: mankevich05@mail.ru

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

УДК 658.562

DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-4-91-97



МЕТОД КОМПЛЕКСНОЙ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ S-ОБРАЗНЫХ КРИВЫХ

Наркевич М.Ю.

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

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). В условиях рыночной экономики промышленные предприятия с находящимися на них опасными производственными объектами часто являются объектами купли-продажи. При слиянии предприятий, смене собственника и т.п. проводится технический аудит предприятия, по результатам которого устанавливается его качественная оценка соответствия контролируемым параметрам. С целью получения количественной оценки промышленного предприятия (опасного производственного объекта), для принятия в дальнейшем обоснованного решения о сделке, необходима разработка метода комплексной оценки качества опасных производственных объектов. **Используемые методы.** При разработке метода комплексной количественной оценки качества опасных производственных объектов применялся теоретический метод исследования, включая методы регрессионного анализа в сочетании с методом наименьших квадратов. **Новизна.** Предложен метод комплексной количественной оценки качества материалов, изделий, конструкций зданий и сооружений, технических устройств, предприятий, на которых имеются опасные производственные объекты с использованием S-образных кривых. В основу предложенного метода положена кусочно-нелинейная зависимость в виде полинома нечетной степени, позволяющая количественно описывать процессы, происходящие под влиянием факторов с постоянным ускорением или замедлением. **Результат.** В рамках проведенного исследования получены основные математические зависимости метода комплексной количественной оценки качества материалов, изделий, конструкций зданий и сооружений, технических устройств, предприятий, на которых имеются опасные производственные объекты с использованием S-образных кривых. **Практическая значимость.** Реализация предложенного метода позволит получить количественную комплексную оценку качества материалов, изделий, конструкций зданий и сооружений, технических устройств, предприятий, на которых имеются опасные производственные объекты с использованием S-образных кривых, а его автоматизация позволит сократить время, необходимое для получения результатов и принятия более обоснованных управленческих решений.

Ключевые слова: количественная оценка качества продукции, квалиметрия, S-образная кривая, единичный показатель качества продукции, управление качеством продукции, технический аудит промышленного предприятия, опасный производственный объект.

© Наркевич М.Ю., 2021

Для цитирования

Наркевич М.Ю. Метод комплексной количественной оценки качества опасных производственных объектов с использованием S-образных кривых // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №4. С. 91–97. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-4-91-97>



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

METHOD OF A COMPREHENSIVE QUANTITATIVE ASSESSMENT OF THE QUALITY OF HAZARDOUS PRODUCTION FACILITIES USING S-SHAPED CURVES

Narkevich M.Yu.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). In a market economy, industrial enterprises with hazardous production facilities are often items of purchase and sale. In case of merger of enterprises, change of ownership and so on, a technical audit of the enterprise is carried out to determine its qualitative assessment of compliance with controlled parameters. In order to get a quantitative assessment of an industrial enterprise (hazardous production facility), in order to make an informed decision on the transaction in the future, it is necessary to develop a method for a comprehensive assessment of the quality of hazardous production facilities. **Methods used.** When developing a method for a comprehensive quantitative assessment of the quality of hazardous production facilities, a theoretical research method was used, including regression analysis methods combined with the least squares method. **Novelty.** The paper describes a proposed method of a comprehensive quantitative assessment of the quality of materials, products, structures of buildings and plants, technical devices, enterprises with hazardous production facilities, using S-shaped curves. The proposed method is based on a piecewise nonlinear dependence as an odd-degree polynomial, which allows us to quantitatively describe the processes occurring under the influence of factors with constant acceleration or deceleration. **Result.** The conducted research produced the main mathematical dependences of the comprehensive quantitative assessment method for the quality of materials, products, structures of buildings and plants, technical devices, enterprises with hazardous production facilities, using S-shaped curves. **Practical Relevance.** The proposed method will contribute to making a quantitative comprehensive assessment of the quality of materials, products, structures of buildings and plants, technical devices, enterprises with hazardous production facilities, using S-shaped curves, and its automation will reduce the time required to get results and make more informed management decisions.

Keywords: quantitative assessment of product quality, qualimetry, S-shaped curve, single indicator of product quality, product quality management, technical audit of an industrial enterprise, hazardous production facility.

For citation

Narkevich M.Yu. Method of a Comprehensive Quantitative Assessment of the Quality of Hazardous Production Facilities Using S-Shaped Curves. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021, vol. 19, no. 4, pp. 91–97. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-4-91-97>

Введение

Вопросы технического аудита крупных промышленных предприятий РФ являются необходимым условием как при смене собственников, так и при привлечении заемных средств для реконструкции, технического перевооружения и модернизации производства. При этом на территории промышленных предприятий находятся опасные производственные объекты: здания, сооружения и технические устройства. В соответствии с Федеральным законом № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» опасные производственные объекты – объекты повышенного риска, на которых возможно возникновение аварий и инцидентов, сопровождающихся разрушением зда-

ний, сооружений и (или) технических устройств, неконтролируемых: взрыве, выбросе опасных веществ, отказе или повреждении технических устройств, отклонении от установленного режима технологического процесса [1, 2].

В рамках технического аудита кредитор, настоящему или будущему собственнику необходимо обладать комплексными данными на текущий момент и на отдаленную перспективу: значение показателей производственной деятельности предприятия (производственная мощность предприятия, номенклатура и ассортимент выпускаемой продукции и др.), основных экономических показателей (выручка, капитальные расходы, операционные расходы, валовая прибыль, чистая прибыль, рентабельность и др.), состояние системы промышленной безопасности

и охраны труда, оценка воздействия производственного процесса на окружающую среду и др. К проведению аудита промышленного предприятия привлекаются соответствующие эксперты, обладающие специальными знаниями в конкретной области: технолог, экономист, механик, строитель, эколог, юрист, специалист по промышленной и иным видам безопасности и др. Каждый из них формирует заключение в рамках своего блока и дает ему качественную оценку. При этом эксперты не дают количественную оценку как единичного показателя качества (продукции, процесса или системы), так и комплексного показателя по каждому блоку в отдельности предприятия в целом.

В соответствии со статьей 132 ГК РФ. [3], предприятие – это имущественный комплекс, используемый для осуществления предпринимательской деятельности. Промышленное предприятие как имущественный комплекс признается недвижимостью. Предприятие в целом или его часть могут быть объектом купли-продажи, залога, аренды и других сделок, связанных с установлением, изменением и прекращением вещных прав. Таким образом, при определенных условиях промышленное предприятие, как и продукция, является объектом оценки качества.

Следует отметить, что межгосударственный стандарт ГОСТ 15467-79 «Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения» [4] не содержит понятие «продукция» и его определение. Вместе с тем термин «продукция» имеет достаточно обширное определение [5].

Действующие стандарты в области управления качеством не содержат указаний по комплексной оценке качества промышленного предприятия как целостной системы, состоящей из нескольких подсистем. В этом прослеживаются элементы системного подхода: промышленное предприятие представляется как система, состоящая из совокупности элементов, действующих вместе как целое и выполняющих этим определенную функцию.

Строго говоря, отсутствуют (не разработаны) показатели качества, в целом количественно определяющие значение комплексного показателя качества промышленного предприятия с опасными производственными объектами, а

также основные функциональные зависимости, применимые для комплексной оценки качества.

Полученные результаты и их обсуждение

Для разработки математической модели комплексной оценки качества промышленного предприятия с опасными производственными объектами используем классический аппарат квалиметрической оценки [6], основанный на использовании S-образных кривых. По сути, установление формы зависимости между переменными является задачей регрессионного анализа.

При комплексной оценке качества разнородной продукции промышленных предприятий, на которых имеются опасные производственные объекты, методом квалиметрии, применяются различные эмпирические и аналитические зависимости, характеризующие значение комплексной оценки при различных значениях выбранных параметров качества. Некоторые из них использованы в работах по оценке качества строительной продукции, продукции прокатного производства, метизной промышленности и др. [7–14].

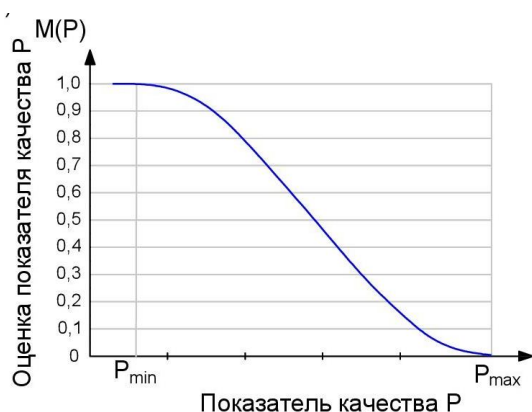
Исходными данными при этом являются: набор значений показателей качества p_1, p_2, \dots, p_n и соответствующая им комплексная оценка M .

Исходя из анализа применения различных математических моделей, установлено, что наиболее подходящим вариантом является S-образная кусочно-нелинейная зависимость, описываемая полиномом m -й степени от k факторов нечетной степени вида [15]:

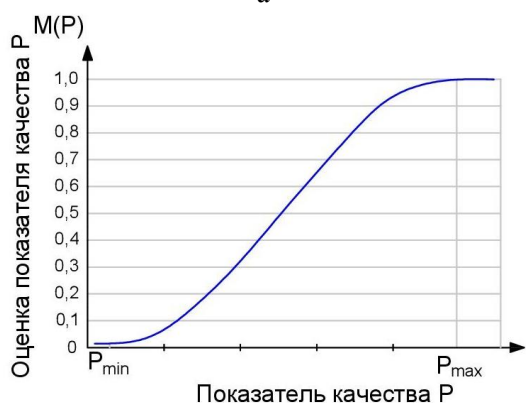
$$M(p_1, p_2, \dots, p_n) = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i p_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} p_i^2 + \sum_{i \neq j} b_{ij} p_i p_j + \dots, \quad (1)$$

где $M(p_1, p_2, \dots, p_n)$ – значение комплексной оценки качества; p_i – значение i -го показателя качества; b_0, b_1, \dots, b_i – эмпирические коэффициенты; n – количество показателей качества.

Схематичное изображение убывающей и возрастающей S-образной кусочно-нелинейной зависимости единичной оценки качества от значения выбранного единичного показателя p_i показано на **рис. 1, а** и **б** соответственно.



а



б

Рис. 1. Графическая интерпретация убывающей (а) и возрастающей (б) S-образной кусочно-нелинейной зависимости единичной оценки качества M от значения выбранного единичного показателя качества продукции p

Fig. 1. Graphical interpretation of decreasing (a) and increasing (б) S-shaped piecewise nonlinear dependence between single assessment of quality M and selected single indicator of product quality p

Используя основную идею и математический аппарат метода наименьших квадратов (МНК) – сумма квадратов отклонений между исходными значениями функции отклика и значений, рассчитанных по полученному уравнению регрессии, стремится к минимуму – имеем

$$S = \sum_{i=1}^n \left(M(p_1, p_2, \dots, p_n) - M(p_1, p_2, \dots, p_n) \right)^2 \rightarrow \min, \quad (2)$$

где S – сумма квадратов отклонений между исходными значениями функции отклика и значений, рассчитанных по полученному уравнению регрессии; $M(p_1, p_2, \dots, p_n)$ – исходное значение комплексной оценки качества; $M(p_1, p_2, \dots, p_n)$ – теоретическое (рассчитанные по уравнению регрессии) значение комплексной оценки качества; n – количество единичных показателей качества p_i .

Уравнение (2) после подстановки в него уравнения (1) приобретает вид

$$\sum_{i=1}^n \left(M(p_1, p_2, \dots, p_n) - \left(b_0 + \sum_{l=1}^k b_{il} p_{il} + \sum_{l=1}^k b_{ill} p_{il}^2 + \sum_{l \neq j} b_{ijl} p_{il} p_{jl} + \dots \right) \right)^2 \rightarrow \min. \quad (3)$$

Для определения минимума функции многих переменных определяем частные производные функционала (3) по неизвестным коэффициентам $b_0, b_i, b_{ii}, b_{ij}, \dots$:

$$\frac{dS}{db_0} = -2 \sum_{i=1}^n \left(M(p_1, p_2, \dots, p_n) - \left(b_0 + \sum_{l=1}^k b_{il} p_{il} + \sum_{l=1}^k b_{ill} p_{il}^2 + \sum_{l \neq j} b_{ijl} p_{il} p_{jl} + \dots \right) \right); \quad (4)$$

$$\frac{dS}{db_{il}} = -2 \sum_{i=1}^n \left[\left(M(p_1, p_2, \dots, p_n) - \left(b_0 + \sum_{l=1}^k b_{il} p_{il} + \sum_{l=1}^k b_{ill} p_{il}^2 + \sum_{l \neq j} b_{ijl} p_{il} p_{jl} + \dots \right) \right) \left(\sum_{l=1}^k p_{il} \right) \right]; \quad (5)$$

$$\frac{dS}{db_{ill}} = -2 \sum_{i=1}^n \left[\left(M(p_1, p_2, \dots, p_n) - \left(b_0 + \sum_{l=1}^k b_{il} p_{il} + \sum_{l=1}^k b_{ill} p_{il}^2 + \sum_{l \neq j} b_{ijl} p_{il} p_{jl} + \dots \right) \right) \left(\sum_{l=1}^k p_{il}^2 \right) \right]; \quad (6)$$

$$\frac{dS}{db_{ijl}} = -2 \sum_{i=1}^n \left[\left(M(p_1, p_2, \dots, p_n) - \left(b_0 + \sum_{l=1}^k b_{il} p_{il} + \sum_{l=1}^k b_{ill} p_{il}^2 + \sum_{l \neq j} b_{ijl} p_{il} p_{jl} + \dots \right) \right) \left(\sum_{l \neq j} p_{il} p_{jl} + \dots \right) \right]. \quad (7)$$

Приравняв частные производные $\frac{dS}{db_0}, \frac{dS}{db_{il}}, \frac{dS}{db_{ill}}, \frac{dS}{db_{ijl}}, \dots$ к нулю, выполнив ряд алгебраических преобразований, решаем систему нормальных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^n \left(M(p_1, p_2, \dots, p_n) - \left(b_0 + \sum_{l=1}^k b_{il} p_{il} + \sum_{l=1}^k b_{ill} p_{il}^2 + \sum_{l \neq j} b_{ilj} p_{il} p_{jl} + \dots \right) \right) = 0, \\ \sum_{i=1}^n \left[\left(M(p_1, p_2, \dots, p_n) - \left(b_0 + \sum_{l=1}^k b_{il} p_{il} + \sum_{l=1}^k b_{ill} p_{il}^2 + \sum_{l \neq j} b_{ilj} p_{il} p_{jl} + \dots \right) \right) \left(\sum_{l=1}^k p_{il} \right) \right] = 0, \\ \sum_{i=1}^n \left[\left(M(p_1, p_2, \dots, p_n) - \left(b_0 + \sum_{l=1}^k b_{il} p_{il} + \sum_{l=1}^k b_{ill} p_{il}^2 + \sum_{l \neq j} b_{ilj} p_{il} p_{jl} + \dots \right) \right) \left(\sum_{l=1}^k p_{il}^2 \right) \right] = 0, \\ \sum_{i=1}^n \left[\left(M(p_1, p_2, \dots, p_n) - \left(b_0 + \sum_{l=1}^k b_{il} p_{il} + \sum_{l=1}^k b_{ill} p_{il}^2 + \sum_{l \neq j} b_{ilj} p_{il} p_{jl} + \dots \right) \right) \left(\sum_{l \neq j} p_{il} p_{jl} + \dots \right) \right] = 0, \\ \dots \dots \dots = 0. \end{array} \right. \quad (8)$$

После дальнейших преобразований получим

$$\left\{ \begin{array}{l} nb_0 + \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^k b_{il} p_{il} + \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^k b_{ill} p_{il}^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{l \neq j} b_{ilj} p_{il} p_{jl} + \dots = \sum_{i=1}^n M(p_1, p_2, \dots, p_n), \\ b_0 + \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^k b_{il} p_{il} + \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^k b_{ill} p_{il}^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{l \neq j} b_{ilj} p_{il}^2 p_{jl} + \dots = \sum_{i=1}^n M(p_1, p_2, \dots, p_n) \sum_{l=1}^k p_{il}, \\ b_0 + \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^k p_{il}^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^k b_{il} p_{il}^3 + \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^k b_{ill} p_{il}^4 + \sum_{i=1}^n \sum_{l \neq j} b_{ilj} p_{il}^3 p_{jl} + \dots = \sum_{i=1}^n M(p_1, p_2, \dots, p_n) \sum_{l=1}^k p_{il}^2, \\ b_0 + \sum_{i=1}^n \sum_{l \neq j} p_{il} p_{jl} + \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^k b_{il} p_{il} \sum_{l \neq j} p_{il} p_{jl} + \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^k b_{ill} p_{il}^2 \sum_{l \neq j} p_{il} p_{jl} + \\ + \sum_{i=1}^n \sum_{l \neq j} b_{ilj} p_{il} p_{jl} \sum_{l \neq j} p_{il} p_{jl} + \dots = \sum_{i=1}^n M(p_1, p_2, \dots, p_n) \sum_{l \neq j} p_{il} p_{jl}, \\ \dots \dots \dots \end{array} \right. \quad (9)$$

Для решения данного уравнения воспользуемся приемами матричной алгебры, приведенными, например, в [16].

Запишем уравнение (9) в матричном виде: $M = PB$, (10)

$$M = \left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^n M(p_1, p_2, \dots, p_n) \\ \sum_{i=1}^n M(p_1, p_2, \dots, p_n) \sum_{l=1}^k p_{il} \\ \sum_{i=1}^n M(p_1, p_2, \dots, p_n) \sum_{l=1}^k p_{il}^2 \\ \sum_{i=1}^n M(p_1, p_2, \dots, p_n) \sum_{l \neq j} p_{il} p_{jl} \\ \dots \end{array} \right\}, \quad (11)$$

$$P = \left\{ \begin{array}{cccccc} n & \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^k p_{il} & \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^k p_{il}^2 & \sum_{i=1}^n \sum_{l \neq j} p_{il} p_{jl} & \dots \\ \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^k p_{il} & \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^k p_{il}^2 & \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^k p_{il}^3 & \sum_{i=1}^n \sum_{l \neq j} p_{il}^2 p_{jl} & \dots \\ \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^k p_{il}^2 & \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^k p_{il}^3 & \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^k p_{il}^4 & \sum_{i=1}^n \sum_{l \neq j} p_{il}^3 p_{jl} & \dots \\ \sum_{i=1}^n \sum_{l \neq j} p_{il} p_{jl} & \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^k \sum_{l \neq j} p_{il}^2 p_{jl} & \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^k \sum_{l \neq j} p_{il}^3 p_{jl} & \sum_{i=1}^n \sum_{l \neq j} \sum_{l \neq j} p_{il}^2 p_{jl}^2 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{array} \right\}, \quad (12)$$

$$B = \left\{ \begin{array}{c} b_0 \\ \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^k b_{il} \\ \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^k b_{ill} \\ \sum_{i=1}^n \sum_{l \neq j}^k b_{ilj} \\ \dots \end{array} \right\}. \quad (13)$$

Искомая матрица коэффициентов математической модели в виде полинома m -й степени от k факторов определяется по формуле

$$B = P^{-1}M, \quad (14)$$

где P^{-1} – матрица, обратная для матрицы P .

Следует отметить при этом, что регрессия (1), нелинейная по включенным переменным, может быть сведена к линейному виду с помощью методов линеаризации простой заменой переменных, а дальнейшая оценка параметров выполнена с помощью МНК.

Заключение

Предложен метод комплексной оценки качества материалов, изделий, конструкций зданий и сооружений, технических устройств, предприятий, на которых имеются опасные производственные объекты с использованием S -образных кривых. В основу предложенного метода положена кусочно-нелинейная зависимость в виде полинома нечетной степени, позволяющая количественно описывать процессы, происходящие под влиянием факторов с постоянным ускорением или замедлением.

Практическая реализация предложенного метода позволит получить количественную комплексную оценку качества материалов, изделий, конструкций зданий и сооружений, технических устройств, предприятий, на которых имеются опасные производственные объекты с использованием S -образных кривых, а его автоматизация позволит сократить время, необходимое для получения результатов.

Список литературы

1. Федеральный закон от 21.07.1997 № 116-ФЗ (ред. от 11.06.2021) «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» // Собрание законодательства Российской Федерации, № 30, 28.07.97, ст. 3588. Российская газета, № 145, 30.07.97

2. Анализ эффективности существующей системы оценки качества материалов, изделий и конструкций на опасных производственных объектах / Наркевич М.Ю., Корниенко В.Д., Логунова О.С., Полякова М.А., Извеков Ю.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №2. С. 103–111.
3. Гражданский кодекс Российской Федерации (часть первая) (с изменениями на 26 октября 2021 года): Федеральный закон от 30 ноября 1994 № 51-ФЗ // Собрание законодательства Российской Федерации, № 32, 05.12.1994, ст. 3301. Российская газета, № 238–239, 08.12.1994.
4. ГОСТ 15467-79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения (с изменением № 1). М.: Стандартиформ, 2009. 22 с.
5. Большой толковый словарь русского языка / гл. ред. С.А. Кузнецов. 1-е изд.: СПб.: Норинт, 1998.
6. Азгальдов Г.Г. Количественная оценка качества (Квалиметрия). Библиография. М.: Изд-во стандартов, 1971. 176 с.
7. ГОСТ 4.200-78. Система показателей качества продукции (СПКП). Строительство. Основные положения (с изменением № 1). М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. 6 с.
8. Качество материалов, изделий и конструкций в промышленной безопасности: эмпирическая основа / Наркевич М.Ю., Логунова О.С., Корниенко В.Д., Николаев А.А., Тюлюмов А.Н., Злыдарев Н.В., Дерябин Д.И. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №3. С. 90–101.
9. Рубин Г.Ш., Касаткина Е.Г. S -образная математическая модель единичной оценки качества // Качество в обработке материалов. 2014. № 2 (2). С. 74–81.
10. Об оценке качества единичного показателя продукции / Наркевич М.Ю., Рубин Г.Ш., Ильина Е.А., Кузнецов А.Ю. // Ab ovo ... (С самого начала ...): сб. науч. тр. Магнитогорск, 2019. С. 85.
11. Квалиметрический метод оценки качества объектов металлургического предприятия / Извеков Ю.А., Наркевич М.Ю. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2021. Т. 23. № 2 (100). С. 42–45.
12. Наркевич М.Ю. Проблемы контроля и оценки качества при изготовлении и монтаже стальных строительных конструкций зданий и сооружений // Архитектура. Строительство. Образование. 2012. № 1. С. 130–137.
13. Наркевич М.Ю., Ильина Е.А., Мехонцев А.А. Оценка единичного показателя качества продукции на основе S -образных логистических кривых // Перспективы науки. 2020. № 6 (129). С. 54–57.
14. Qualimetric Unit Quality Estimation: свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019660512, 07.08.2019 / Наркевич М.Ю., Рубин Г.Ш., Гун Г.С., Ильина Е.А., Кузнецов А.Ю. Заявка № 2019619196 от 29.07.2019.

15. Баженов Ю.М., Вознесенский В.А. Перспективы применения математических методов в технологии сборного железобетона. М.: Стройиздат, 1974. 192 с.
16. Логунова О.С., Романов П.Ю., Ильина Е.А. Обработка экспериментальных данных на ЭВМ: учебник. 2-е изд., испр. и доп. Москва: ИНФРА-М, 2021. 377 с.

References

1. Federal Law No. 116-FZ dated July 21, 1997 (as amended on June 11, 2021) "On industrial safety of hazardous production facilities". Collection of Legislative Acts of the Russian Federation, no. 30, 28.07.97, Article 3588. *Rossiyskaya Gazeta*, no. 145, 30.07.97
2. Narkevich M.Yu., Kornienko V.D., Logunova O.S., Polyakova M.A., Izvekov Yu.A. Analysis of efficiency of the existing quality assessment system for materials, products and structures at hazardous production facilities. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2021, vol. 19, no. 2, pp. 103–111. (In Russ.)
3. The Civil Code of the Russian Federation (Part One) (as amended on October 26, 2021): Federal Law No. 51-FZ dated November 30, 1994. Collection of Legislative Acts of the Russian Federation, no. 32, 05.12.1994, Article 3301. *Rossiyskaya Gazeta*, no. 238-239, 08.12.1994.
4. GOST 15467-79. *Upravlenie kachestvom produktsii. Osnovnye ponyatiya. Terminy i opredeleniya* [Product quality management. Basic concepts. Terms and definitions (including amendment No. 1)]. Moscow: Standartinform, 2009, 22 p. (In Russ.)
5. Kuznetsov S.A. *Bolshoi tolkovyi slovar russkogo yazyka* [The large explanatory dictionary of the Russian language]. St. Petersburg: Norint, 1998. (In Russ.)
6. Azgaldov G.G. *Kolichestvennaya otsenka kachestva (Kvalimetriya). Bibliografiya* [Quantitative assessment of quality (Qualimetry). Bibliography]. Moscow: Publishing House of Standards, 1971, 176 p. (In Russ.)
7. GOST 4.200-78. *Sistema pokazatelei kachestva produktsii (SPKP). Stroitelstvo. Osnovnye polozheniya* [System of product quality indicators (SPQI). Construction. Basic provisions (including amendment No. 1)]. Moscow: IPK Publishing House of Standards, 2003, 6 p. (In Russ.)
8. Narkevich M.Yu., Logunova O.S., Kornienko V.D., Nikolaev A.A., Tyulyumov A.N., Zlydarev N.V., Deryabin D.I. Quality of materials, products and structures in industrial safety: An empirical basis. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2021, vol. 19, no. 3, pp. 90–101. (In Russ.)
9. Rubin G.Sh., Kasatkina E.G. S-shaped mathematical model of a single quality assessment. *Kachestvo v obrabotke materialov* [Quality in Materials Processing], 2014, no. 2 (2), pp. 74–81. (In Russ.)
10. Narkevich M.Yu., Rubin G.Sh., Ilina E.A., Kuznetsov A.Yu. On the assessment of the quality of a single indicator of products. *Ab ovo ...: Collection of scientific papers*. Magnitogorsk, 2019, p. 85. (In Russ.)
11. Izvekov Yu.A., Narkevich M.Yu. A qualimetric method for assessing the quality of metallurgical facilities. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk* [Izvestiya of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2021, vol. 23, no. 2 (100), pp. 42–45. (In Russ.)
12. Narkevich M.Yu. Problems of quality control and assessment, when manufacturing and installing steel structures of buildings and plants. *Arkhitktura. Stroitelstvo. Obrazovanie* [Architecture. Construction. Education], 2012, no. 1, pp. 130–137. (In Russ.)
13. Narkevich M.Yu., Ilina E.A., Mekhontsev A.A. Assessment of a single indicator of product quality based on S-shaped logistic curves. *Perspektivy nauki* [Prospects of Science], 2020, no. 6 (129), pp. 54–57. (In Russ.)
14. Narkevich M.Yu., Rubin G.Sh., Gun G.S., Ilina E.A., Kuznetsov A.Yu. Qualimetric Unit Quality Estimation. Certificate of registration of the computer program RU 2019660512, 07.08.2019. Application No. 2019619196 dated 29.07.2019.
15. Bazhenov Yu.M., Voznesensky V.A. *Perspektivy primeneniya matematicheskikh metodov v tekhnologii sbornogo zhelezobetona* [Prospects for the application of mathematical methods in precast reinforced concrete technology]. Moscow: Stroyizdat, 1974, 192 p. (In Russ.)
16. Logunova O.S., Romanov P.Yu., Ilina E.A. *Obrabotka eksperimentalnykh dannykh na EVM: uchebnik* [Processing of experimental data on a computer: Textbook]. Moscow: INFRA-M, 2021, 377 p. (In Russ.)

Поступила 10.11.2021; принята к публикации 30.11.2021; опубликована 24.12.2021
Submitted 10/11/2021; revised 30/11/2021; published 24/12/2021

Наркевич Михаил Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования зданий и строительных конструкций, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: Narkevich_MU@mail.ru. ORCID 0000-0001-6608-8293

Mikhail Yu. Narkevich – PhD (Eng.), Associate Professor, the Department of Design of Buildings and Building Structures, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: Narkevich_MU@mail.ru. ORCID 0000-0001-6608-8293

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ NEW TECHNOLOGICAL PROCESSES AND EQUIPMENT

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

УДК 621.92

DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-4-98-106



ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ НЕЖЕСТКОГО ВАЛА С ЭЛЛИПСНЫМ ПРОФИЛЕМ ПРИ КРУГЛОМ ВРЕЗНОМ ШЛИФОВАНИИ

Акинцева А.В., Переверзев П.П., Дегтярева-Кашутин А.С.

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Прогнозирование точности обработки на стадии проектирования операции шлифования с ЧПУ в цифровой среде является актуальной задачей в силу отсутствия у различных производителей САПР инструмента, позволяющего контролировать управляющие программы на возможность обеспечения заданной точности обработки при изготовлении партии деталей. Для решения данной задачи предложено использовать цифровой двойник формообразования обрабатываемой поверхности, который позволяет прогнозировать погрешности обработки по расчетным значениям радиусов в конце цикла круглого врезного шлифования с учетом влияния переменных технологических факторов. В данной статье представлена модель формообразования радиусов шлифуемой поверхности, позволяющая вести расчет переменной глубины резания на всех участках обрабатываемой поверхности на каждом обороте заготовки в зависимости от податливости каждого участка вала по всей длине шлифования с учетом колебания припуска и затупления шлифовального круга. Внедрение цифрового двойника позволит решить задачу прогнозирования точности обработки на стадии проектирования операции шлифования с ЧПУ. Представленные в статье модели получены на основе имитационного моделирования с использованием аналитических методов математического моделирования, базирующихся на фундаментальных физических законах и основных положениях механики резания и теории пластической деформации металла в зоне стружкообразования. Научная новизна приведенных в данной статье исследований заключается в разработке цифрового двойника формообразования обрабатываемой поверхности нежесткого вала с эллипсным профилем, который впервые учитывает взаимосвязь и влияние на точность обработки глубины резания, режимов резания, физико-механических свойств обрабатываемого металла, силы резания, упругих деформаций технологической системы, кинематики процесса круглого врезного шлифования, геометрии зоны резания, колебания припуска, затупления круга, переменной жесткости вала по длине обработки. В результате в статье представлена часть разработанного впервые методологического и математического обеспечения для цифрового двойника формообразования обрабатываемой поверхности. Применение цифрового двойника формообразования обрабатываемой поверхности в производстве имеет большую практическую значимость, так как позволяет вести автоматизированный контроль управляющих программ для станков с ЧПУ на возможность обеспечения достигнутой точности обработки при изготовлении партии деталей.

Ключевые слова: круглое врезное шлифование, цифровой двойник, погрешность обработки, формообразование обрабатываемой поверхности, переменные условия обработки.

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

© Акинцева А.В., Переверзев П.П., Дегтярева-Кашутин А.С., 2021

Для цитирования

Акинцева А.В., Переверзев П.П., Дегтярева-Кашутин А.С. Цифровой двойник формообразования обрабатываемой поверхности нежесткого вала с эллипсным профилем при круглом врезном шлифровании // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №4. С. 98–106. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-4-98-106>



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

DIGITAL TWIN OF A SHAPING PROCESS FOR A SURFACE OF A NON-RIGID SHAFT WITH AN ELLIPTICAL PROFILE PROCESSED BY PLUNGE GRINDING

Akintseva A.V., Pereverzev P.P., Degtyareva-Kashutina A.S.

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. Predicting the processing accuracy at the design stage of a CNC grinding operation in digital environment is a currently important task due to the lack of a tool for various CAD manufacturers to monitor control programs for ensuring the specified processing accuracy when manufacturing a batch of parts. To cope with this task, it is proposed to use a digital twin of the shaping process of the machined surface, which makes it possible to predict machining errors by the calculated values of the radii at the end of the cylindrical plunge grinding cycle, taking into account the influence of variable technological factors. This paper presents a model for shaping the radii of the ground surface to calculate the variable depth of cut in all sections of the machined surface at each turn of the workpiece, depending on the compliance of each section of the shaft along the entire length of grinding, taking into account the fluctuations of the allowance and bluntness of the grinding wheel. The introduction of a digital twin contributes to dealing with the task of predicting the processing accuracy at the design stage of a CNC grinding operation. The models presented in the paper are developed by a simulation modeling using analytical methods of mathematical modeling based on fundamental physical laws and basic provisions of cutting mechanics and the theory of plastic deformation of metal in the chip formation zone. Scientific novelty of the studies presented in this paper lies in the development of a digital twin of the shaping process for a machined surface of a non-rigid shaft with an elliptical profile, factoring into the relationship, and influence on the accuracy of machining the depth of cut, cutting conditions, physical and mechanical properties of the metal being processed, cutting force, elastic deformations of the technological system, kinematics of the cylindrical plunge grinding process, geometry of the cutting zone, fluctuations of the allowance, bluntness of the wheel, and variable rigidity of the processed shaft along its length. As a result, the paper presents a part of the novel methodological and mathematical support for the digital twin of the shaping of the processed surface. The industrial use of the digital twin of the shaping of the processed surface is of great practical importance, because it contributes to the automated monitoring of control programs for CNC machines to ensure the achievable processing accuracy, when manufacturing a batch of parts.

Keywords: cylindrical plunge grinding, digital twin, machining error, shaping process of the machined surface, variable machining conditions.

The performed research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (grant No. FENU-2020-0020).

For citation

Akintseva A.V., Pereverzev P.P., Degtyareva-Kashutina A.S. Digital twin of a shaping process for a surface of a non-rigid shaft with an elliptical profile processed by plunge grinding. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021, vol. 19, no. 4, pp. 98–106. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-4-98-106>

Введение

Все более широкое использование на машиностроительных предприятиях различного профиля станков с ЧПУ поставило перед технологиями сложную задачу подготовки множества управляющих программ (УП) в цифровой среде различных САМ-систем. На данный момент в САМ-системах отсутствует возможность контроля проектируемых УП на обеспечение точности и качества обработки. В результате возникает необходимость адаптации УП к реальным производственным условиям через ручной под-

бор режимных параметров методом обработки ряда пробных заготовок. Это накладывает дополнительные временные и материальные затраты на себестоимость выпускаемой продукции.

Прогнозирование точности для лезвийной обработки рассматривалась во множестве работ [1–6], лидирующим направлением которых является учет влияния прогиба инструмента и геометрического отклонения конструкции станка через консольную балочную модель режущего инструмента и метод конечных элементов режущего инструмента и заготовки. Общим недостатком указанных выше работ является отсутствие возмож-

ности прогнозирования и оценки точности обработки заготовки, так как отсутствует комплексное моделирование результата формообразования на протяжении всего процесса обработки.

Шлифование является окончательной операцией при изготовлении точных деталей (кавалитет 6–7 и шероховатость по Ra 0,05–1,6), определяющей окончательные размеры обрабатываемой поверхности и выполнение требований чертежа по точности и качеству. Примерно половину от общего объема шлифовальных операций составляет круглое шлифование, к которому задаются не только допуски на диаметральные размеры, но допуски формы и расположения поверхностей. Прогнозирование последних является сложной задачей, так как требует расчета изменения размеров с учетом переменной податливости по всей длине обрабатываемой поверхности.

В области шлифования большинство работ, посвященных прогнозированию точности обработки, рассматривают вопросы моделирования получаемого микрорельефа и волнистости обрабатываемой поверхности (шероховатости) [7–9]. Незначительная доля работ посвящена моделированию и прогнозированию точности шлифования [10, 11], общим недостатком является то, что рассматривалась обработка «идеальных поверхностей» (абсолютно круглые или плоские поверхности) без учета упругих деформаций технологической системы (ТС). В результате проведенного анализа можно сказать, что прогнозирование точности обработки на операциях механической обработки (в том числе и шлифовании) является сложной и до сих пор полностью не решенной научной задачей.

Переменная податливость ТС по длине обрабатываемой поверхности является решающим фактором, напрямую воздействующим на точность обработки. Из-за действия радиальной составляющей силы резания происходит неравномерный прогиб участков вала относительно шлифовального круга. Это и определяет различную глубину резания, разные значения обрабатываемой поверхности, погрешность размеров, формы и расположения всей обработанной поверхности вала. Учитывая ступенчатое изменение программной подачи и нелинейное изменение фактической подачи и силы резания по длине обрабатываемой поверхности из-за переменной податливости ТС, можно предположить, что глубина резания будет изменяться по длине обработки на каждом обороте заготовки. Поэтому для прогнозирования точности обработки на

основании расчетных значений размеров шлифованной поверхности предложена модель одновременного расчета переменной глубины резания на всех участках обрабатываемой поверхности на каждом обороте заготовки, в зависимости от податливости каждого участка вала по всей длине шлифования. Совокупность переменных глубин резания по всей длине шлифования образует слой снимаемого металла в каждый момент времени. Модель расчета послойного съема металла представляет собой «цифровой двойник» процесса круглого шлифования, который симулирует процесс съема слоя металла переменной толщины (толщина слоя равна глубине резания) одновременно по длине шлифуемой поверхности на каждом обороте заготовки с учетом переменной податливости ТС и переменной глубины резания по длине обрабатываемой поверхности при заданных условиях шлифования.

Цифровой двойник позволяет проводить расчет текущих значений параметров формообразования поверхности, описывающих текущие значения размеров шлифуемой поверхности в течение всего цикла шлифования, и прогнозировать размеры обработанной поверхности вала в конце цикла шлифования путем суммирования толщин слоев съема металла. Цикл шлифования представляет собой ступенчатое изменение режимов резания в зависимости от оставшейся части припуска. Применение цикла позволяет использовать весь диапазон режимов резания и сочетать при обработке заготовки различные стадии (черновую, получистовую и чистовую) [12]. Результатом применения цифрового двойника процесса круглого шлифования являются расчетные значения колебания радиусов обработанной поверхности вала в разных сечениях вала по длине обработки, по которым можно рассчитать погрешность обработки.

Отметим также, что колебание припуска является обязательным фактором, который необходимо учитывать при прогнозировании погрешности обработки партии деталей. В предложенной модели расчета глубины резания колебания припуска учитываются путем шлифования некруглой заготовки эллипсного профиля. Профиль заготовки описывается несколькими радиусами, что позволяет учесть промежуточные значения колебания припуска в его диапазоне варьирования. Такое моделирование гораздо ближе к практике шлифования, так как не бывает абсолютно круглых заготовок.

Таким образом, решение задачи прогнозирования точности обработки возможно при помо-

щи цифрового двойника операции круглого врезного шлифования с ЧПУ, созданного на основе системного моделирования множества взаимосвязанных широкодиапазонных аналитических моделей процессов в единую модель расчета значений фактических подач, силы резания и точности обработки с учетом основных технологических факторов. Рассмотрим основные этапы создания цифрового двойника операции круглого врезного шлифования вала с эллипсным профилем и с переменной податливостью по длине.

Полученные результаты и их обсуждение

Для упрощения примем, что заготовка имеет одинаковый исходный эллипсный профиль во всех сечениях обрабатываемой поверхности вала. Эллипсный профиль описывается четырьмя радиусами. Поэтому каждый оборот заготовки разделен на четыре части и глубина резания будет рассчитываться через каждую четверть оборота на соответствующем радиусе эллипса (рис. 1). Моделировать процесс шлифования эллипсной заготовки начнем с момента касания ее первого радиуса $R_{c,j=1,n=1}$ поверхностью круга.

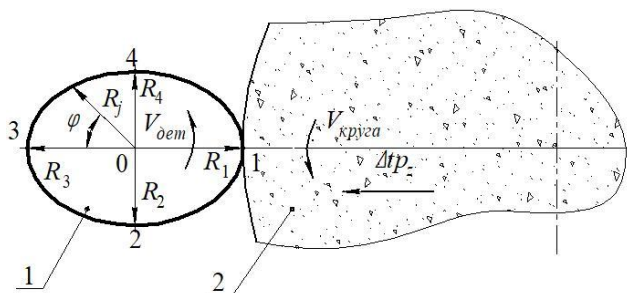


Рис. 1. Начало процесса шлифования с момента касания круга наибольшим радиусом R_1 эллипсной заготовки: 1 – заготовка с эллипсным профилем; 2 – шлифовальный круг

Fig. 1. The beginning of the grinding process, when the wheel contacts the largest radius R_1 of the elliptical workpiece: 1 is a workpiece with an elliptical profile; 2 is a grinding wheel

На рис. 2 приведена схема расчета программной и фактической подачи при шлифовании нежесткой заготовки эллипсного профиля.

Исходное радиальное биение заготовки $\Delta R_{\text{заг},c,j}$ принимаем как разность между максимальным радиусом $\Delta R_{\text{заг},\text{max}}$ заготовки и текущим радиусом $R_{\text{заг},c,j}$ в сечении вала, она находится внутри диапазона чертежного радиусного допуска $TR_{\text{заг}}$ заготовки, то есть $0 \leq \Delta R_{\text{заг},c,j} \leq TR_{\text{заг}}$.

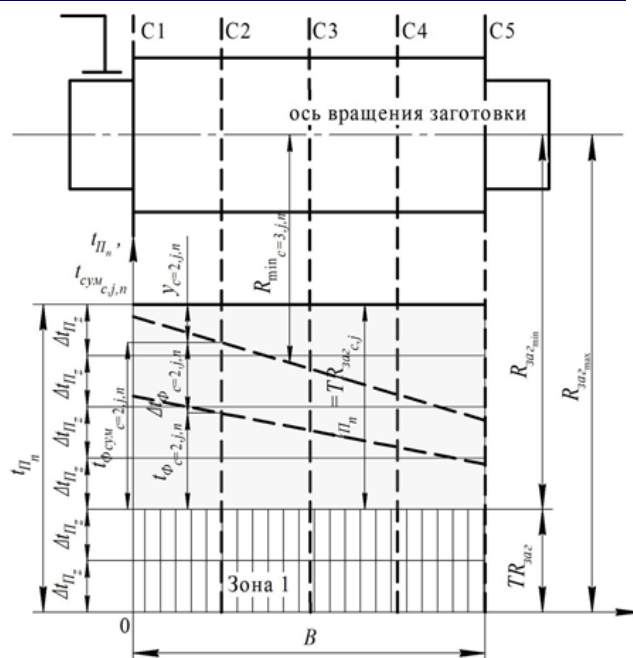


Рис. 2. Схема расчета программной и фактической подачи при шлифовании нежесткой заготовки эллипсного профиля: зона 1 – зона исходного радиального биения эллипсного профиля диаметра заготовки (диапазон колебания зазора между кругом и заготовкой, когда исходное радиальное биение эллипсной заготовки больше накопленной программной подачи)

Fig. 2. Scheme for calculating the programmed and actual feeds when grinding a non-rigid workpiece with an elliptical profile: zone 1 is a zone of the initial radial runout of the elliptical profile of the workpiece diameter (the range of oscillation of the gap between the wheel and the workpiece when the initial radial runout of the elliptical workpiece is greater than the accumulated programmed feed)

Поэтому из-за наличия переменного исходного радиального биения между кругом и заготовкой возникает зазор, изменяющийся от 0 до $TR_{\text{заг}}$ на разных радиусах эллипсного профиля заготовки, когда исходное радиальное биение $\Delta R_{\text{заг},c,j}$ заготовки больше текущего значения программной подачи $\Delta t_{п,n}$. В этом случае происходит «шлифование воздуха», и глубина резания $\Delta t_{ф,c,j,n}$ принимается равной нулю. Пока программная подача $t_{п,n}$ не превысит величину зазора $\Delta R_{\text{заг},c,j}$, фактические скорости подачи равны нулю $\Delta t_{ф,c,j,n} = 0$.

Тогда математическое условие возникновения зазора можно записать в следующем виде:

$$\Delta t_{ф,c,j,n} = 0 \text{ при } t_{п,n} \leq \Delta R_{\text{заг},c,j}. \quad (1)$$

Следовательно, шлифование начнется, когда выполнится условие

$$t_{\Pi_n} = \sum_1^n \Delta t_{\Pi_z} > \Delta R_{\text{заг}_{c,j}}, \quad (2)$$

где c – порядковый номер сечения; j – порядковый номер радиуса в c -м сечении; n – порядковый номер оборота на z -й ступени; z – порядковый номер ступени в цикле; $\Delta t_{\Phi_{c,j,n}}$ – глубина

резания (фактическая скорость подачи за оборот) в c -м сечении на j -м радиусе n -м обороте заготовки, мм; t_{Π_n} – программная подача за n -м оборотом заготовки; $\Delta R_{\text{заг}_{c,j}}$ – исходное радиальное биение заготовки, мм; Δt_{Π_z} – программная врезная подача, мм/об.

Рассмотрим взаимосвязь скоростей программной и фактической подач через баланс накопленных подач и упругой деформации технологической системы за оборот заготовки (см. **рис. 2**). Исходная заготовка имеет эллипсный профиль во всех сечениях с исходным радиальным биением в пределах чертежного допуска на радиус детали $TR_{\text{заг}}$. Ось радиусов заготовки изображена в верхней части **рис. 2** и является неподвижной, в то время как режущая кромка круга перемещается на величину программной подачи Δt_{Π_z} и величины упругих деформаций $y_{c,j,n}$.

В соответствии с расчетной схемой на **рис. 2** запишем баланс подач и упругих перемещений с учетом колебания радиусов эллипсного профиля заготовки $\Delta R_{\text{заг}_{c,j}}$ в следующем виде (при выполнении условия (1)):

$$t_{\Pi_n} - \Delta R_{\text{заг}_{c,j}} = y_{c,j,n} + \Delta t_{\Phi_{c,j,n}} + t_{\Phi_{c,j,n}}, \quad (3)$$

где $t_{\Phi_{c,j,n}}$ – накопленная фактическая подача за предыдущие обороты (часть снятого припуска на сторону за предыдущие обороты) на j -м радиусе в c -м сечении за $(n-1)$ оборотов заготовки, мм; $y_{c,j,n}$ – величины упругих деформаций, мм,

$$y_{c,j,n} = \gamma_c P_{Y_{j,n}}, \quad (4)$$

где $P_{Y_{j,n}}$ – радиальная составляющая силы резания на j -м радиусе и n -м обороте заготовки, Н; γ_c – податливость технологической системы в c -м сечении, Н/мм.

Решая уравнение (3) относительно $\Delta t_{\Phi_{c,n}}$, получим

$$\Delta t_{\Phi_{c,j,n}} = t_{\Pi_n} - \Delta R_{\text{заг}_{c,j}} - \gamma_c P_{Y_{j,n}} - t_{\Phi_{c,j,n}}. \quad (5)$$

Формула (5) представляет собой математическую модель расчета текущего значения глубины резания (фактической скорости подачи) $\Delta t_{\Phi_{c,j,n}}$ на каждом n -м обороте и в каждом сечении обрабатываемой поверхности заготовки с эллипсным профилем при известном значении общей радиальной силы резания $P_{Y_{j,n}}$ и величин податливости γ_c в каждом сечении вала.

Для расчета по формуле (5) текущего значения глубины резания необходимо знать значение суммарной силы резания $P_{Y_{j,n}}$, так как расчет упругой деформации $y_{c,j,n}$ в каждом сечении вала ведется по формуле (4) в зависимости от $P_{Y_{j,n}}$. Расчет суммарной силы резания $P_{Y_{j,n}}$ ведется по формулам, полученным в работе [13]:

$$P_{Y_n} = K_3 \Delta t_{\Phi_{m_n}} + K_4 \sqrt{\Delta t_{\Phi_{m_n}}}, \quad (6)$$

$$K_3 = \pi d B n \frac{\sigma_i \varepsilon_i \tan \beta}{V_{\text{круга}}}; K_4 = \eta B \frac{\sigma_i}{3} \sqrt{\frac{dD}{d+D}}, \quad (7)$$

где $\Delta t_{\Phi_{m_n}}$ – средняя (по длине обрабатываемой поверхности) скорость фактической подачи на z -й ступени цикла и n -м обороте заготовки за оборот заготовки, мм/об; $t_{\Phi_{m_n}}$ – сумма подач $\Delta t_{\Phi_{m_n}}$ за предыдущие $(n-1)$ оборотов заготовки; σ_i – интенсивность напряжений в движущемся объеме металла, характеризующая сопротивление металла пластической деформации при степени, скорости деформации и температуре, присущих процессу шлифования; ε_i – интенсивность скорости деформации объема металла в зоне сдвига, 1/с; η – степень затупления шлифовального круга, равная относительной опорной поверхности круга по площадкам затупления зерен [14]; d – диаметр обрабатываемой поверхности заготовки, мм; D – диаметр шлифовального круга, мм; B – ширина обрабатываемой поверхности заготовки, мм; $V_{\text{круга}}$ – скорость вращения круга, м/с; n – частота вращения заготовки, мм/мин.

Из формулы (6) видно, что расчет суммарной силы резания $P_{Y_{j,n}}$ ведется в зависимости от средней глубины резания $\Delta t_{\Phi m_n}$ на каждом обороте заготовки, рассчитанной при средней податливости ТС γ_m . После совместного решения уравнений (5)-(7) относительно $\Delta t_{\Phi m_n}$ получим:

$$\Delta t_{\Phi m_n} = \left[\frac{-\gamma_m K_4}{2(1 + K_3 \gamma_m)} + \sqrt{\left[\frac{\gamma_m K_4}{2(1 + K_3 \gamma_m)} \right]^2 + \frac{t_{\Pi_n} - \Delta R_{\text{заг},c,j} - t_{\Phi m_n}}{1 + K_3 \gamma_m}} \right],$$

при $n = 1, t_{\Phi m_n} = 0$. (8)

Формула (8) представляет собой математическую модель расчета средней скорости фактической подачи $\Delta t_{\Phi m_n}$ при средней податливости ТС в течение всего автоматического цикла круглого врезного шлифования с ЧПУ на каждом n -м обороте заготовки с минимальным припуском в зависимости от основных технологических факторов.

Рассмотрим методику расчета глубин резания $\Delta t_{\Phi_{c,j,n}}$ во всех сечениях вала:

1) по формуле (8) рассчитываем среднюю глубину резания $\Delta t_{\Phi m_n}$ при выполнении условия (1). В противном случае принимаем $\Delta t_{\Phi m_n} = 0$;

2) по формуле (6) рассчитываем силу резания $P_{Y_{j,n}}$ в зависимости от величины $\Delta t_{\Phi m_n}$;

3) при выполнении условия (1) рассчитываем глубину резания $\Delta t_{\Phi_{\text{ПАК},j,n}}$ в сечении установки ПАК на текущем обороте заготовки по формуле (9) при $\gamma_{\text{ПАК}}$:

$$\Delta t_{\Phi_{\text{ПАК},j,n}} = t_{\Pi_n} - \Delta R_{\text{заг},c,j} - \gamma_{\text{ПАК}} P_{Y_{j,n}} - t_{\Phi_{\text{ПАК},j,n}}, \quad (9)$$

где $t_{\Phi_{\text{ПАК},j,n}}$ – сумма глубин резания в сечении установки ПАК за $(n-1)$ оборотов заготовки; $\gamma_{\text{ПАК}}$ – податливость технологической системы в сечении, где установлен ПАК;

4) вычисляем глубины резания $\Delta t_{\Phi_{c,j,n}}$ по формуле (5) во всех сечениях вала на текущем обороте заготовки;

5) вычисляем величину снятого припуска с радиусов заготовки во всех сечениях на текущем обороте заготовки:

$$t_{\Phi_{\text{сум},c,j,n}} = \Delta R_{\text{заг},c,j} + \sum_1^n t_{\Phi_{c,j,n}}, \quad (10)$$

$$t_{\Phi_{c,j,n}} = \sum_1^{n-1} \Delta t_{\Phi_{c,j,n}}, \quad (11)$$

где $t_{\Phi_{\text{сум},c,j,n}}$ – накопленная фактическая подача (часть снятого припуска на сторону) в c -м сечении на j -м радиусе за n -й оборот заготовки, мм; $t_{\Phi_{c,j,n}}$ – часть припуска (на радиус), снятого за предыдущие $(n-1)$ оборота заготовки, мм.

6) вычисляем текущее значение радиуса $R_{c,j,n}$ заготовки во всех сечениях на текущем обороте заготовки:

$$R_{c,j,n} = R_{\text{заг},\text{max}} - t_{\Phi_{\text{сум},c,j,n}}, \quad (12)$$

где $R_{\text{заг},\text{max}}$ – максимальный радиус заготовки, мм;

7) в сечении установки ПАК рассчитываем текущее значение диаметра вала d_o как сумму радиуса с j -м номером и противоположного ему радиуса с номером jj , то есть

$$d_o = R_{c,j,n} + R_{c,jj,n}. \quad (13)$$

Производится сравнение текущего диаметра d_o с диаметром $d_{\text{ПАК},z}$, который является настроенным размером ПАКа:

– если $d_o \leq d_{\text{ПАК},z}$, то происходит переход на следующую ступень цикла $z+1$, и производим переключение программной скорости подачи Δt_{Π_z} . Расчет повторяется с пункта 1;

– если $d_o > d_{\text{ПАК},z}$, то расчет повторяется с пункта 1;

– после съема всего припуска диаметр вала d_o достигает последнего настроенного размера, и цикл шлифования заканчивается;

8) рассчитываем максимальные и минимальные радиусы обрабатываемой поверхности в каждом сечении и по всей поверхности. Так как конечные значения радиусов детали формируются на последнем обороте n_{max} заготовки, то значения радиусов обрабатываемой поверхности будем брать только на последнем обороте. В связи с тем, что эллипсный профиль детали описывается несколькими радиусами, то из всех них надо выбрать максимальный $R_{\text{max},c}$ и минималь-

ный R_{\min_c} радиус в сечении по следующим формулам:

$$R_{\max_c} = \max_j \{R_{c,j,n}\}, \quad (14)$$

$$R_{\min_c} = \min_j \{R_{c,j,n}\}; \quad (15)$$

9) рассчитываем максимальный $R_{d_{\max}}$ и минимальный $R_{d_{\min}}$ радиусы на всей обработанной поверхности путем выбора предельного радиуса из сечений:

$$R_{d_{\max}} = \max_c \{R_{\max_c}\}, \quad (16)$$

$$R_{d_{\min}} = \min_c \{R_{\min_c}\}; \quad (17)$$

10) рассчитываем максимальные и минимальные диаметральные размеры обрабатываемой поверхности в каждом сечении и по всей поверхности. Поскольку эллипсный профиль детали описывается несколькими радиусами, то в каждом сечении можно рассчитать несколько диаметров как сумму противоположных радиусов и из них выбрать максимальный d_{\max_c} и минимальный d_{\min_c} диаметр в сечении:

$$d_{\max_c} = \max_j \{R_{c,j,n=n_{\max}} + R_{c,jj,n=n_{\max}}\}, \quad (18)$$

$$d_{\min_c} = \min_j \{R_{c,j,n=n_{\max}} + R_{c,jj,n=n_{\max}}\}. \quad (19)$$

Максимальный $d_{d_{\max}}$ и минимальный $d_{d_{\min}}$ диаметры детали на всей обработанной поверхности определяются выбором предельных диаметров из всех сечений, то есть

$$d_{d_{\max}} = \max_c \{d_{\max_c}\}, \quad (20)$$

$$d_{d_{\min}} = \min_c \{d_{\min_c}\}. \quad (21)$$

Прогнозируемая погрешность диаметральных размеров Δ_d рассчитывается как разность максимального $d_{d_{\max}}$ и минимального $d_{d_{\min}}$ диаметров детали по всей длине обработанной поверхности:

$$\Delta_d = d_{d_{\max}} - d_{d_{\min}}. \quad (22)$$

В статье [15] приведена методика расчета погрешностей формы и взаимного расположения

поверхностей, которая основывается на значениях радиусов обрабатываемых поверхностей, полученных по формулам (12)-(15).

Заключение

1. Прогнозирование точности обработки, включая точность диаметрального размера, формы и расположения поверхностей, при разработке управляющих программ для операций круглого шлифования с ЧПУ является актуальной задачей для современного цифрового машиностроительного производства.

2. Для прогнозирования точности обработки шлифованием разработан цифровой двойник формообразования обрабатываемой поверхности нежесткого вала с эллипсным профилем, который позволяет прогнозировать погрешности обработки по расчетным значениям радиусов в конце цикла круглого врезного шлифования с учетом влиянием переменных технологических факторов.

3. Основой данного цифрового двойника служит модель одновременного расчета переменной глубины резания на всех участках обрабатываемой поверхности на каждом обороте заготовки в зависимости от податливости каждого участка вала по всей длине шлифования. Совокупность переменных глубин резания по всей длине шлифования образует слой снимаемого металла в каждый момент времени.

4. Представленный в статье цифровой двойник формообразования обрабатываемой поверхности нежесткого вала с эллипсным профилем позволяет рассчитывать текущие размеры обрабатываемой поверхности и спрогнозировать погрешность обработки диаметральных размеров, а также проверить, выполняются ли чертежные требования по форме и расположению обрабатываемых поверхностей [15].

5. Применение цифрового двойника формообразования обрабатываемой поверхности в производстве имеет большую практическую значимость, так как позволяет вести автоматизированный контроль управляющих программ для станков с ЧПУ на возможность обеспечения достижимой точности обработки при изготовлении партии деталей.

Список литературы

1. Спиринов В.А., Красильников М.А., Михайлов А.А. Методология комплексного расчета точности обработки для токарных станков с ЧПУ // Вестник Пермского национального исследовательского политех-

- нического университета. Машиностроение, материаловедение. 2012. Т. 14. № 2. С. 77–89.
2. Кольцов А.Г. Методика построения математической модели точности технологического оборудования на базе многооперационного станка // Вестник УГАТУ. 2013. Т. 17. № 8(61). С. 106–116.
3. Кондрашов А.Г., Сафаров Д.Т. Прогнозирование точности при обработке резанием // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2014. № 12. С. 63–69.
4. Chiu H.W., Lee C. Hung. Prediction of machining accuracy and surface quality for CNC machine tools using data driven approach // *Advances in Engineering Software*. 2017. Vol. 114. Pp. 246–257.
5. Hangzhuo Yu, Shengfeng Qin, Guofu Ding, Lei Jiang, Lei Han Integration of tool error identification and machining accuracy prediction into machining compensation in flank milling // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019. Vol. 102. Pp. 3121–3134.
6. Soori M., Arezoo B., Habibi M. Accuracy analysis of tool deflection error modelling in prediction of milled surfaces by a virtual machining system // *Int. J. Computer Applications in Technology*. 2017, vol. 55(4), pp. 308–321.
7. Gong Y.D., Wang B., Wang W.S. The simulation of grinding wheels and ground surface roughness based on virtual reality technology / *Journal of Materials Processing Technology*. 2002. Vol. 129. Pp. 123–126.
8. Hecker R.L., Liang S.Y. Predictive modeling of surface roughness in grinding / *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2003. Vol. 43. Pp. 755–761.
9. Zhou X., Xi F. Modeling and predicting surface roughness of the grinding process / *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2002. Vol. 42. Pp. 969–977.
10. Soler Ya.I., Nguyen Van Le, Nguyen Chi Kien Prediction of shape precision of hardened steel flat parts at pendular grinding with periphery of the abrasive wheel // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2013. №12–1. С. 128–134.
11. Soler Ya.I., Nguyen Van Le Modeling and predicting flatness deviations under plane grinding of parts made of 30HGSА hardened steel // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. № 4 (111). Pp. 54–65.
12. Лурье Г.Б. Теория рабочего цикла при круглом шлифовании и его автоматизация / Г.Б. Лурье // Основные вопросы высокопроизводительного шлифования. М.: Машгиз, 1960. С. 87–108.
13. Акинцева А.В., Переверзев П.П., Ардашев Д.В. Силовая модель процесса внутреннего шлифования / *СТИН*. 2019. №11. С. 34–37.
14. Акинцева А.В., Переверзев П.П., Ардашев Д.В. Расчет диапазонов затупления шлифовальных кругов различных характеристик между правками // *СТИН*. 2019. №11. С. 37–40.
15. Переверзев П.П., Акинцева А.В. Моделирование ограничений по точности обработки при проектировании оптимальных циклов // Вестник ЮУрГУ. 2016. №2. С. 61–71.

References

1. Spirin V.A., Krasilnikov M.A., Mikhailov A.A. Integrated calculation methodology for processing precision CNC lathes. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie* [Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Mechanical Engineering, Materials Science], 2012, vol. 14, no. 2, pp. 77–89. (In Russ.)
2. Koltsov A.G. Methods for building a mathematical model of the accuracy of technological equipment based on a multioperational machine. *Vestnik UGATU* [Bulletin of USATU], 2013, vol. 17, no. 8 (61), pp. 106–116. (In Russ.)
3. Kondrashov A.G., Safarov D.T. Prediction of accuracy in cutting. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie*. [Proceedings of Higher Educational Institutions. Mechanical Engineering], 2014, no. 12, pp. 63–69. (In Russ.)
4. Chiu H.W., Lee C.Hung. Prediction of machining accuracy and surface quality for CNC machine tools using data driven approach. *Advances in Engineering Software*. 2017, vol. 114, pp. 246–257.
5. Hangzhuo Yu, Shengfeng Qin, Guofu Ding, Lei Jiang, Lei Han Integration of tool error identification and machining accuracy prediction into machining compensation in flank milling. *The Int.J.of Advanced Manufacturing Technology*. 2019, vol. 102, pp. 3121–3134.
6. Soori M., Arezoo B., Habibi M. Accuracy analysis of tool deflection error modelling in prediction of milled surfaces by a virtual machining system. *Int. J. Computer Applications in Technology*. 2017, vol. 55(4), pp. 308–321.
7. Gong Y.D., Wang B., Wang W.S. The simulation of grinding wheels and ground surface roughness based on virtual reality technology. *Journal of Materials Processing Technology*. 2002, vol. 129, pp. 123–126.
8. Hecker R.L., Liang S.Y. Predictive modeling of surface roughness in grinding. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2003, vol. 43, pp. 755–761.
9. Zhou X., Xi F. Modeling and predicting surface roughness of the grinding process. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2002, vol. 42, pp. 969–977.
10. Soler Ya.I., Nguyen Van Le, Nguyen Chi Kien. Prediction of shape precision of hardened steel flat parts at pendular grinding with periphery of the abrasive wheel. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International Research Journal], 2013, no. 12–1, pp. 128–134. (In Russ.)
11. Soler Ya.I., Nguyen Van Le. Modeling and predicting flatness deviations under plane grinding of parts made of 30KhGSA hardened steel. *Vestnik Irkutskogo gosudar-*

- stvennogo tekhnicheskogo universiteta*. [Bulletin of Irkutsk State Technical University], 2016, no. 4 (111), pp. 54–65. (In Russ.)
12. Lurie G.B. *Teoriya rabocheho tsikla pri kruglom shlifovanii i ego avtomatizatsiya. Osnovnye voprosy vysokoproduktivnogo shlifovaniya*. [Theory of an operating cycle for cylindrical grinding and its automation. Key issues for high performance grinding]. Moscow: Mashgiz, 1960, pp. 87–108. (In Russ.)
13. Akintseva A.V., Pereverzev P.P., Ardashev D.V. Power model of an internal grinding process. *STIN* [Machines and Tools], 2019, no. 11, pp. 34–37. (In Russ.)
14. Akintseva A.V., Pereverzev P.P., Ardashev D.V. Calculating bluntness ranges of grinding wheels of different characteristics between dressings. *STIN* [Machines and Tools], 2019, no. 11, pp. 37–40. (In Russ.)
15. Pereverzev P.P., Akintseva A.V. Modeling the constraints on machining accuracy when designing optimal cycles. *Vestnik YuUrGU* [Bulletin of SUSU], 2016, no. 2, pp. 61–71. (In Russ.)

Поступила 15.09.2021; принята к публикации 12.10.2021; опубликована 24.12.2021
Submitted 15/09/2021; revised 12/10/2021; published 24/12/2021

Акинцева Александра Викторовна – кандидат технических наук, доцент кафедры техники, технологии и строительства, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.
Email: akintsevaav@susu.ru. ORCID 0000-0003-0588-1401

Переверзев Павел Петрович – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технологии автоматизированного машиностроения, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.
Email: pereverzevpp@susu.ru. ORCID 0000-0002-1416-8918

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

Aleksandra V. Akintseva – PhD (Eng.), Associate Professor of the Department of Engineering, Technology and Construction, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: akintsevaav@susu.ru. ORCID 0000-0003-0588-1401

Pavel P. Pereverzev – DrSc (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of the Automated Mechanical Engineering Technology, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: pereverzevpp@susu.ru. ORCID 0000-0002-1416-8918

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

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
 УДК 621.9
 DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-4-107-115



СНИЖЕНИЕ ТРУДОЕМКОСТИ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ НА ОСНОВЕ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОПЕРАЦИЙ ЗЕНКЕРОВАНИЯ СБОРНЫМИ ИНСТРУМЕНТАМИ

Дерябин И.П., Токарев А.С.

Трехгорный технологический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (ТТИ НИЯУ «МИФИ»), Трехгорный, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). При обработке деталей высокой точности в машиностроении сталкиваются с длительной отладкой технологического процесса, после его проектирования и диагностики причин брака. Обработка точных и глубоких отверстий создает особые трудности инженерам-технологам при проектировании технологических процессов. Но, несмотря на затраченные усилия после отладки технологической системы, не удается избежать частого появления брака по точности обработки. Диагностика причин брака занимает длительное время. Анализ технологии обработки точных и глубоких отверстий на современных предприятиях показал, что основной причиной продолжительной обработки являются трудности назначения технологических параметров операций и переходов на начальных стадиях обработки, к которым относятся сверление и зенкерование. Назначаемые технологические параметры обработки, такие как режимы резания, геометрия режущего инструмента, на эти операции мало соответствуют требованиям достижения точности расположения оси, а больше соответствуют требованиям достижения точности диаметрального размера, а также требованиям наибольшей производительности и стойкости инструмента. Повысить качество прогнозов точности обработки отверстий возможно на основе разработки математических моделей формообразований отверстий и компьютерных моделей расчета точности, учитывающих особенности зенкеров с многогранными неперетачиваемыми пластинами. **Используемые методы.** В данном исследовании использовались методы математического моделирования, теория резания, а также основные положения теории механизмов и машин. **Новизна.** Разработана математическая модель расчета увода оси отверстия при обработке зенкером с многогранными неперетачиваемыми пластинами, учитывающая новые переменные – осевое смещение вершин режущих кромок многогранных неперетачиваемых пластин τ друг от друга и различие главных углов в плане φ , которые ранее не использовались в уже имеющихся аналогичных математических моделях. **Результат.** Разработанная математическая модель позволяет прогнозировать увод оси отверстия при обработке зенкером с многогранными неперетачиваемыми пластинами, варьируя режимами резания, тем самым снижая трудоемкость обработки отверстий. **Практическая значимость.** Разработана методика выбора параметров операции, при обработке зенкерами с многогранными неперетачиваемыми пластинами, обеспечивающих заданную точность. Достигнуто повышение экономической и технологической эффективности при обработке отверстий зенкером с многогранными неперетачиваемыми пластинами, при использовании разработанной математической модели на основе уменьшения числа переходов и повышения агрегируемости операций.

Ключевые слова: зенкер с многогранными неперетачиваемыми пластинами, математическая модель, увод оси отверстия, повышение точности обработки, снижение трудоемкости, зенкерование, обработка отверстий.

© Дерябин И.П., Токарев А.С., 2021

Для цитирования

Дерябин И.П., Токарев А.С. Снижение трудоемкости обработки отверстий на основе повышения точности операций зенкерования сборными инструментами // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №4. С. 107–115. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-4-107-115>



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

REDUCING THE LABOR INTENSITY OF HOLE MACHINING BY INCREASING THE ACCURACY OF COUNTERSINKING OPERATIONS WITH PRECAST TOOLS

Deryabin I.P., Tokarev A.S.

Tryokhgorny Technological Institute – the branch of National Research Nuclear University MEPhI (TTI NRNU MEPhI), Tryokhgorny, Russia

Abstract. Problem statement (relevance of the research). When machining high-precision parts, mechanical engineers face a long adjustment of the technological process after its design and diagnosis of the causes of defects. Machining of precise and deep holes creates special difficulties for process engineers, when designing technological processes. But, despite the effort expended, after adjusting the technological system, it is not possible to avoid the frequent occurrence of defects in machining accuracy. It takes a long time to diagnose the causes of defects. Analysis of the technology of machining precise and deep holes at modern enterprises has shown that the main reason for long-time machining is the difficulty of assigning technological parameters of operations and transitions at the initial machining stages, which include drilling and countersinking. The assigned machining parameters, such as cutting modes, geometry of the cutting tool, for these operations slightly meet the requirements for the accuracy of the axis location, but rather meet the requirements for the accuracy of the diameter, as well as the requirements of the highest output and durability of the tool. It is possible to improve the quality of forecasts for the hole machining accuracy by designing mathematical models of hole shaping and computer models for calculating accuracy, taking into account the features of countersinks with polyhedral disposable plates. **The methods used.** In this study, the authors used methods of mathematical modeling, cutting theory, as well as the main provisions of the theory of mechanisms and machines. **Novelty.** The authors have developed a mathematical model to calculate the drill run-off, when machining with the countersink with polyhedral disposable plates, factoring into new variables: the axial displacement of the vertices of the cutting edges of polyhedral disposable plates τ from each other and the difference in the main cutting edge angles φ , which were not previously used in existing similar mathematical models. **Result.** The developed mathematical model predicts the drill run-off, when machining with a countersink with polyhedral disposable plates, varying the cutting modes, thereby reducing the labor intensity of hole machining. **Practical significance.** The authors have developed a technique used to select operation parameters, providing the set accuracy, when machining with countersinks with polyhedral disposable plates. This contributes to an increase in economic and technological efficiency, when machining holes with a countersink with polyhedral disposable plates, using the developed mathematical model based on reducing the number of transitions and increasing the ability to aggregate operations.

Keywords: countersink with polyhedral disposable plates, mathematical model, drill run-off, improvement of machining accuracy, reduction of labor intensity, countersinking, hole machining.

For citation

Deryabin I.P., Tokarev A.S. Reducing the Labor Intensity of Hole Machining by Increasing the Accuracy of Countersinking Operations with Precast Tools. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021, vol. 19, no. 4, pp. 107–115. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-4-107-115>

Введение

При обработке отверстий часто приходится сталкиваться с различными факторами, влияющими на точность конечных результатов и требований, предъявляемых к детали. Зачастую при назначении основных параметров обработки, таких как режимы резания, геометрия режущей части инструмента, ориентируются на точность диаметральных размеров, а не на точность расположения оси отверстия. Результатом данных ситуаций является назначение дополнительных переходов и операций для достижения требуе-

мой точности, то есть увеличивается трудоемкость обработки отверстий. Для обработки отверстий в последнее время все чаще применяют сборный лезвийный инструмент с многогранными неперетачиваемыми пластинами (МНП), в том числе и зенкеры [1, 2, 4, 7].

Одним из путей решения проблемы снижения трудоемкости обработки деталей является моделирование и расчет точности обработки поверхностей, которые позволяют значительно повысить эффективность проектирования технологического процесса обработки деталей [9, 10].

Анализ технологических процессов (ТП) обработки отверстий высокой точности в различных деталях показывает, что выполнение заданной точности расположения оси достигается с большим трудом, при этом количество выполняемых переходов нередко больше, чем необходимо для обработки других поверхностей аналогичной точности. Особенности обработки отверстий концевыми мерными инструментами (КМИ), к которым относятся сборные зенкеры, в основном связаны с параметрами геометрии режущей части инструмента и режимами резания, поэтому точность обработки в основном зависит от этих параметров, и в меньшей степени – от применяемого оборудования [6]. Невозможность обеспечить заданные параметры точности расположения оси на современных многопозиционных и многоинструментных станках и станках с ЧПУ приводит к необходимости применения дополнительных операций координатного и алмазного растачивания, что снижает эффективность применения дорогостоящего оборудования.

Решение проблемы достижения точности расположения оси отверстия можно добиться разработкой математических моделей [3, 11], которые смогут прогнозировать увод оси отверстия на этапе компьютерной отладки технологического процесса. Вопросами точности обработки отверстий занимались ученые В.Н. Подураев, А.Г. Косилова, В.В. Матвеев, В.И. Гузев, С.Г. Лакирев, Я.М. Хилькевич, И.П. Дерябин, А.В. Козлов и др. В этих исследованиях установлено, что на образование систематических погрешностей при многопереходной обработке отверстий КМИ существенное влияние оказывают диссимметрия режущей части инструмента, погрешности заготовки и предварительной обработки, осевые вибрации инструмента и заготовки. Однако влияние некоторых из этих факторов для зенкеров с МНП недостаточно изучено на количественном уровне, что не позволяет создать достаточно надежные рекомендации по устранению причин возникновения различных погрешностей обработки отверстий.

Существующие математические модели формообразования отверстий зенкерами, приведенные в работах С.Г. Лакирева, Я.М. Хилькевича, И.П. Дерябина, А.В. Козлова, не учитывают особенности геометрии режущей части сборных зенкеров с МНП. Но проведя анализ технологических процессов на машиностроительных предприятиях, было выявлено, что для обработки отверстий порядка 70% инструмента является сборным, а следовательно, игнорировать погрешности параметров геометрии заточки, которые не учитывались для цельного режущего инструмента, нельзя. Таким образом, целью данного исследования стал учет новых геометрических параметров: осевого смещения режущих кромок лезвий относительно друг друга τ и погрешность главного угла в плане ϕ .

Теоретические исследования

Особенностями зенкеров с МНП является погрешность положения пластин и погрешность геометрических параметров режущей части, а также соотношение их с величиной подачи.

Для разработки новой математической модели, которая бы учитывала геометрию сборного инструмента, были использованы два новых фактора: осевое смещение режущих кромок лезвий относительно друг друга τ и погрешность главного угла в плане ϕ . Данные параметры показаны на **рис. 1**.

Для разработки математических моделей взяты следующие положения:

1. Траектория движения инструмента описывается текущими координатами радиус-векторов вершин режущих лезвий, которые и определяют профиль обработанного отверстия.
2. Статическое равновесие инструмента определяется действием радиальных составляющих сил резания на каждое лезвие.
3. Радиальные составляющие сил резания пропорциональны площадям срезаемого сечения с соответствующим коэффициентом пропорциональности.

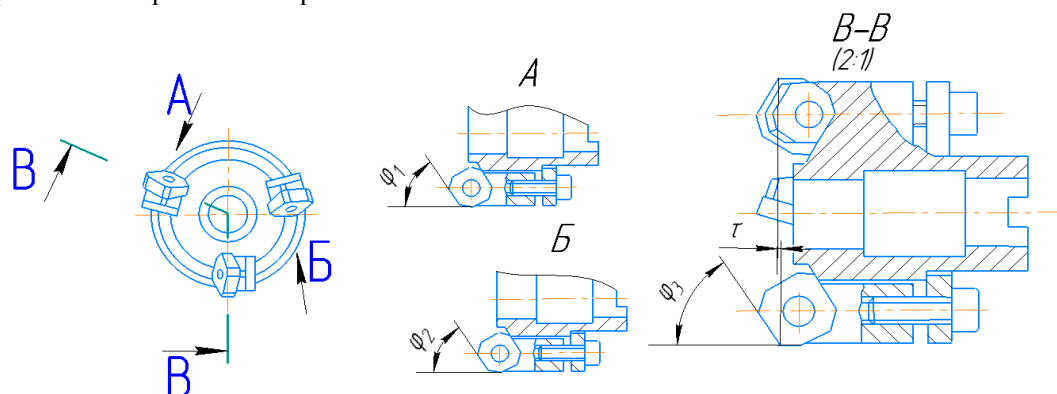


Рис. 1. Новые геометрические параметры

Fig. 1. New geometric parameters

В программе КОМПАС-3D была разработана методика построения срезаемых сечений каждым лезвием инструмента [8], которая позволила доказать необходимость учета осевого смещения вершин режущих кромок пластин относительно друг друга τ и погрешность главного угла в плане φ . Используя построения срезаемых сечений в программе КОМПАС-3D, были разработаны две математические модели для двух случаев, когда $\tau \leq S/z$ (1) и $\tau > S/z$ (2) (где S – подача, z – количество режущих лезвий на зенкере с МНП) [14].

Математическая модель для случая $\tau \leq S/z$:

$$\begin{cases} \Delta_1 = \frac{h}{2} \left(\frac{S_0}{3} - \tau + h_1 \left(\operatorname{tg} \left(\frac{90 - \varphi_2}{180} \cdot \pi \right) - \operatorname{tg} \left(\frac{90 - \varphi_1}{180} \cdot \pi \right) \right) \right), \\ \Delta_2 = \frac{h}{2} \left(\frac{S_0}{3} + h_2 \left(\operatorname{tg} \left(\frac{90 - \varphi_3}{180} \cdot \pi \right) - \operatorname{tg} \left(\frac{90 - \varphi_2}{180} \cdot \pi \right) \right) \right), \\ \Delta_3 = \frac{h}{2} \left(\frac{S_0}{3} + \tau + h_3 \left(\operatorname{tg} \left(\frac{90 - \varphi_1}{180} \cdot \pi \right) - \operatorname{tg} \left(\frac{90 - \varphi_3}{180} \cdot \pi \right) \right) \right), \end{cases} \quad (1)$$

где Δ – площадь сечения срезаемого слоя, мм; S_0 – подача за один оборот инструмента, мм/об; h – припуск на лезвие, мм; τ – осевое смещение вершин режущих кромок пластин относительно друг друга, мм; $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ – главные углы в плане 1, 2 и 3 лезвий соответственно, град.

Математическая модель для случая при $\tau > S/z$

$$\begin{cases} \Delta_1 = \left(\frac{\rho_1(\Psi) - \frac{D_0 + e_{\text{мн}} \sin(\Psi)}{2}}{2} \right) \cdot \left[\frac{S}{3} + \left(\operatorname{tg}(90 - \varphi_1) \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \left(\rho_1(\Psi) - \frac{D_0 + e_{\text{мн}} \sin(\Psi)}{2} \right) \right] \right], \\ \Delta_2 = \left(\frac{\rho_2(\Psi + 120) - \frac{D_0 + e_{\text{мн}} \sin(\Psi)}{2}}{2} \right) \cdot \left[\frac{S}{3} + \right. \\ \left. + \left[\operatorname{tg}(\varphi_2 - \varphi_1) \cdot \left(\rho_2(\Psi + 120) - \frac{D_0 + e_{\text{мн}} \sin(\Psi)}{2} \right) \right] \right], \\ \Delta_3 = \left(\frac{\rho_3(\Psi + 240) - \frac{D_0 + e_{\text{мн}} \sin(\Psi)}{2}}{2} \right) \cdot \left[\left(S - \left(\frac{2S}{3} + \tau \right) \right) + \right. \\ \left. + \operatorname{tg}(\varphi_3 - \varphi_2) \cdot \left(\rho_3(\Psi + 240) - \frac{D_0 + e_{\text{мн}} \sin(\Psi)}{2} \right) \right], \end{cases} \quad (2)$$

где Ψ – текущий угол поворота инструмента, град; $\rho_1(\Psi), \rho_2(\Psi), \rho_3(\Psi)$ – координаты радиус-векторов

вершин лезвий; D_0 – диаметр отверстия в заготовке, мм; S – подача инструмента, мм/об; $e_{\text{мн}}$ – погрешность предшествующего перехода, мм.

Применение результатов исследования на серийных деталях машиностроительного производства

Рассмотрим пример применения математической модели расчета увода оси отверстия при зенкерование инструментами с многогранными неперетачиваемыми пластинами [9].

На рис. 2 показана структурная схема методики проектирования операций обработки отверстий, на основе которой разработана программа для ЭВМ. Данная методика позволяет совершать подбор необходимых параметров режимов резания, а также процесс отладки в случае несоответствия результатов, предъявляемых требованиями к оси отверстия.

Первый этап включает в себя ввод исходных данных (геометрия режущей части, режимы резания и т.д.), необходимых для прогнозирования увода оси отверстия. Затем происходит выбор расчетной математической модели исходя из условий, когда $\tau \leq S/z$ и $\tau > S/z$. Далее рассчитываются силы резания P , действующие на режущие лезвия зенкера с МНП, и результирующая сила ΔP , которая влияет на увод оси отверстия e . После этого происходит сравнение полученных данных с заданными e_3 , и если результат больше допустимого значения, то происходит режим отладки, то есть корректировка ввода исходных данных. Если значение находится в пределах допуска, то происходит вывод результата.

После расчетов погрешностей обработки по математическим моделям производится сравнение расчетных значений – увода оси с заданными (допустимыми) параметрами точности. При превышении каким-либо расчетным значением допустимого выполняется процесс отладки параметров перехода. Процесс отладки подразумевает под собой корректировку ввода исходных данных с целью получения параметров операции, обеспечивающих заданную точность обработки отверстия.



Рис. 2. Структура методики проектирования операций
Fig. 2. Structure of the operations design technique

Рассмотрим применение результатов исследований на примере деталей «Держатель», «Корпус» и «Втулка». У деталей имеются отверстия с высокими требованиями к позиционному допуску. Обработка таких отверстий требует подбора параметров операций, обеспечивающих предъявляемые к ним требования точности [5].

Рассмотрим деталь «Держатель» (рис. 3). Наибольшую трудность обработки вызывает отверстие $\varnothing 14H10^{+(0,07)}$. К нему предъявляются требования: H10 и позиционный допуск 0,03 мм.

Рассмотрим действующий процесс обработки детали, представленный в табл. 1.

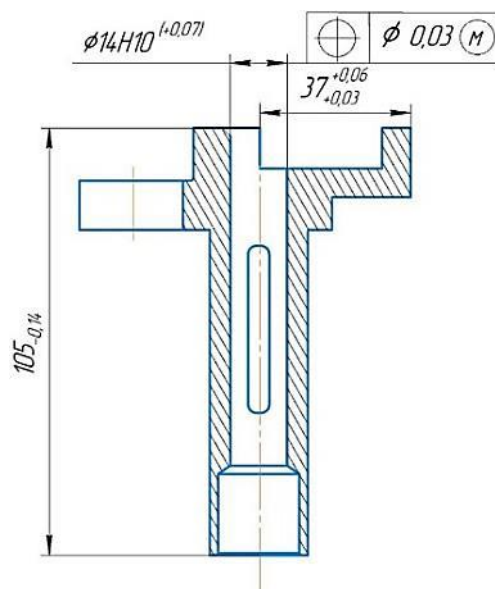


Рис. 3. Держатель
Fig. 3. Holder

Таблица 1. Действующий технологический процесс обработки отверстия в детали «Держатель»
Table 1. The current technological process of machining a hole in the "Holder" part

Номер операции	Операция	Режимы резания			Время, затрачиваемое на операцию T_0 , мин
		S , мм/об	V , м/мин	t , мм	
030	Зацентрировать отверстие	—	—	—	0,1
	Сверлить отверстие	—	—	—	1,6
	Зенкеровать отверстие предварительно	0,95	62	1	1,25
	Зенкеровать отверстие окончательно	0,75	88	0,5	0,50
040	Растачивать отверстие предварительно (алмазное растачивание)	0,05	60	0,2	2,62
	Растачивать отверстие окончательно (алмазное растачивание)	0,02	79	0,1	5,25
$T=$					11,32

По справочным данным [5] спроектируем окончательное зенкерование отверстия. На рис. 4 и 5 показаны фрагменты работы программы для ЭВМ.

Номинальная подача за один оборот $S_0 = 0,75$	Осевое отставание пластин $t = 0,1$	Длина обработки Лотв = 120
Амплитуда осевых колебаний $a = 0,2$	Диаметр зенкера $D = 14$	Колебания припуска $h_0 = 0,1$
Коэффициент для материала $C_p = 206,5$	Диаметр просверленного отверстия $D_0 = 11,25$	Длина зенкера $L = 195$
Коэффициенты влияния углов режущей части у инструмента $K_\phi = 0,89$ $K_y = 1$ $K_l = 1,1$	Главные углы пластин в плане $\Phi 1 = 42$ $\Phi 2 = 45$ $\Phi 3 = 47$	Прогнозируемый увод оси отверстия еотв = 0,05
		Расчет

Рис. 4. Результаты прогнозирования увода оси отверстия в детали «Держатель» по данным Технологического справочника

Fig. 4. The results of predicting the drill run-off in the "Holder" part according to the Technological Reference Book

Номинальная подача за один оборот $S_0 = 0,35$	Осевое отставание пластин $t = 0,1$	Длина обработки Лотв = 120
Амплитуда осевых колебаний $a = 0,2$	Диаметр зенкера $D = 14$	Колебания припуска $h_0 = 0,1$
Коэффициент для материала $C_p = 206,5$	Диаметр просверленного отверстия $D_0 = 11,25$	Длина зенкера $L = 195$
Коэффициенты влияния углов режущей части у инструмента $K_\phi = 0,89$ $K_y = 1$ $K_l = 1,1$	Главные углы пластин в плане $\Phi 1 = 42$ $\Phi 2 = 45$ $\Phi 3 = 47$	Прогнозируемый увод оси отверстия еотв = 0,02
		Расчет

Рис. 5. Результаты прогнозирования увода оси отверстия в детали «Держатель»

Fig. 5. The results of predicting the drill run-off in the "Holder" part

Спроектированный увод оси по параметрам технологических справочников превышает допустимое значение 0,03 мм.

Сборный зенкер с многогранными неперетачиваемыми пластинами может обеспечить необходимые заданные требования точности для данного размера [12, 13]. Используя разработанную математическую модель, спрогнозируем увод оси

отверстия при обработке его зенкером с многогранными неперетачиваемыми пластинами.

На основании полученных данных (см. рис. 4) мы можем варьировать исходными данными, подбирать подачу и главный угол в плане у пластин [14]. Изменение главного угла в плане возможно при замене пластин, то есть потребуются дальнейшая переналадка станка. Данный параметр необ-

ходимо изменять только после перебора всех возможных вариантов подачи для зенкера с многогранными неперетачиваемыми пластинами. Поэтому сначала уменьшаем подачу.

Прогнозирование увода оси отверстия в детали типа «Держатель» представлено на рис. 5.

Полученное значение увода оси составляет 0,02 мм, что является допустимым значением, так как допуск увода оси отверстия должен составлять не более 0,03 мм по техническим требованиям на чертеже детали.

После применения разработанной методики технологический процесс обработки отверстия показан в табл. 2.

Таблица 2. Модернизированный технологический процесс обработки отверстия в детали «Держатель»

Table 2. Modernized technological process for machining a hole in the "Holder" part

Номер операции	Операция	Режимы резания			Время, затрачиваемое на операцию T_0 , мин
		S , мм/об	V , м/мин	t , мм	
030	Зацентрировать отверстие	—	—	—	0,1
	Сверлить отверстие	—	—	—	1,6
	Зенкеровать отверстие предварительно	0,7	57	1	0,9
	Зенкеровать отверстие окончательно	0,3	72	0,5	0,6
$T=$					3,2

Таким образом, при использовании разработанной математической модели, прогнозирующей увод оси отверстия, сократилось время обработки отверстия детали «Держатель» на 8,12 мин.

Заключение

1. Разработанная математическая модель формообразования используется для расчетно-обоснованного назначения режимов резания с целью обеспечения заданного качества обрабатываемых отверстий.

2. Разработанная математическая модель позволяет заблаговременно определять необходимые геометрические параметры режущего инструмента и режимы резания для обработки отверстий.

3. Использование данной методики на стадии проектирования технологических процессов обработки деталей позволит значительно сократить трудоемкость обработки отверстий.

Список литературы

1. Аверьянов О.И., Клепиков В.В. Режущий инструмент. М.: МГИУ, 2007. 144 с.
2. Адашкин А.М., Колесов Н.В. Современный режущий инструмент: учебное пособие для студ. учреждений сред. проф. образования. М.: ИЦ Академия, 2012. 224 с.
3. Алпатов Ю.Н. Математическое моделирование производственных процессов: учебное пособие. СПб.: Лань, 2018. 136 с.
4. Горохов В.А., Беляков Н.В., Махаринский Ю.Е. Основы технологии машиностроения. Лабораторный практикум. М.: Инфра-М, 2013. 440 с.
5. Гузев В.И., Батуев В.А., Сурков И.В. Режимы резания для токарных и сверлильно-фрезерно-расточных станков с ЧПУ: справочник. М.: Машиностроение, 2005. 386 с.
6. Дерябин И.П. Методология параметрического проектирования многопереходной обработки круглых отверстий концевыми мерными инструментами: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: спец. 05.02.08 «Технология машиностроения». Челябинск, 2009.
7. Емельянов С.Г., Зубкова О.С., Мерзоева М.С. Эффективность использования сборных зенкеров со сменными многогранными пластинами / С.Г. Емельянов // Вестник машиностроения. 2003. №12. С. 60–61.
8. Козлов А.В., Дерябин И.П. Исследование процессов формообразования отверстий мерными инструментами / М-во образования и науки Российской Федерации, Федеральное агентство по образованию, Южно-Уральский гос. ун-т, филиал в г. Златоусте. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2006. 251 с.
9. Миронова И.Н. Сокращение трудоемкости технологической подготовки производства на этапах проектирования и отладки операций обработки отверстий инструментами одностороннего резания: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.02.08 «Технология машиностроения» / И.Н. Миронова. Челябинск, 2006.
10. Пятых А.С. Совершенствование процесса получения точных отверстий в деталях из алюминиевых сплавов на высокопроизводительном оборудовании: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.02.08 «Технология машиностроения» / А.С. Пятых. Иркутск, 2019. 20 с.
11. Рейзлин В.И. Математическое моделирование: учебное пособие. М.: Юрайт, 2016. 128 с.
12. Токарев А.С., Дерябин И.П., Лопатин Б.А. Экспериментальное определение увода оси отверстий при обработке зенкером с МНП // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». 2020. С. 55–62.

13. Токарев А.С., Дерябин И.П. Измерение погрешности расположения пластин зенкера с МНП // Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты статьи: тезисы докладов Международной научно-исследовательской конференции. 2017. С. 72–74.
14. Разработка математической модели прогнозирования увода оси отверстия при обработке зенкером с МНП / И.П. Дерябин, А.С. Токарев, Ю.Д. Донцова, О.А. Токарева // Естественные и технические науки. 2018. № 6 (120). С. 212–215.
8. Kozlov A.V., Deryabin P.I. *Issledovanie protsessov formoobrazovaniya otverstii mernymi instrumentami* [Study on the processes of formation of holes with measuring tools]. Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Federal Agency for Education, South Ural State University, Branch in Zlatoust. Chelyabinsk: Publishing House of SUSU, 2006, 251 p. (In Russ.)
9. Mironova I.N. *Sokraschenie trudoemkosti tekhnologicheskoi podgotovki proizvodstva na etapakh proektirovaniya i otladki operatsii obrabotki otverstii instrumentami odностороннего rezaniya: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk: spets. 05.02.08 «Tekhnologiya mashinostroeniya»* [Reduction of labor intensity of technological preparation of production at the stages of design and adjustment of hole processing operations with single-sided cutting tools: Extended abstract of the PhD thesis; spec. 05.02.08 Technology of mechanical engineering]. Chelyabinsk, 2006.
10. Pyatykh A.S. *Sovershenstvovanie protsessa polucheniya tochnykh otverstii v detalyakh iz alyuminiyevykh splavov na vysokoproizvoditelnom oborudovanii: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk: spets. 05.02.08 «Tekhnologiya mashinostroeniya»* [Improving the process of making precise holes in aluminum alloy parts on high-performance equipment: Extended abstract of the PhD thesis; spec. 05.02.08 Technology of mechanical engineering]. Irkutsk, 2019, 20 p.
11. Reizlin V.I. *Matematicheskoe modelirovanie: uchebnoe posobie* [Mathematical modeling: Textbook]. Moscow: Yurayt, 2016, 128 p. (In Russ.)
12. Tokarev A.S., Deryabin I.P., Lopatin B.A. Experimental determination of the drill run-off, when processing with a countersink with polyhedral disposable plates. *Vestnik YuUrGU. Seriya «Mashinostroenie»* [Bulletin of SUSU. Series "Mechanical Engineering"], 2020, pp. 55–62. (In Russ.)
13. Tokarev A.S., Deryabin I.P. Measuring the error of the arrangement of plates of a countersink with polyhedral disposable plates. *Fundamentalnye i prikladnye issledovaniya: problemy i rezultaty stati: tezisy dokladov Mezhdunarodnoi nauchno-issledovatel'skoi konferentsii* [Fundamental and applied research: problems and results of the paper: abstracts of the reports presented at the International Research Conference]. 2017, pp. 72–74. (In Russ.)
14. Deryabin I.P., Tokarev A.S., Dontsova Yu.D., Tokareva O.A. Development of a mathematical model for predicting the drill run-off, when processing with a countersink with polyhedral disposable plates. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki* [Natural and Engineering Sciences], 2018, no. 6 (120), pp. 212–215. (In Russ.)

References

1. Averyanov O.I., Klepikov V.V. *Rezhushchii instrument* [Cutting tools]. Moscow: MSIU, 2007, 144 p. (In Russ.)
2. Adaskin A.M., Kolesov N.V. *Sovremenniy rezhushchii instrument: uchebnoe posobie dlya stud. uchrezhdenii sred. prof. obrazovaniya* [Modern cutting tools: A textbook for students of secondary vocational institutions]. Moscow: Academy Publishing Center, 2012, 224 p. (In Russ.)
3. Alpatov Yu.N. *Matematicheskoe modelirovanie proizvodstvennykh protsessov: uchebnoe posobie* [Mathematical modeling of production processes: A textbook]. St. Petersburg: Lan, 2018, 136 p. (In Russ.)
4. Gorokhov V.A., Belyakov N.V., Makharinsky Yu.E. *Osnovy tekhnologii mashinostroeniya. Laboratornyi praktikum* [Fundamentals of mechanical engineering technology. Laboratory practicum]. Moscow: Infra-M, 2013, 440 p. (In Russ.)
5. Guzeev V.I., Batuev V.A., Surkov I.V. *Rezhimy rezaniya dlya tokarnykh i sverlilno-frezerno-rastochnykh stankov s ChPU: spravochnik* [Cutting schedules for turning and drilling-milling-boring CNC machines: Handbook]. Moscow: Mashinostroenie, 2005, 386 p. (In Russ.)
6. Deryabin I.P. *Metodologiya parametricheskogo proektirovaniya mnogoperekhodnoi obrabotki kruglykh otverstii kontsevyimi mernymi instrumentami: avtoref. dis. ... d-ra tekhn. nauk: spets. 05.02.08 «Tekhnologiya mashinostroeniya»* [Methodology of parametric design of multi-pass processing of round holes with end measuring tools: Extended abstract of the doctoral thesis; spec. 05.02.08 Technology of mechanical engineering]. Chelyabinsk, 2009.
7. Emelyanov S.G., Zubkova O.S., Merzhoeva M.S. Efficiency of using prefabricated countersinks with replaceable polyhedral plates. *Vestnik mashinostroeniya* [Bulletin of Mechanical Engineering], 2003, no. 12, pp. 60–61. (In Russ.)

Поступила 18.10.2021; принята к публикации 15.11.2021; опубликована 24.12.2021
Submitted 18/10/2021; revised 15/11/2021; published 24/12/2021

Дерябин Игорь Петрович – доктор технических наук, профессор,
Трехгорный технологический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета
«МИФИ» (ТТИ НИЯУ «МИФИ»), Трехгорный, Россия
Email: derigp@gmail.com

Токарев Артем Сергеевич – старший преподаватель,
Трехгорный технологический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета
«МИФИ» (ТТИ НИЯУ «МИФИ»), Трехгорный, Россия
Email: tokarev_a_s91@mail.ru

Igor P. Deryabin – DrSc (Eng.), Professor,
Tryokhgorny Technological Institute – the branch of National Research Nuclear University MEPHI
(TTI NRNU MEPHI), Tryokhgorny, Russia.
Email: derigp@gmail.com

Artem S. Tokarev – Senior Lecturer,
Tryokhgorny Technological Institute – the branch of National Research Nuclear University MEPHI
(TTI NRNU MEPHI), Tryokhgorny, Russia.
Email: tokarev_a_s91@mail.ru

УВАЖАЕМЫЕ КОЛЛЕГИ!

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

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

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

ТРЕБОВАНИЯ К СТАТЬЯМ, ПРИНИМАЕМЫМ К ПУБЛИКАЦИИ

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

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

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

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

Онлайн-перевод запрещается!

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

2. СТРУКТУРА ОСНОВНОЙ ЧАСТИ СТАТЬИ

2.1. Введение (постановка проблемы).

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

2.3. Результаты исследования и их обсуждение.

2.4. Заключение (выводы).

2.5. Список литературы (на русском и английском языках).

3. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЬИ

3.1. Рекомендуемый объем статьи – 6–8 страниц.

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

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

- **шрифт** – **Times New Roman**, размер – 11 пт, межстрочный интервал – одинарный, перенос слов – автоматический;
- при вставке **формул** использовать встроенный редактор формул **Microsoft Equation** со стандартными установками, применяется только сквозная нумерация;
- **иллюстрации** не должны превышать ширины колонки (80 мм) или ширины страницы (170 мм). Для подписей элементов на иллюстрации используется шрифт TimesNewRoman 11 пт. Рисунки представляются в редакцию в двух форматах: редактируемом и 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 $\gamma(t)=I_{\text{нл}}/I_{\text{н0}}$ от времени и удалённости КЗ от выводов асинхронного двигателя

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

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

4. ДОКУМЕНТЫ, ПРИЛАГАЕМЫЕ К СТАТЬЕ

4.1. Экспертное заключение о возможности опубликования.

4.2. Договор.

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

Статьи проходят обязательное научное рецензирование.

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

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

Телефоны: (3519) 29-85-26, 22-14-93.

Email: rio_mgtu@mail.ru; vestnik@magtu.ru (с указанием темы сообщения «Вестник МГТУ»).