

ВЕСТНИК

Магнитогорского государственного технического
университета им. Г.И. Носова

2022. Т.20, №2

Журнал включен в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук (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, ВИНТИИ и др. Электронные версии журнала размещаются на сетевом ресурсе Научной Электронной Библиотеки в сети Интернет.

Издается с марта 2003 года

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Председатель редакционной коллегии
В.М. Колокольцев (Россия)

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

РЕДАКЦИЯ

Главный редактор О.Н. Тулупов

Первый заместитель главного редактора
М.А. Полякова

Заместители главного редактора:
А.Г. Корчунов, О.С. Логунова,
Н.Н. Орехова, В.Р. Храмшин

Редактор Н.П. Боярова

Технический редактор И.В. Клюнникова
Перевод на английский О.Е. Сухих

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

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

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

код html:

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.magt.ru>
Email: rio_mgtu@mail.ru; vestnik@magtu.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 28.06.2022. Заказ 165. Тираж 500 экз. Цена свободная.

VESTNIK

of Nosov Magnitogorsk State Technical University

2022. Vol.20, no.2

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

PUBLISHED SINCE MARCH, 2003

EDITORIAL BOARD MEMBERS

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

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

EDITORIAL STAFF

Editor-in-Chief O.N. Tulupov

First Deputy Chief Editor M.A. Polyakova

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

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, 2022

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

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

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

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

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.magtu.ru>
Email: rio_mgtu@mail.ru; vestnik@magtu.ru

Publication date: 28.06.2022. Order 165. Circulation: 500. Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

Разработка полезных ископаемых	5
<i>Азев В.А., Гартман А.А., Хажиев В.А.</i>	
О технологических параметрах открытой угледобычи пологопадающих месторождений при роботизации автомобильного транспорта.....	5
<i>Grishin I.A., Bochkov V.S., Velikanov V.S., Dyorina N.V., Surovtsov M.M., Moreva Yu.A.</i>	
Implementing a Discharge Slot	
Width Control System in Cone Crushers	13
<i>Антипин Ю.Г., Барановский К.В., Рожков А.А., Никитин И.В., Соломеин Ю.М.</i>	
Оптимизация параметров подземной геотехнологии отработки подкарьерных запасов рудных месторождений методом экономико-математического моделирования.....	23
<i>Холмский А.В., Фомин С.И.</i>	
Снижение опасного влияния очистных работ на удароопасный массив при отработке Североуральских бокситовых месторождений за счет применения безвзрывной технологии.....	36
Металлургия черных, цветных и редких металлов	44
<i>Ерохин Ю.В., Пономарев В.С.</i>	
Вещественный состав шлаков ферровольфрамового производства Ключевского завода (Средний Урал)	44
Технологии обработки материалов.....	53
<i>Ишметьев М.Е., Назаров Д.А., Левандовский С.А., Моллер А.Б., Тулупов О.Н.</i>	
Пример мини-завода с использованием в качестве сырья вторичной стали.....	53
<i>Сиротин П.В., Гасанов Б.Г., Исмаилов М.А., Дробязко Н.А.</i>	
Влияние напряженно-деформированного состояния упругодиссипативной подложки на ударно-абразивную износостойкость горячештампованных порошковых конструкционных сталей	62
<i>Щербаков И.Н., Гасанов Б.Г.</i>	
Исследование адгезии антифрикционных композиционных двухслойных коррозионно-стойких никель-фосфорных покрытий, модифицированных MoS ₂	73
Материаловедение и термическая обработка металлов	82
<i>Хусаинов Ю.Г.</i>	
Перспективные способы реализации локального ионного азотирования сталей.....	82
<i>Полецков П.П., Алексеев Д.Ю., Кузнецова А.С., Гулин А.Е., Емалеева Д.Г.</i>	
Исследование влияния режимов ускоренного охлаждения на структурообразование и свойства рулонного проката	91

CONTENTS

Mining.....	5
<i>Azev V.A., Gartman A.A., Khazhiev V.A.</i>	
Technology Parameters of Open-Pit Coal Mining of Flat Dipping Deposits Using Robotization of Road Transport	5
<i>Grishin I.A., Bochkov V.S., Velikanov V.S., Dyorina N.V., Surovtsov M.M., Moreva Yu.A.</i>	
Implementing a Discharge Slot	
Width Control System in Cone Crushers	13
<i>Antipin Yu.G., Baranovsky K.V., Rozhkov A.A., Nikitin I.V., Solomein Yu.M.</i>	
Optimization of Underground Geotechnology Parameters for the Mining of Under-Pit Reserves of ore Deposits by the Method of Economic and Mathematical Modeling	23
<i>Kholmskiy A.V., Fomin S.I.</i>	
Reducing the Effect of Stoping on the Bump Hazardous Massif Using the Blast-Free Technology, when Developing the North Urals Bauxite Deposits	36
Metallurgy of Ferrous, Non-Ferrous and Rare Metals.....	44
<i>Erokhin Yu.V., Ponomarev V.S.</i>	
Material Composition of Slags from the Ferrotungsten Production Process at the Klyuchevskoy Plant (the Middle Urals)	44
Material Process Engineering	53
<i>Ishmetev M.E., Nazarov D.A., Levandovskiy S.A., Moller A.B., Tulupov O.N.</i>	
An Example of a Mini-Plant Using Secondary Steel as a Raw Material	53
<i>Sirotin P.V., Gasanov B.G., Ismailov M.A., Drobayazko N.A.</i>	
Influence of the Stress-Strain State of an Elastic-Dissipative Substrate on Impact-Abrasive Wear Resistance of Hot-Stamped Powder Structural Steels	62
<i>Shcherbakov I.N., Gasanov B.G.</i>	
Research on the Adhesion of Antifriction Composite Double-Layer Corrosion-Resistant Nickel-Phosphorous Coatings Modified with MoS ₂	73
Materials Science and Heat Treatment of Metals	82
<i>Khusainov Yu.G.</i>	
Promising Methods for Local Ion Nitriding of Steels	82
<i>Poletskov P.P., Alekseev D.Yu., Kuznetsova A.S., Gulin A.E., Emaleeva D.G.</i>	
Study on the Influence of Accelerated Cooling Modes on the Structure Formation and Properties of Coils	91

Наноматериалы и нанотехнологии.....	98
<i>Теплоухов А.А., Полещенко К.Н., Несов С.Н., Семенюк Н.А., Серопян Г.М., Сычев С.А., Ласица А.М., Чуранкин В.Г.</i>	
Особенности структурно-фазовых и морфологических изменений поверхности топокомпозита на основе политетрафторэтилена при ионно-плазменном и лазерном воздействии.....	98
<i>Коротаев Д.Н., Тарасов Е.Е., Полещенко К.Н., Теплоухов А.А., Семенюк Н.А., Орлов П.В., Чуранкин В.Г., Ласица А.М.</i>	
Совершенствование технологии послойного формированияnanoструктурных топокомпозитов методами ионно-вакуумной обработки на основе структурно-термодинамического подхода.....	107
Энергетика металлургии, энергосбережение и электротехнические комплексы.....	120
<i>Николаев А.А., Тулупов П.Г., Рыжевол С.С., Ивекеев В.С.</i>	
Разработка усовершенствованной системы автоматического управления инжекторами углеродсодержащего материала дуговой сталеплавильной печи.....	120
Экология metallургической отрасли	133
<i>Расулмухамедов Э.А., Волкова Е.А., Перятинский А.Ю., Тулупов О.Н., Муртазин Р.А.</i>	
Экопост-Магнитогорск: итоги первого года работы	133
Экономика, управление и рынок продукции.....	140
<i>Майорова Т.В., Пономарева О.С., Павлова И.Е.</i>	
Устойчивое развитие предприятий металлургической отрасли: аспекты, критерии, индикаторы.....	140
<i>Рагимов Ш.Р., Мамедов Дж.Ф.</i>	
Экспериментальное исследование процесса управления активных элементов гибких производственных систем в условиях неопределенности	148

Nanomaterials and Nanotechnologies	98
<i>Teploukhov A.A., Poleshchenko K.N., Nesov S.N., Semenyuk N.A., Seropyan G.M., Sychev S.A., Lasitsa A.M., Churankin V.G.</i>	
Features of Structural Phase and Morphological Changes of the Surface of PTFE-Based Topocomposites Exposed to Ion-Plasma and Laser	98
<i>Korotaev D.N., Tarasov E.E., Poleshchenko K.N., Teploukhov A.A., Semenyuk N.A., Orlov P.V., Churankin V.G., Lasitsa A.M.</i>	
Improving the Technology of the Layer-by-Layer Formation of Nanostructured Topocomposites by Ion-Vacuum Treatment Methods Based on a Structural-Thermodynamic Approach.....	107
Metallurgical Power Engineering, Energy Saving and Electrical Systems	120
<i>Nikolaev A.A., Tulupov P.G., Ryzhev S.S., Iveykeev V.S.</i>	
Development of an Improved Automated Control System for Carbon Injectors of an Electric Arc Furnace	120
Industrial Ecology in Metallurgy.....	133
<i>Rasulmukhamedov E.A., Volkova E.A., Peryatinskiy A.Yu., Tulupov O.N., Murtazin R.A.</i>	
Ecopost-Magnitogorsk: Results of the First Year of Operation	133
Economics, Management and Product market.....	140
<i>Maiorova T.V., Ponomareva O.S., Pavlova I.E.</i>	
Sustainable Development of Metallurgical Enterprises: Aspects, Criteria, Indicators.....	140
<i>Ragimov Sh.R., Mamedov Dzh.F.</i>	
Experimental Study on the Control Process of Active Elements of Flexible Manufacturing Systems Under Uncertainty	148

РАЗРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

MINING

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

УДК 65.011.56

DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-2-5-12



О ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРАХ ОТКРЫТОЙ УГЛЕДОБЫЧИ ПОЛОГОПАДАЮЩИХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПРИ РОБОТИЗАЦИИ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА

Азев В.А.¹, Гартман А.А.¹, Хажиев В.А.²

¹ООО «СУЭК-Хакасия», Черногорск, Россия

²Научно-исследовательский институт эффективности и безопасности горного производства, Челябинск, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Подход к четвертой промышленной революции затрагивает все сферы человеческой деятельности и на сегодняшний день в мировой и российской практике важное направление в развитии получила технология роботизации. Не исключение и угледобывающая отрасль России, где роботизация начала применяться в автомобильном транспорте. Полученный опыт открытой угледобычи пологопадающих месторождений в условиях роботизации автомобильного транспорта ООО «СУЭК-Хакасия» позволяет произвести оценку результатов и осуществить обоснование рациональных параметров применения этой технологии. **Цель исследования.** Повышение эксплуатационной скорости роботизированного автомобильного транспорта при открытой угледобыче пологопадающих месторождений за счет выбора и обоснования рациональных технологических параметров разреза. **Используемые методы.** Для исследования используется метод хронометражных наблюдений, аналитических расчетов, имитационного моделирования и факторного анализа. **Новизна.** Для технологии открытой угледобычи пологопадающих месторождений обоснованы пять категорий качества условий эксплуатации роботизированного автомобильного транспорта. Переход от первой категории на пятую позволит повысить эксплуатационную скорость автосамосвалов до 5 раз и снизить себестоимость работ до 1,5 раза. **Результат.** Оценка результатов открытой угледобычи пологопадающего месторождения при роботизации автомобильного транспорта в ООО «СУЭК-Хакасия» позволила выявить, что достигнутые во время опытно-промышленной эксплуатации роботизированного автотранспорта значения показателей эффективности использования этих машин были значительно ниже, чем целевые. Применение факторного анализа дало возможность определить фактические технологические параметры работы роботизированного автотранспорта; формируемые на основе зарубежного опыта отработки месторождений с углубочными и смешанными системами разработки не позволяют достигать целевых показателей эффективности использования этих машин при отработке пологопадающих месторождений. Обоснованные параметры категорий качества условий эксплуатации роботизированного автомобильного транспорта при отработке пологопадающих месторождений дают основания для обоснованного влияния на качество условий работы, повышение эксплуатационной скорости транспорта, а также возможность сформировать основу для достижения значений всех целевых показателей эффективности осваиваемой технологии.

Ключевые слова: роботизация, автомобильный транспорт, технологические параметры, качество условий эксплуатации.

© Азев В.А., Гартман А.А., Хажиев В.А., 2022

Для цитирования

Азев В.А., Гартман А.А., Хажиев В.А. О технологических параметрах открытой угледобычи пологопадающих месторождений при роботизации автомобильного транспорта // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №2. С. 5–12. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-2-5-12>



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

TECHNOLOGY PARAMETERS OF OPEN-PIT COAL MINING OF FLAT DIPPING DEPOSITS USING ROBOTIZATION OF ROAD TRANSPORT

Azev V.A.¹, Gartman A.A.¹, Khazhiev V.A.²

¹SUEK-Khakassia LLC, Chernogorsk, Russia

²Research Institute of Efficiency and Safety of Mining, Chelyabinsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The approach to the fourth industrial revolution has effect on all spheres of human activity. Today, robotization gains an area for development in Russian and global practice. The coal mining industry in Russia is no exception, where robotization has begun to be used in road transport. The experience gained in open-pit coal mining of gently dipping deposits with the robotization of road transport at SUEK-Khakassia LLC allows us to evaluate the results and substantiate the rational parameters of this technology. **Objectives.** The study involves the selection and substantiation of rational process parameters to increase the operational speed of robotic road transport in open-pit coal mining of gently dipping deposits. **Methods Applied.** To carry out the study, the method of time studies, analytical calculations, simulation modeling and a factor analysis is used. **Originality.** Regarding the technology of open-pit coal mining of gently dipping deposits, five categories of the quality of the operating conditions of robotic road transport are substantiated. The transition from the first category to the fifth one will increase the operating speed of dump trucks up to 5 times and decrease cost of operation by 1.5 times. **Result.** Evaluation of the results of open-pit coal mining at a gently dipping deposit with robotization of road transport at SUEK-Khakassia LLC made it possible to reveal that the values of efficiency indicators for the use of these machines achieved during the pilot operation of robotic vehicles were significantly lower than the target ones. The factor analysis has showed that the actual process operation parameters of robotic road transport determined by foreign experience in mining deposits with sinking and mixed development systems do not achieve the target indicators for efficiency of using such machines for gently dipping deposits. The justified parameters of the quality categories of the robotic road transport operating conditions for gently dipping deposits contribute to changes in the quality of operating conditions, an increase in the operational speed of such road transport, and set the basis for achieving the values of all target indicators of efficiency of the technology being mastered.

Keywords: robotization, road transport, technology parameters, quality of operating conditions.

For citation

Azev V.A., Gartman A.A., Khazhiev V.A. Technology Parameters of Open-Pit Coal Mining of Flat Dipping Deposits Using Robotization of Road Transport. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 2, pp. 5–12. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-2-5-12>

Введение

Переход к передовым цифровым технологиям и роботизированным системам является одним из приоритетов научно-технологического развития РФ на ближайшие 15 лет [1]. Не исключением при реализации такого перехода является угольная промышленность РФ, в частности предприятия открытой угледобычи.

На сегодняшний день в мировой и российской практике горнодобывающей промышленности наибольшее развитие получила технология роботизации автомобильного транспорта. Анализ мировой практики эксплуатации роботизированных карьерных автосамосвалов (175 единиц) в период с 2008 по 2019 гг. на одиннадцати горнорудных месторождениях, расположенных в Австралии, Южной и Северной Аме-

рике показал их основные преимущества по отношению к автосамосвалам, пилотируемым операторами [2–4]:

- рост производительности труда, ходимости шин и срока службы оборудования;
- снижение расхода топлива и затрат на транспортирование горной массы;
- высокая степень безопасности персонала.

Эти достоинства выявлены в основном при эксплуатации роботизированных автосамосвалов на горнорудных месторождениях с преимущественно углубочными и смешанными системами разработки. Характеристики отработки пологопадающих месторождений угля отличаются преимущественно сплошной системой разработки, при которой ширина вскрышных заходок равна ширине угольных заходок и обусловлена необходимостью поддержания требуемой скорости под-

готовки готовых запасов угля. При этом ширина угольных заходок зависит от длины фронта горных работ и должна обеспечивать требуемое долевое участие угольных пластов различными качественными характеристиками в шихте, подаваемой на обогатительные фабрики и пункты переработки угля. Соответственно, пологопадающие месторождения угля характеризуются большими значениями параметров рабочих площадок, разгрузочных площадок и меньшей крутизной автомобильных съездов и делают роботизацию автомобильного транспорта на российских предприятиях открытого способа добычи угля привлекательной, особенно в условиях дефицита квалифицированных работников и ужесточения конкуренции на мировых рынках энергоносителей.

Полученные результаты и их обсуждение

В динамично развивающейся угольной компании АО «СУЭК» рассматривается применение роботизированного автотранспорта, апробация которого осуществляется в Хакасии. С 2019 г. по настоящее время эксплуатируются два роботизированных автосамосвала БелАЗ-7513R. Значения показателей, отражающих эффективность использования роботизированного автотранспорта, полученных во время опытно-промышленной эксплуатации, были значительно ниже целевых, установленных для данного проекта (табл. 1). Значения целевых показателей эффективности эксплуатации роботизированного автотранспорта превышают в среднем на 20% значения показателей, достигаемых при традиционной технологии транспортирования.

По итогам анализа эксплуатации роботизированных автосамосвалов было определено, что неудовлетворительные значения показателей их работы во многом обусловлены создаваемыми условиями, в которых они эксплуатируются, а также значениями технологических параметров этих условий [5]. Под технологическим парамет-

ром понимается величина показателя, определяющая состояние или условия проведения процесса. Условия эксплуатации для роботизированных автосамосвалов формировались в основном по принципу – освоение лучших условий, создаваемых для пилотируемых автосамосвалов на отечественных угледобывающих предприятиях, с учетом зарубежного опыта эксплуатации роботизированных автосамосвалов на горнорудных месторождениях с углубочными и смешанными системами разработки. В результате программное обеспечение роботизированных автосамосвалов при возникновении любых отклонений от проектных параметров осваиваемой технологии выполняло команду «стоп», что не позволило в достаточной мере использовать технический потенциал этого оборудования.

Для определения факторов, сдерживающих достижение значений целевых показателей работы роботизированных автосамосвалов, был произведен анализ структуры фонда времени роботизированного автосамосвала. Определено, что время производительной работы составляло в среднем 27% от календарного фонда времени этих машин. В структуре простоев выделены следующие группы:

- неплановые и плановые ремонты оборудования, не связанные с автоматизацией роботизированных автосамосвалов;
- взаимодействие с комплексом вспомогательного оборудования;
- организация транспортных коммуникаций;
- организация работы в забое и на отвале;
- отказы оборудования автоматизации роботизированных автосамосвалов (рис. 1).

Выделенные группы простоев позволили идентифицировать составляющие горнотехнической системы и определить ключевые показатели параметров технологии, изменение которых позволит повысить время производительной работы роботизированных автосамосвалов [6].

Таблица 1. Оценка результатов освоения роботизированного автотранспорта
Table 1. Evaluation of robotic road transport development

Показатель	Ожидаемый результат	Фактический результат	Отклонение, разы	Причина отклонения
Количество рейсов за месяц, ед.	1586	487	↓ 3,26	
Производительность, тыс. т·км/мес.	169,7	81,1	↓ 2,09	
Коэффициент использования	0,82	0,62	↓ 1,25	
Удельный расход топлива, г/т·км	95	110	↓ 1,16	
Снижение затрат на ремонт у БелАЗ 75131R относительно БелАЗ 75131	на 10%	на 4%	↓ 2,50	Несоответствие фактических технологических параметров требуемым
Снижение численности персонала в процессе транспортирования	на 80%	на 60%	↓ 1,33	



Рис. 1. Распределение фонда времени роботизированных автосамосвалов в 2020 г.
Fig. 1. Distribution of the time fund of robotic dump trucks in 2020

К ключевым составляющим горнотехнической системы, существенно оказывающим влияние на время производительной работы роботизированных автосамосвалов, отнесены технологические параметры рабочих и разгрузочных площадок, транспортных коммуникаций, организация работы в забое и на отвале, транспортные коммуникации и взаимодействие с комплексом вспомогательного оборудования.

Показателями параметров исследуемой технологии, выделенных характеристик горнотехнической системы являются: ширина рабочей площадки экскаватора, ширина и конструкция разгрузочной площадки, угол постановки автосамосвала под погрузку экскаватором, качество дорожного полотна, ширина проезжей части, наличие заужений, просыпей и величина уклонов автодороги, пропускная способность информационной сети, качество покрытия связью, уровень обособленности зоны работы роботизированного автомобильного комплекса и качество организации работы со вспомогательным оборудованием.

Выделенные характеристики горнотехнической системы и показатели технологических параметров роботизированных автосамосвалов позволили осуществить имитационное моделирование, заключающееся в исследовании влияния структуры технологических параметров на результаты работы этих машин. Учитывая то, что открытая отработка пологопадающих месторождений угля обусловлена необходимостью поддержания требуемой скорости подготовки готовых запасов, в качестве ключевого показателя работы роботизированных автосамосвалов определена величина эксплуатационной скорости этих машин. Имитационное моделирование позволило в зависимости от численного значения каждого параметра технологии выделить пять категорий качества условий эксплуатации роботизированных автосамосвалов,

определяющих величину их эксплуатационной скорости (табл. 2) [7]. Под качеством условий эксплуатации роботизированных автосамосвалов понимается совокупность взаимосоответствующих технологических параметров работы автосамосвалов, обуславливающих изменение показателей их функционирования.

Экономическое обоснование целесообразности перехода на повышенную категорию базировалось на сопоставлении экономического результата от повышения эксплуатационной скорости роботизированных автосамосвалов и затрат, обусловленных созданием более привлекательных условий эксплуатации этих машин. Расчеты дали основание утверждать, что основным показателем, обеспечивающим экономическую эффективность роботизированного автотранспорта угольного разреза, является его стабильная средняя эксплуатационная скорость. Переход от первой категории на пятую позволяет повысить эксплуатационную скорость роботизированных автосамосвалов в среднем до 5 раз – с 4 до 20 км/ч и сократить себестоимость их работы до 1,5 раза.

Благодаря обоснованию рациональных параметров открытой угледобычи пологопадающих месторождений при роботизации автомобильного транспорта удалось сформировать целенаправленную деятельность по повышению качества условий для эксплуатации этих машин. Изменение технологических параметров позволило повысить эксплуатационную скорость роботизированных автосамосвалов в 2,6 раза (рис. 2).

На основании обобщения результатов проведенного исследования по повышению эксплуатационной скорости роботизированных автосамосвалов разработана схема формирования и освоения технологических параметров открытой угледобычи при роботизации автомобильного транспорта, приведенная на рис. 3.

Таблица 2. Технологические параметры открытой угледобычи при роботизации автомобильного комплекса в составе двух единиц автосамосвалов БелАЗ-7513Р

Table 2. Technology parameters of open-pit coal mining with the robotic road transport complex, consisting of 2 dump trucks, BelAZ-7513R

Составляющие горнотехнической системы	Показатель технологических параметров	Ед. изм.	Категория качества условий эксплуатации				
			I	II	III	IV	V
Организация работы в забое и на отвале	Ширина рабочей площадки экскаватора	м	20-30	30-40	40-60	60-80	80-100
	Ширина разгрузочной площадки	м	20-30	40-80	80-100	100-150	150-200
	Конструкция разгрузочной площадки		Однозонная	Однозонная	Двухзонная	Двухзонная	Трехзонная
	Угол постановки автосамосвала под погрузку экскаватором	град	≈ 90	≈ 90	60-90	60-90	60-90
Транспортные коммуникации	Качество дорожного полотна (по ГОСТ Р 50597-2017)		Наличие колеи, волн, ям, выбоин выше 50% от общей протяженности дороги	Наличие колеи, волн, ям, выбоин выше 20% от общей протяженности дороги	Наличие волн, выбоин выше 10% от общей протяженности дороги	Наличие волн выше 10% от общей протяженности дороги	Отсутствие колеи, волн, ям, выбоин
	Минимальная ширина проезжей части	м	10-12	12-20	20-26	26-30	Не менее 30
	Наличие заужений автодороги на 30%	шт./к м	< 4	1-3	> 1	0	0
	Уклоны	%	90-100	90-100	80-90	60-80	60
	Пропускная способность информационной сети	Мб/с	Не менее 20	Не менее 25	Не менее 30	Не менее 35	Не менее 35
	Покрытие связью		Локальное	Локальное	Ковровое	Ковровое	Ковровое
	Обособленность зоны работы роботизированного автомобильного комплекса		Необособленный	Частично обособленный	Частично обособленный	Полностью обособленный	Обособленность не требуется
Взаимодействие с комплексом вспомогательного оборудования	Наличие просыпей с размером куска в поперечнике более 30 см.		Просыпь по всей протяженности автодороги	Одиночные куски в зонах виражей, зон погрузки/разгрузки	Одиночные куски горной массы на 1 км	Нет	Нет
	Качество организации работы со вспомогательным оборудованием (бульдозер, грейдер, поливо-прососительная машина)		Работа вспомогательной техники по технологии с пилотируемыми автосамосвалами	Дооборудование вспомогательной техники аварийной кнопкой остановки роботизированного автосамосвала	Дооборудование вспомогательной техники аварийной кнопкой остановки роботизированного автомобильного комплекса, наличие площадок для разъезда вспомогательной техники и автосамосвалов	Дооборудование системой распознавания свой/чужой, наличие площадок для разъезда, дооборудование комплекса системой автоматического определения параметров дорог и разгрузочных площадок	Дооборудование системой распознавания свой/чужой, наличие площадок для разъезда, дооборудование комплекса системой автоматического определения параметров дорог и разгрузочных площадок
	Производительность на плечо откатки 1,7	м ³ /смену	1300-2500	2500-3000	3000-3500	3500-4000	4000-5500
Результаты работы роботизированного автомобильного комплекса	Эксплуатационная скорость	км/ч	3-9	9-11	11-13	14-15	15-20
	Себестоимость	раз	1,4-1,6	1,2-1,4	1,1-1,2	1,05-1,1	1,0

 - освоенный результат  - периодически достигаемый результат  - целевой результат



Рис. 2. Эксплуатационная скорость роботизированных автосамосвалов
Fig. 2. Operating speed of robotic dump trucks

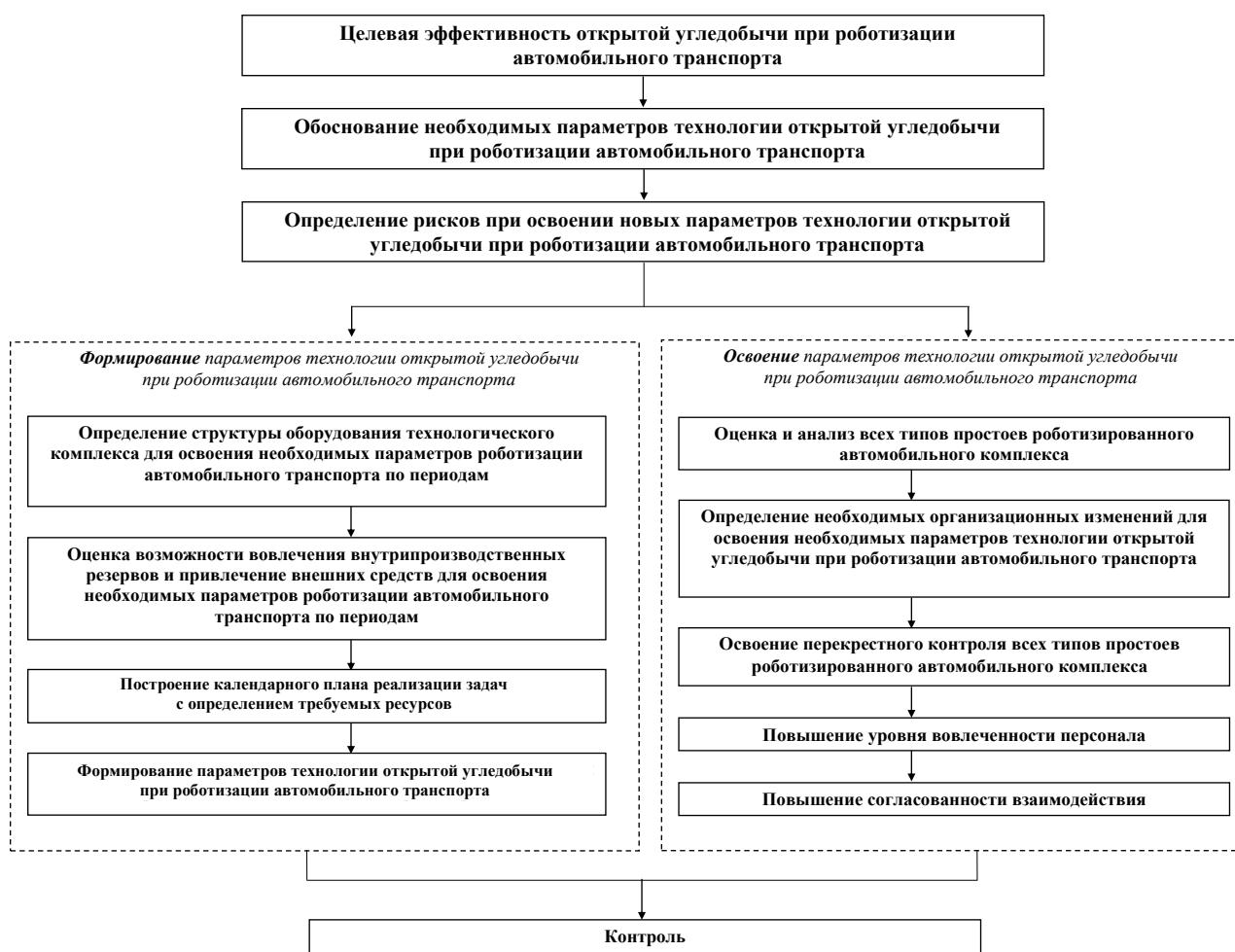


Рис. 3. Схема формирования и освоения технологических параметров открытой угледобычи при роботизации автомобильного транспорта
Fig. 3. The sequence of setting and developing technology parameters of open-pit coal mining, when using robotic road transport

Направления дальнейших исследований

Произведенная работа по повышению эксплуатационной скорости роботизированного автомобильного транспорта путем изменения категории качества условий его эксплуатации позволили выявить, что для обеспечения эффективности работы роботизированного транспорта требуется оценка экономической целесообразности вложения средств в улучшение условий эксплуатации. Рентабельность вложений определяется с учетом актуальных цен на производственные ресурсы. Экономическая целесообразность вложения средств в повышение категорий качества условий эксплуатации роботизированного автомобильного транспорта для увеличения его эксплуатационной скорости зависит от ценности разрабатываемого месторождения – целевой результат главным образом от цены продаваемой продукции, которая определяет долю стоимости владения роботизированным комплексом в выручке предприятия. Осуществляется разработка методического инструментария определения рентабельности повышения качества условий эксплуатации роботизированного автомобильного транспорта.

Кроме этого, дальнейшие исследования по повышению эффективности технологии открытой угледобычи пологопадающих месторождений при роботизации автомобильного транспорта предполагают поиск и обоснование организационно-технологических решений, освоение которых позволит управлять переходным процессом от работы в менее качественных категориях условий эксплуатации роботизированного автомобильного транспорта к более качественным категориям условий его работ [8]. Предполагается, что данный переходный процесс будет базироваться на формировании взаимосогласованных изменений технологических, трудовых и организационно-управленческих процессов горнотехнической системы [9, 10].

Заключение

Исследование показало, что одним из основных показателей, обеспечивающих экономическую эффективность роботизированного автотранспорта угольного разреза, является его стабильная средняя эксплуатационная скорость. Выделены пять категорий качества для условий эксплуатации роботизированных автосамосвалов, определяющих величину их эксплуатационной скорости. Основными технологическими параметрами, влияющими на эксплуатационную скорость,

являются: ширина рабочей площадки экскаватора и разгрузочной площадки автосамосвала, конструкция разгрузочной площадки, угол постановки автосамосвала под погрузку экскаватором, качество дорожного полотна, ширина проезжей части, параметры сетей и связи, качество организации работы со вспомогательным комплексом. Переход от первой категории на пятую позволяет повысить эксплуатационную скорость автосамосвалов до 5 раз и сократить себестоимость работ до 1,5 раза.

Благодаря обоснованию и применению рациональных, взаимосоответствующих параметров технологии открытой угледобычи пологопадающих месторождений при роботизации автомобильного транспорта в условиях ООО «СУЭК-Хакасия» удалось повысить эксплуатационную скорость роботизированных автосамосвалов в 2,6 раза.

Опираясь на выделенные категории качества условий эксплуатации и разработанную схему формирования и освоения технологических параметров открытой угледобычи при роботизации автомобильного транспорта, возможно эффективно осуществлять комплекс мероприятий по повышению эксплуатационной скорости этих машин.

Список литературы

- Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации. Утверждена Указом Президента Российской Федерации от 1 декабря 2016 г. №642 (в ред. Указа Президента Российской Федерации от 15 марта 2021 г. № 143). 15 с.
- Хазин М.Л. Роботизированная техника для добычи полезных ископаемых // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т. 18, №1. С. 4–15.
- Сбербанк. Аналитический обзор мирового рынка робототехники. С. 15–22.
- Роботизированные геотехнологии как путь повышения эффективности и экологизации освоения недр / М.В. Рыльникова, Д.Я. Владимиров, И.А. Пыталев, Т.М. Попова // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2017. С. 93–96.
- Артемьев В.Б., Килин А.Б., Галкин В.А. Проблемы формирования инновационной системы управления эффективностью и безопасностью производства в условиях финансового кризиса // Уголь. 2009. №6. С. 24–27.
- Взаимосвязь организации и технологии горного производства / В.Б. Артемьев, А.Б. Килин, В.А. Галкин, А.М. Макаров // Открытые горные работы в XXI веке: результаты, проблемы и перспективы развития: материалы III международной научно-практической конференции: ГИАБ (научно-технический журнал). В 2-х т. Т. 1. 2017. №12 (специальный выпуск 37). С. 68–76.

7. Хажиев В.А. Оценка влияния эксплуатационных факторов на эффективность использования экскаваторов-мехлопат на угольных разрезах // Горное оборудование и электромеханика: научно-аналитический и производственный журнал. 2009. №6. С. 21–26.
8. Развитие организационно-технологической структуры угледобывающего предприятия в условиях переходных процессов / В.Л. Яковлев, А.Б. Килин, В.А. Азев, Г.Н. Шаповаленко // Развитие угледобывающего производственного объединения: Горный информационно-аналитический бюллетень. Отдельный выпуск. 2016. Специальный выпуск №34. С. 8–19.
9. Азев В.А. Методология комплексного планирования развития угледобывающего предприятия // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Отдельная статья. 2018. №7 (спецвыпуск №40). 50 с.
10. Артемьев В.Б. Стратегия организационно-технологического развития угледобычи в ОАО «СУЭК» // Уголь. 2008. Спецвыпуск. С.11.

References

1. Strategy of scientific and technological development of the Russian Federation. Approved by Decree of the President of the Russian Federation No. 642 dated December 1, 2016 (as amended by Decree of the President of the Russian Federation No. 143 dated March 15, 2021). 15 p.
2. Khazin M.L. Robotic equipment for mining. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2020, vol. 18, no. 1, pp. 4–15. (In Russ.)
3. Sberbank. Analytical review of the international robotics market, pp. 15–22.
4. Rylnikova M.V., Vladimirov D.Ya., Pytalev I.A., Popova T.M. Robotic geotechnologies as a way to increase efficiency and eodesign of subsoil development. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh* [Physical and Technical Problems of Mining], 2017, pp. 93–96. (In Russ.)
5. Artemiev V.B., Kilin A.B., Galkin V.A. Problems of setting an innovative system for managing efficiency and safety of production during the financial crisis. *Ugol* [Coal], 2009, no. 6, pp. 24–27. (In Russ.)
6. Artemiev V.B., Kilin A.B., Galkin V.A., Makarov A.M. Relationship between organization and technology of mining. *Otkrytie gornye raboty v XXI veke: rezul'taty, problemy i perspektivy razvitiya: materialy III mezhdu-narodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Open-pit mining in the 21st century: results, problems and prospects of development: Proceedings of the 3rd International Scientific and Practical Conference]. *GIAB* [Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)], in 2 volumes, vol. 1, 2017, no. 12 (special issue 37), pp. 68–76. (In Russ.)
7. Khaziev V.A. Evaluation of the influence of operational factors on efficiency of using mechanized shovels in open-pit coal mines. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika: nauchno-analiticheskiy i proizvodstvennyy zhurnal* [Mining Equipment and Electromechanics: Scientific, Analytical and Production Journal], 2009, no. 6, pp. 21–26. (In Russ.)
8. Yakovlev V.L., Kilin A.B., Azev V.A., Shapovalenko G.N. Development of the organizational and technological structure of a coal-mining enterprise in transient processes. *Razvitiye ugledobyvayushchego proizvodstvennogo obedineniya: Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Development of a Coal-Mining Industrial Association: Mining Informational and Analytical Bulletin], 2016, special issue No. 34, pp. 8–19. (In Russ.)
9. Azev V.A. Methodology of comprehensive planning of coal mining enterprise development. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten* (nauchno-tehnichesky zhurnal) [Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)], 2018, no. 7 (special issue No. 40), 50 p. (In Russ.)
10. Artemiev V.B. Strategy of organizational and technological development of coal mining at OJSC SUEK. *Ugol* [Coal], 2008, special issue, p. 11. (In Russ.)

Поступила 31.03.2022; принята к публикации 15.04.2022; опубликована 28.06.2022
Submitted 31/03/2022; revised 15/04/2022; published 28/06/2022

Азев Владимир Александрович – доктор технических наук, заместитель генерального директора – технический директор, ООО «СУЭК-Хакасия», Черногорск, Россия. Email: AzevVA@suek.ru

Гартман Александр Александрович – заместитель генерального директора по производству, ООО «СУЭК-Хакасия», Черногорск, Россия. Email: GartmanAA@suek.ru

Хажиев Вадим Аслямович – кандидат технических наук, заведующий лабораторией эффективной эксплуатации оборудования, Научно-исследовательский институт эффективности и безопасности горного производства, Челябинск, Россия. Email: vadimkhazhiev@gmail.com

Vladimir A. Azev – DrSc (Eng.), Deputy General Director – Technical Director, SUEK-Khakassia LLC, Chernogorsk, Russia. Email: AzevVA@suek.ru

Alexander A. Gartman – Deputy Deputy General Director for Production, SUEK-Khakassia LLC, Chernogorsk, Russia. Email: GartmanAA@suek.ru

Vadim A. Khazhiev – PhD (Eng.), Head of the Laboratory of Efficient Operation of Equipment, Research Institute of Efficiency and Safety of Mining, Chelyabinsk, Russia. Email: vadimkhazhiev@gmail.com

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 622.1
DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-2-13-22



IMPLEMENTING A DISCHARGE SLOT WIDTH CONTROL SYSTEM IN CONE CRUSHERS

Grishin I.A.¹, Bochkov V.S.², Velikanov V.S.^{2,3}, Dyorina N.V.¹, Surovtsov M.M.¹, Moreva Yu.A.¹

¹Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

²Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia

³Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

Abstract. It is well known that a crushing process is one of the most energy intensive technological processes in mineral processing. The aim of this process is to achieve the required size of the processed raw material. The course of the crushing process is characterized by the influence of a number of basic factors: multidimensionality, multiple connections, nonlinearity, physical and mechanical properties of the mineral, shape and size of rock lumps, position of the crushing material inside the crushing chamber, lumps movement speed, wear of a liner and elements of the crusher, as well as design parameters of the crusher. Efficiency of the crushing process in the process flow of solid mineral processing is achieved by applying reasonable operation parameters of crushing equipment, ensuring the set performance and particle size distribution of the crushed ore at minimum electricity consumption. When processing minerals, the size is often monitored between individual operations. **Objective.** The objective is to provide an innovative solution in developing intelligent systems for automatic control, resulting in adaptive control, depending on changes of the material size distribution by making measurements “inside” the technological equipment. **Methods Applied.** Methodology of fuzzy logic theory and fuzzy sets was used. **Originality.** We made it possible to distinguish frame differences in a video stream to detect defects and wear of a crusher liner. **Result.** The paper identifies an approach to monitoring the discharge slot width for crushing and milling complexes using intelligent control methods.

Keywords: minerals, crusher, control, sensor, fuzzy logic, controller.

© Grishin I.A., Bochkov V.S., Velikanov V.S., Dyorina N.V., Surovtsov M.M., Moreva Yu.A., 2022

For citation

Grishin I.A., Bochkov V.S., Velikanov V.S., Dyorina N.V., Surovtsov M.M., Moreva Yu.A. Implementing a Discharge Slot Width Control System in Cone Crushers. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 2, pp. 13–22. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-2-13-22>



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

О ВОЗМОЖНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ШИРИНЫ РАЗГРУЗОЧНОЙ ЩЕЛИ В КОНУСНЫХ ДРОБИЛКАХ

Гришин И.А.¹, Бочков В.С.², Великанов В.С.^{2,3}, Дёрина Н.В.¹, Суровцов М.М.¹, Морева Ю.А.¹

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

²Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия

³Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

Аннотация. Общеизвестно, что процесс дробления является одним из самых энергоемких технологических процессов в переработке полезных ископаемых. Цель данного процесса заключается в достижении требуемой крупности перерабатываемого сырья. Ход протекания процесса дробления характеризуется влиянием ряда основных факторов: многомерность, многосвязность, нелинейность, физико-механические свойства полезного ископаемого, форма и размер кусков горной породы, положение дробимого материала внутри камеры дробления, скорость движения кусков, износ футеровочной брони и элементов агрегата, а также конструктивные параметры дробилки. В технологической цепочке переработки твердых полезных ископаемых эффективность процесса дробления достигается реализацией рациональных режимных параметров работы дробильного оборудования, обеспечивающих заданную производительность и гранулометрический состав дробленой руды при минимальных затратах электроэнергии. В процессе переработки полезных ископаемых крупность чаще всего контролируется между отдельными операциями. **Цель исследования.** Инновационное решение в области создания интеллектуальных систем автоматического управления, следствием чего является возможность адаптивного управления в зависимости от изменения гранулометрического состава материала за счет измерений «внутри» технологического оборудования. **Используемые методы.** Использована методология теории нечеткой логики и нечетких множеств. **Новизна.** Реализована возможность распознания различий кадров видеопотока для обнаружения дефектов и износа футеровочной брони дробилок. **Результат.** В работе определен подход в контроле ширины разгрузочной щели для дробильно-измельчительных комплексов с использованием методов интеллектуального управления.

Keywords: полезное ископаемое, дробилка, управление, датчик, нечеткая логика, регулятор.

Для цитирования

Implementing a Discharge Slot Width Control System in Cone Crushers / Гришин И.А., Бочков В.С., Великанов В.С., Дёрина Н.В., Суровцов М.М., Морева Ю.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №2. С. 13–22. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-2-13-22>

Introduction

The technological steps in the processing of solid minerals have remained unchanged for several decades. Crushing and grinding are energy intensive processes. According to UNESCO, humanity spends up to 5–7% of all energy generated on crushing and grinding [1]. For example, the cost of crushing and grinding in the ore concentrate cost reaches 40%. A large amount of crushing equipment is in operation in modern industrial production. Cone crushers are the most commonly used type of crushers for the medium (MCC) and fine (FCC) crushing stages in the mining industry. In scientific and technical literature the process of crushing rock in cone crushers, which takes place between stationary and rotating inner cone, is described in detail and the main parts of these crushers are: cylindrical body, mounted on a base,

stationary cone, movable crushing cone, mounted on a shaft and supported by a spherical thrust bearing, drive mechanism. This type of crushers is used for materials with different physical and mechanical properties. Cone crushers do not need feeders and can work "under the hopper", i.e. with the working space completely filled with ore coming from the hopper (Fig. 1) [2, 3].

When creating modern automatic control systems of cone crushers, one of the important factors in their development is the adoption of a reasonable efficiency criterion that reflects the objective laws of the crushing process. The application of reasonable criterion in realization of crushing process control method based on material particle size distribution control will provide increase in productivity and reduction of energy consumption for crushing [4–6].

When considering this issue, the following circumstance should be taken into account. Crushing

equipment is operated in different branches, therefore, in our opinion; there cannot be one generalized criterion of material crushing efficiency. So, for example, the specific income E considering relative output of various commodity fractions of crushed rock of various costs and most fully conforming to the enterprise purpose function as a whole is accepted for building branch as criterion of efficiency of process of crushing [7].

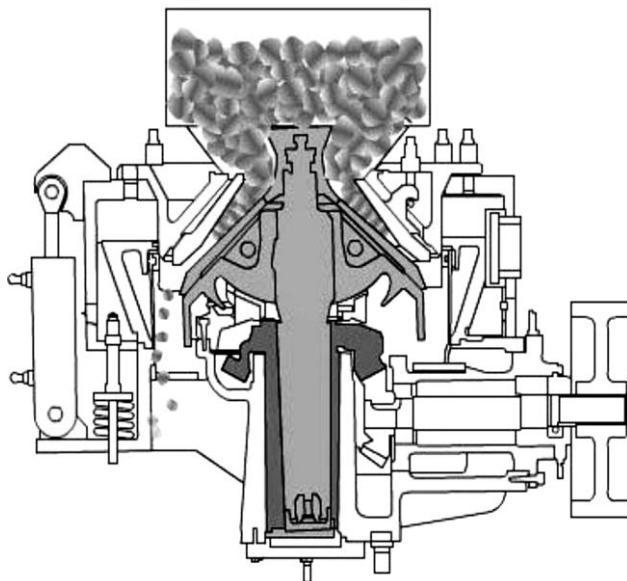


Fig. 1. Medium cone crusher
Рис. 1. Конусная дробилка среднего дробления

In [8–10], in continuation of Z. Ganbaatar's research, the author, after adjusting and adapting to new conditions, especially the fine crushing process in a closed cycle and reducing the size of the crushed ore, adopted the "Productive grade yield" as an efficiency criterion.

The crushers are currently equipped with local automated control systems (ACS) for the main and auxiliary drives. All of the automated control systems currently implemented in cone crushers can be divided into two groups: throughput control systems and gradient control systems. Grain size distribution control systems are based on the Hydrocone crushers from Sandvik Rock Processing. As an object of automation a cone crusher can be represented as follows (Fig. 2) [7].

The size of the crusher's discharge slot and the rotation speed of the crushing cone are the most common controlling influences in the ACS of the granulometric composition.

In researches [7] the analysis of influence of speed of rotation of a cone on granulometric of crushed product (crushed rock) is carried out. It is established, that decrease in speed of rotation of a cone leads to decrease in productivity, and increase – slightly increases a output of fraction 5–20 mm with simultaneous increase in a output of waste (fraction 0–5 mm).

However, it should be noted that there is no consensus about essential influence of the size of unloading slot on granulometric composition.

Thus, the authors in [11] note that in cone crushers of coarse crushing the possible deviations of the width of the discharge gap from the specified value, as a rule, are timely eliminated by the maintenance personnel during preventive inspections. In addition, the change in the width of the discharge gap on the grain size distribution during operation is so small that its effect is negligible. This can be interpreted in different ways, since the maintenance and repair system (M&RS) has undergone significant changes in the plants.

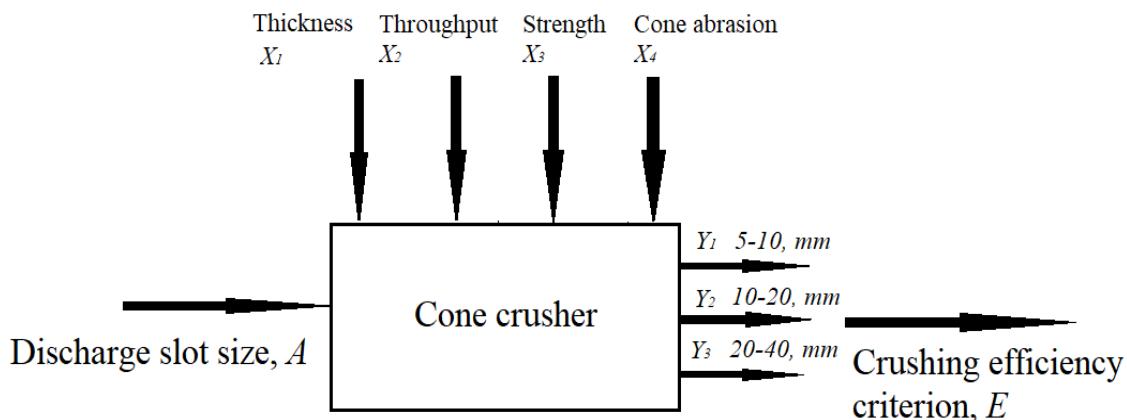


Fig. 2. Cone crusher as an object of automatic control [7]
Рис. 2. Конусная дробилка как объект автоматического управления [7]

The proportion of the crushed product fraction changes due to a widening of the discharge gap caused by abrasion of the liner mantle plates and the inside of the cones. Wear of the liners has a significant effect on the crusher's throughput capacity. This ultimately determines the qualitative deterioration of the granulometric composition of the crushed rock. It should be noted that the labour and maintenance costs of replacing the liners is costly. The analytical dependence which allows calculating the width of the discharge slot $A_{\Delta}(t)$ at a certain time t of the equipment operation is as follows [12]:

$$A_{\Delta}(t) = A_{\Delta} + \int_0^t v(A_1) dt + \int_0^t v(A_7) dt.$$

The laws studies of particle size distribution formation in a closed cycle "crushing - screening" have shown that an important factor in the process is the width of the crusher's discharge slot [13]. Increasing the discharge slot width naturally increases the plus class output of the screening operation (Fig. 3).

This conclusion is supported by other studies [14, 15], which point out that the granulometric composition non-compliance of the crushed rock with the required values is a determining indirect indicator of the need to stop the crusher for inspection and repair.

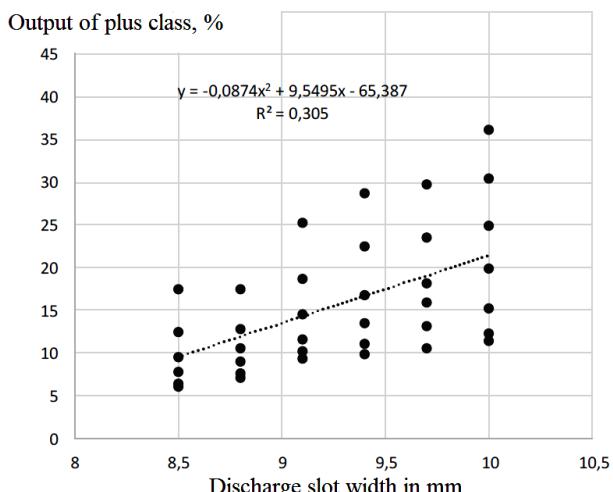


Fig. 3. Dependence between the yield of the oversize products and the discharge slot width of the KMD-3000T2-DP crusher according to the common data array [13]

Рис. 3. Зависимость выхода надрешетного класса от ширины разгрузочной щели дробилки КМД-3000Т2-ДП по общему массиву данных [13]

Materials and methods

To date, the particle size distribution control of the crushed product (hence the width of the crusher's discharge slot) is usually carried out more between individual operations on conveyors. A method of optical control using optical analysers has been known since the mid-1960s.

In a number of publications the visiometric analysis method for size distribution of crushing products is mentioned as a promising direction for the control of particle size distribution. In terms of technical implementation, visiometric monitoring system includes illuminating device, video camera and processor, etc. (Fig. 4) [16].

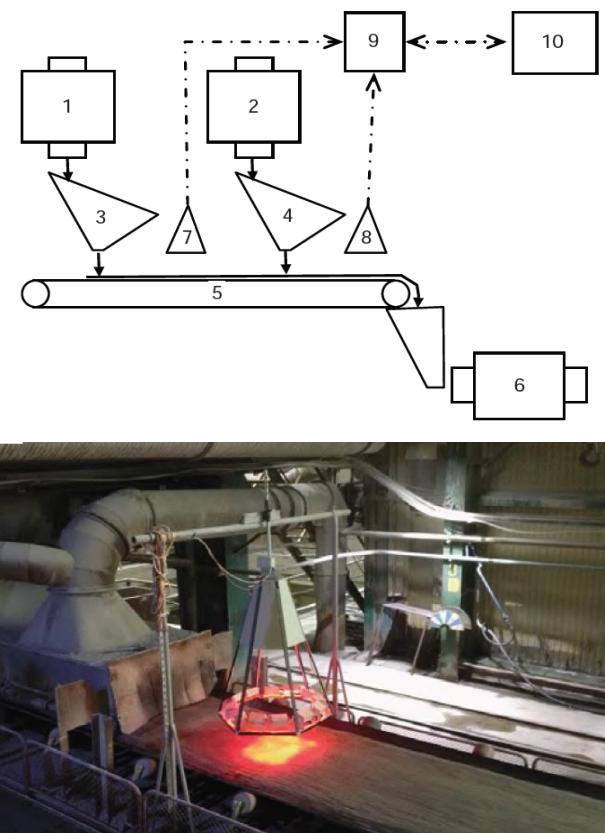


Fig. 4. Schematic diagram and general view of the Granix visiometric analysis unit [16]:

1, 2 are crushers; 3, 4 are screens;
5 is a conveyor; 6 is a drum mill; 7, 8 are video imagers; 9 is a processor; 10 is a server

Рис. 4. Схема и общий вид установки визиометрического анализа «Граникс» [16]: 1, 2 – дробилки; 3, 4 – грохоты; 5 – конвейер; 6 – барабанная мельница; 7, 8 – устройства съема видеоизображений; 9 – процессор; 10 – сервер

In the development of further research, the research team under the leadership of Professor

V.V. Morozov (MISIS) created an improved system and methodology for assessing the grade of copper-molybdenum ore based on the results of its optical characteristics measurements using modern algorithms of colour image recognition.

From our point of view, promising solutions in the area of unloading slot width monitoring are:

- the possibility of using video endoscopic equipment. The idea of using the endoscopic survey method is not new in principle. The endoscopic research method of disintegration of intracircuit massif of mine workings was offered by VNIMI at the beginning in 1970s of the XX century. Currently, Kuzbass-COT Elektro Ltd manufactures the "Smart Partner" explosion-protected video endoscope. The video endoscope together with other means of mining control allows optimisation of production processes and saves time for surveyors and geologists.

Industrial video endoscopes are successfully used to identify surface defects in lining mantle. Visual monitoring of any point in the working area of a cone crusher is carried out through the process openings (Fig. 5);

- ultrasonic method. In order to establish the actual values of the lining mantle, an ultrasonic thickness gauge can be used, which has an alphanumeric data logger and a colour transreflective display, allowing the inspection results to be displayed as a cross-sectional view. The ultrasonic method also makes it possible to detect latent defects - the presence of defective cracks that run along the entire depth of the lining mantle [14, 17, 18].

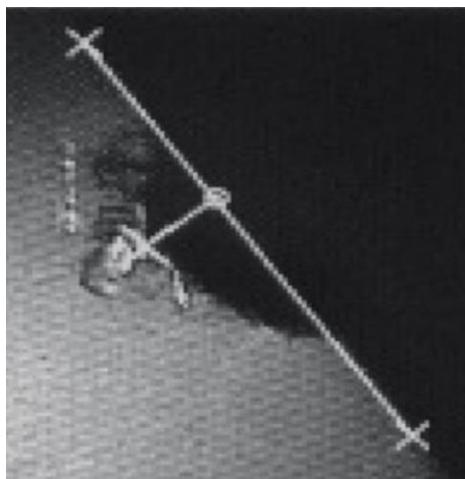


Fig. 5. Liner surface damage assessment using a video endoscope [12]

Рис. 5. Оценка размера поверхностного разрушения футеровочной брони с использованием видеоэндоскопа [12]

Findings and discussion

The idea of assessing the condition of the crusher liner mantle is based on research to establish quality indicators of materials, products and structures in industrial safety [19], namely the quality assessment of concrete samples.

Thus, we propose the following: continuous monitoring the condition of the lining mantle using a video endoscope; data consolidation about the strength characteristics of the mantle material and dynamic characteristics (change in continuity over time) accompanying the mantle destruction; visual analysis of mantle destruction, using the results of video stream processing frames and expert evaluation (Fig. 6).

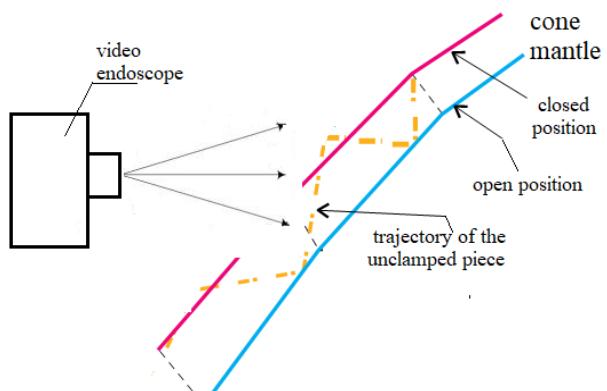


Fig. 6. CCTV monitoring of the crusher liner condition

Рис. 6. Схема видеонаблюдения за состоянием футеровочной брони дробилки

The camera is statically installed in the process opening.

First step: the camera takes a picture of the lining mantle when it is in perfect condition, i.e. without any damage. This picture will hereinafter be referred to as Photo_0.

Second step: at certain time intervals, e.g. every 3 days, the camera takes pictures of the lining mantle (Photo_1, Photo_2, etc.).

The third step: a program is created which:

1) converts the photos to black and white format. This is necessary to highlight defects in the photos;

2) compares the photos obtained later with Photo_0 and determines the differences between the photos;

3) determines degree of differences between photos by a percentage, i.e. 30% – degree of differences is small; 50% – differences are present; 75% – degree of differences is high;

4) the percentage is stored in a file for further processing.

Step four: a second programme is created which reads the data from the file and, using a plug-in card and LEDs, sends a signal according to the percentage.

In order to be able to realise an ACS for output slot control, information on the material flow both into and out of the crusher is required. This information is usually contradictory and uncertain. Therefore from our point of view it is reasonable to apply fuzzy control methods. Since the basic provisions of fuzzy sets and fuzzy logic theory are set out in detail enough in the scientific and technical literature, then let's turn directly to the practical use side of fuzzy control methods for the developed ACS for crusher type FCC-1750Gr-C [20-22]. In our case as a regulator of width of a discharge gap it is justified to apply the fuzzy regulator (FR). Adjustment of FR

Table . Formalisation of fuzzy linguistic variables

Таблица. Формализация нечетких лингвистических переменных

Name of the fuzzy variable	Definition area	Term sets	The area of the term set definition
Input linguistic variables			
<status of lining mantle>, mm	[120;20]	<Normal>=N	[120;80]
		<Satisfactory>=S	[85;40]
		<Critical>=C	[45;20]
< class output larger than the required maximum piece>, (%)	[0;50]	<Normal> (plus class output)=NPCO	[0;10]
		<Satisfactory>=SPCO	[5;15]
		<Unsatisfactory>=Non-PCO	[14;50]
Output linguistic variable			
<discharge slot width>, mm	[9;20]	<Normal>=N (Discharge gap according to crusher manufacturer's product catalogue)	[10;12]
		<Enhanced>=U	[15;20]
		<Critically increased>=CU	[20;25]

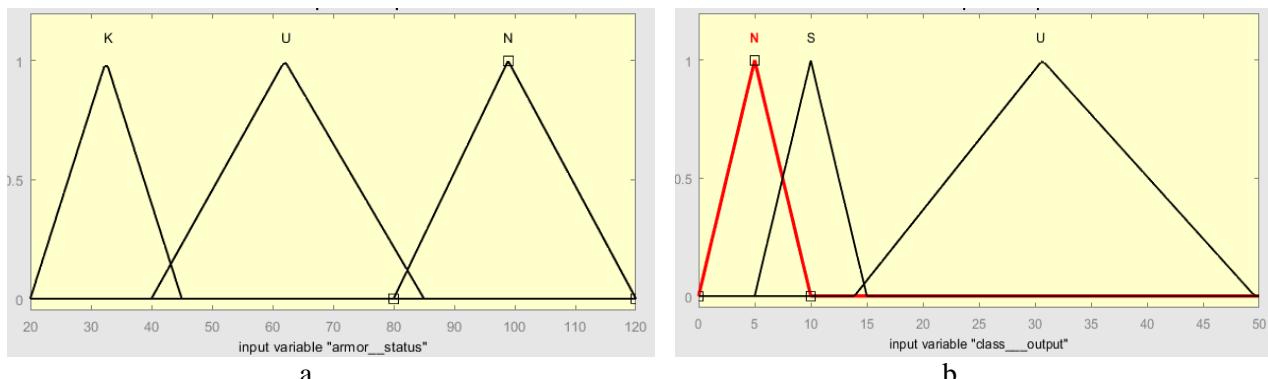


Fig. 7. Term set of input parameters: a is a liner condition; b is yield of the size coarser than a required maximum piece
Рис. 7. Терм-множество входных параметров: а – состояние футеровочной брони; б – выход класса крупнее требуемого максимального куска

is carried out in several stages. To synthesize FR let's define the main fuzzy variables, define their term-menu and set the membership functions for each term-menu of fuzzy variables. There are two control signals on FR input - state of lining mantle and output of class larger than required maximum piece, and width of unloading slot on output accordingly.

Experts were involved for phase identification. By expert methods, the term-numbers and membership functions of all linguistic variables are determined (**Table**).

Fig. 7 shows a graphical representation of the membership functions (MFs) of the input fuzzy variables using the MatLab environment of the Fuzzy Logic package.

Fuzzy logic inference rules are also drawn from experts, in our case they are of the following form:

R₁: if the condition of the lining mantle is "N" and the class yield is larger than the required maximum piece "N" then the width of the discharge slot "N".

.....

R_n: if the state of the lining mantle is "S" and the class yield is larger than the required maximum piece "N", and then the discharge slot width is "enlarged".

A set of fuzzy logic inference rules is also implemented using this software package.

Directions for further research

Implementation of ACS for controlling the discharge slot width in cone crushers in MatLab using the Simulink application.

Conclusions

To date, the absence of automated grit size control systems on cone crushers of fine crushing in domestic production, in particular, crushers of PJSC "Uralmashzavod", has a negative impact on their competitiveness in comparison with their foreign analogues. Therefore, the implementation of the proposed approach will significantly increase the consistency of particle size distribution at the outlet of the crusher and reduce energy consumption for crushing, which increases significantly when the average particle size increases after crushing.

Among the supposed difficulties which can appear at realization of the offered approach is a working zone dustiness of a cone crusher and, accordingly, application necessity of either special video systems, or techniques of dust suppression, for example irrigation of crushed ore on an exit from the crusher. It should also be noted that the use of hydraulic actuators for adjustment of the outlet slot, with all its advantages, namely the accuracy of regulation and high developed forces, may cause contamination of hydraulic cylinders due to, again, the dustiness of the crusher's working space. However, this problem can be solved by the use of various protective gaskets and by removing the hydraulic cylinders from the working area.

References

1. <https://solidground.sandvik/>
2. Grishin I.A., Ismagilov K.V., Velikanov V.S. *Elektromekhanicheskoe oborudovanie rudoobogatitelnykh fabrik: laboratornye praktikum* [Electromechanical equipment of ore processing plants: laboratory workshop]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2015, 68 p. (In Russ.)
3. Klushantsev B.V., Kosarev A.I., Muizemnek Yu.A. *Drobilki. Konstruktsiya, raschet, osobennosti ekspluatatsii* [Crushers. Design, calculation, operation features]. Moscow: Mechanical engineering, 1990, 320 p. (In Russ.)
4. Marinich I.A., Savitsky A.I. A distributed automatic control system for ore preparation based on industrial controllers. *Vestnik IrGTU* [Bulletin of Irkutsk State Technical University], 2013, no. 4, pp. 24–29. (In Russ.)
5. Petrovich S.I., Mukusheva A.S., Stukalova N.G. Features of developing and implementing mathematical models to control mining and processing of multicomponent ores. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin], 2002, no. 3, pp. 229–231. (In Russ.)
6. Suetina T.A., Kochetkov A.V., Tolmachev A.G. et al. Features of automatic control of primary crushers. *Internet-zhurnal Naukovedenie* [Naukovedenie Internet journal], 2015, vol. 7, no. 5, pp. 2–11. (In Russ.)
7. Ilyukhin A.V., Kolbasin A.M., Marsov V.I. *Matematicheskoe opisanie obektov avtomatizatsii stroitel'nogo proizvodstva: uchebnoe posobie* [A mathematical description of automation objects of construction: textbook]. Moscow: Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), 2016, 104 p. (In Russ.)
8. Ganbaatar Z., Delgerbat L. Results of the development and implementation of an automated plant technological control system for the operation of crusher KMD-3000T2- DP. *Novye resheniya v tekhnike i tekhnologii dobychi i pererabotki rud: sb. dokl. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [New solutions in machinery and technology applied for ore mining and processing: collection of the reports presented at the International Scientific and Practical Conference], 3–5 Oct. 2002, Erdenet, pp. 255–29. (In Russ.)
9. Ganbaatar Z., Delgerbat L., Duda A.M. et al. Controlling enrichment of copper-molybdenum ores based on an integrated radiometric analysis of ore. *Materialy mezhdunarodnoy konferentsii Plaksinskie chteniya* [Proceedings of the international conference Plaksin Readings], Yekaterinburg, 2011, pp. 118–121. (In Russ.)
10. Ganbaatar Z., Zimin A.V., Solovyova L.M. et al. Improving the technology of beneficiation of copper-molybdenum ores at the Erdenet Mining Corporation deposit. *Gorny zhurnal* [Mining Journal], 2010, no. 10, pp. 34–36. (In Russ.)
11. Morozov I.N., Kirillov I.E. Application of fuzzy logic methods to create an automatic control system for crushing ore of various hardness by coarse crusher KKD-1500/180. *Trudy Kolskogo nauchnogo tsentra RAN* [Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2017, vol. 8, no. 3–8, pp. 135–143. (In Russ.)
12. Boyko P.F., Titievskiy E.M., Timiryazev V.A. et al. Ensuring the durability of crusher liners by using new

technologies for their manufacturing and diagnosing wear. *Oborudovanie i tekhnologii dlya neftegazovogo kompleksa* [Equipment and technologies for the oil and gas complex], 2019, no. 5 (113), pp. 42–47. (In Russ.)

13. Khurelchuluun I. *Povyshenie effektivnosti rudopodgotovki na osnove primeneniya nepreryvnogo vizometricheskogo analiza granulometricheskogo sostava produktov drobleniya i grokhocheniya: dis. kand. tekhn. nauk* [Improving the efficiency of ore preparation based on the use of a continuous visual analysis of the granulometric composition of crushing and screening products. PhD thesis]. Moscow, 2019, 127 p.

14. Boyko P.F. *Innovatsionnye tekhnologii remonta drobilo-izmelchitelnogo oborudovaniya* [Innovative technologies for repairing crushing and grinding equipment]. Stary Oskol: ROSA, 2016, 327 p. (In Russ.)

15. Boiko P.F., Titievskii E.M., Timiryazev V.A. Technological features of operation, repair, restoration and modernization of cone crushers of large unit capacity. *Gorny zhurnal* [Mining Journal], 2017, no. 4, pp. 71–75. (In Russ.)

16. Khurelchuluun I., Morozov V.V., Nikolaeva T.S., Kruglov V.N. Application of a visual analysis of an ore granulometric composition for automated control of a crushing process. *Rudy i metally* [Ores and metals], 2019, no. 1, pp. 67–73. (In Russ.)

17. Timiryazev V.A., Khostikoev M.Z., Skhirtladze A.G. et al. *Metrologicheskoe obespechenie neftegazovogo mashinostroyeniya* [Metrological support of oil and gas machine building]. Moscow: Publishing Center of the Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), 2018, 332 p. (In Russ.)

18. Timiryazev V.A., Novikov V.Yu., Skhirtladze A.G. *Tekhnologiya mashinostroeniya* [Engineering technology]. Moscow: Publishing House of Moscow State University of Technology STANKIN, 2019, 547 p. (In Russ.)

19. Narkevich M.Yu., Logunova O.S., Kornienko V.D. et al. Quality of materials, products and structures in industrial safety: 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.)

20. Velikanov V.S. Development of fuzzy modeling algorithms for intelligent decision support to determine the level of ergonomics of open pit excavators. *Gornaya promyshlennost* [Mining Industry], 2011, no. 5(99), pp. 64–68. (In Russ.)

21. Shirinkina E.V. The need to adapt human resources (HR) and learning processes to the conditions of uncertainty and turbulence. *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Seriya: Ekonomika i pravo* [Bulletin of Udmurt University. Series: Economics and Law], 2022, vol. 32, no. 1, pp. 102–108. (In Russ.)

22. Velikanov V.S. Using fuzzy logic and fuzzy set theory to control the ergonomic indicators of the quality of mining excavators. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin], 2010, no. 9, pp. 57–62. (In Russ.)

Список литературы

1. <https://solidground.sandvik/>
2. Гришин И.А., Исмагилов К.В., Великанов В.С. Электромеханическое оборудование рудообогатительных фабрик: лабораторный практикум. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорс. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2015. 68 с.
3. Клужанцев Б.В., Косарев А.И., Муйземнек Ю.А. Дробилки. Конструкция, расчет, особенности эксплуатации. М.: Машиностроение, 1990. 320 с.
4. Маринич И.А., Савицкий А.И. Распределенная система автоматического управления рудоподготовкой на базе промышленных контроллеров // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2013. №4. С. 24–29.
5. Петрович С.И., Мукушева А.С., Стукалова Н.Г. Особенности построения и реализации математических моделей в управлении добычей и переработкой многокомпонентных руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2002. №3. С. 229–231.
6. Особенности автоматического управления дробилками первичного дробления / Т.А. Суэтина, А.В. Кочетков, А.Г. Толмачев [и др.] // Интернет-журнал «Науковедение». 2015. Т. 7. №5. С. 2–11.
7. Илохин А.В., Колбасин А.М., Марсов В.И. Математическое описание объектов автоматизации строительного производства: учебное пособие. М.: МАДИ, 2016. 104 с.
8. Ганбаатар З., Дэлгэрбат Л. Результаты разработки и внедрения автоматизированной агрегатно-технологической системы управления работой дробилки КМД-3000Т2-ДП // Новые решения в технике и технологии добычи и переработки руд: сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф., 3–5 окт. 2002 г. Эрдэнэт, 2002. С. 255–29.
9. Управление обогащением медно-молибденовых руд на основе комплексного радиометрического анализа руды / З. Ганбаатар, Л. Дэлгэрбат, А.М. Дуда [и др.] // Материалы международной конференции «Плаксинские чтения». Екатеринбург, 2011. С. 118–121.
10. Совершенствование технологии обогащения медно-молибденовых руд месторождения Эрдэнэтийн-Овоо / З. Ганбаатар, А.В. Зимин, Л.М. Соловьева и [и др.] // Горный журнал. 2010. №10. С. 34–36.
11. Морозов И.Н., Кириллов И.Е. Применение методов нечеткой логики для создания системы автоматического регулирования дробления руды различной крепости дробилкой крупного дробления ККД-1500/180 // Труды Кольского научного центра РАН. 2017. Т. 8. №3–8. С. 135–143.
12. Обеспечение долговечности броней дробилок путем применения новых технологий их изготовления и диагностирования износа / П.Ф. Бойко, Е.М. Титиевский, В.А. Тимирязев [и др.] // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2019. №5 (113). С. 42–47.

13. Хурэлчулун И. Повышение эффективности рудоподготовки на основе применения непрерывного визуометрического анализа гранулометрического состава продуктов дробления и грохочения: дис. канд. техн. наук: 25.00.13 / Хурэлчулун И. Москва, 2019. 127 с.
14. Бойко П.Ф. Инновационные технологии ремонта дробильно-измельчительного оборудования. Старый Оскол: РОСА, 2016. 327 с.
15. Бойко П.Ф., Титиевский Е.М., Тимирязев В.А. Технологические особенности эксплуатации, ремонта, восстановления и модернизации конусных дробилок большой единичной мощности // Горный журнал. 2017. №4. С. 71–75.
16. Применение визуометрического анализа гранулометрического состава руды для автоматизированного управления процессом дробления / И. Хурэлчулун, В.В. Морозов, Т.С. Николаева, В.Н. Круглов // Руды и металлы. 2019. №1. С. 67–73.
17. Метрологическое обеспечение нефтегазового машиностроения / В.А. Тимирязев, М.З. Хостикоев, А.Г. Схиртладзе [и др.]; под ред. М.З. Хостикоева. М.: Изд. центр РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, 2018. 332 с.
18. Тимирязев В.А., Новиков В.Ю., Схиртладзе А.Г. Технология машиностроения / под ред. В.А. Тимирязева. М.: Изд-во МГТУ «Станкин», 2019. 547 с.
19. Качество материалов, изделий и конструкций в промышленной безопасности: эмпирическая основа / М.Ю. Наркевич, О.С. Логунова, В.Д. Корниенко [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т. 19. №3. С. 90–101.
20. Великанов В. С. Разработка алгоритмов нечеткого моделирования для интеллектуальной поддержки принятия решений по определению уровня эргономичности карьерных экскаваторов // Горная промышленность. 2011. №5(99). С. 64–68.
21. Ширинкина Е.В. Необходимость адаптации человеческих ресурсов (HR) и обучающих процессов к условиям неопределенности и турбулентности // Вестник Удмуртского университета. Серия: Экономика и право. 2022. Т. 32. №1. С. 102–108.
22. Великанов В. С. Использование нечеткой логики и теории нечетких множеств для управления эргономическими показателями качества карьерных экскаваторов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2010. №9. С. 57–62.

Поступила 25.03.2022; принята к публикации 08.04.2022; опубликована 28.06.2022
Submitted 25/03/2022; revised 08/04/2022; published 28/06/2022

Igor A. Grishin – PhD (Eng.), Associate Professor,
Head of the Department of Geology, Mine Surveying and Mineral Processing,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia,
Email: igorgri@mail.ru. ORCID 0000-0001-8010-7542

Vladimir S. Bochkov – PhD (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Automation and Computer Technologies, Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia,
Email: bochkov.v@m.ursmu.ru. ORCID 0000-0001-8010-7542

Vladimir S. Velikanov – DrSc (Eng.), Associate Professor,
Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia,
Professor of the Department of Lifting and Handling Machines and Robots,
Professor of the Department of Automation and Computer Technologies, Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia
Email: rizhik_00@mail.ru. ORCID 0000-0001-5581-2733

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

Maksim M. Surovtsov – PhD (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Urban Studies and Engineering Systems, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia,
Email: mm.surovtsov@magtu.ru. ORCID 0000-0003-3871-7755

Yuliya A. Moreva – PhD (Eng.), Associate Professor of the Department of Urban Studies and Engineering Systems, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia,
Email: uniis-magtu@yandex.ru. ORCID 0000-0002-6053-7470

Гришин Игорь Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой геологии, маркшейдерского дела и обогащения полезных ископаемых, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: igorgri@mail.ru. ORCID 0000-0001-8010-7542

РАЗРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Бочков Владимир Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой автоматики и компьютерных технологий, Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия.
Email: bochkov.v@m.urstu.ru. ORCID 0000-0001-8010-7542

Великанов Владимир Семенович – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры подъемно-транспортных машин и роботов, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия, профессор кафедры автоматики и компьютерных технологий, Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия, Email: rizhik_00@mail.ru. ORCID 0000-0001-5581-2733

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

Суровцов Максим Михайлович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой урбанистики и инженерных систем, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: mm.surovtsov@magtu.ru. ORCID 0000-0003-3871-7755

Морева Юлия Александровна – кандидат технических наук, доцент кафедры урбанистики и инженерных систем, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: uniis-magtu@yandex.ru. ORCID 0000-0002-6053-7470

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

УДК 622.013

DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-2-23-35



ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОДЗЕМНОЙ ГЕОТЕХНОЛОГИИ ОТРАБОТКИ ПОДКАРЬЕРНЫХ ЗАПАСОВ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ МЕТОДОМ ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Антипин Ю.Г., Барановский К.В., Рожков А.А., Никитин И.В., Соломеин Ю.М.

Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

Аннотация. Актуальность темы исследования. Переход от открытых горных работ к подземным, как правило, характеризуется снижением доходности горнодобывающего предприятия. В связи с этим актуальной научно-технической задачей является обоснование подземной геотехнологии отработки подкарьерных запасов, позволяющей минимизировать экономический ущерб в переходный период. Цель работы. Исследование параметров подземной геотехнологии с учетом горно-геологических и горнотехнических факторов, влияющих на эффективность освоения подкарьерных запасов месторождения в условиях ужесточения требований экологической безопасности. Методы исследований. Использован метод экономико-математического моделирования, позволяющий исследовать особенности функционирования отдельных технологических процессов и прогнозировать технико-экономические показатели подземной геотехнологии. Результаты исследований. Исследовано влияние высоты подкарьерного этажа на показатели извлечения руды при различных вариантах систем разработки. С целью улучшения показателей извлечения руды и сохранения земной поверхности разработан вариант подэтажно-камерной системы разработки с сухой закладкой и восходящим порядком выемки подкарьерных запасов. Установлены зависимости влияния высоты подкарьерного этажа, изменяющейся в интервале от 40 до 100 м, и производственной мощности предприятия в переходный период, изменяющейся в интервале от 0,8 до 2,4 млн т/год, на основные технико-экономические показатели отработки подкарьерных запасов рудных месторождений. Выводы. Определено, что предлагаемая технология в сравнении с традиционной наиболее эффективна по критериям потерь, разубоживания и себестоимости добычи руды, несмотря на меньшую производительность труда на очистной выемке, предусматривающей процесс закладки выработанного пространства. Наилучшие технико-экономические показатели достигаются при высоте подкарьерного этажа равной 40 м и производственной мощности шахты 1,6 млн т/год.

Ключевые слова: подкарьерные запасы, система разработки, технико-экономические показатели, высота этажа, производственная мощность, себестоимость добычи руды.

Исследования выполнены в рамках Госзадания №075-00412-22 ПР. Тема 1 (2022-2024). Методологические основы стратегии комплексного освоения запасов месторождений твердых полезных ископаемых в динамике развития горнотехнических систем (FUWE-2022-0005), рег. №1021062010531-8-1.5.1.

© Антипин Ю.Г., Барановский К.В., Рожков А.А., Никитин И.В., Соломеин Ю.М., 2022

Для цитирования

Оптимизация параметров подземной геотехнологии отработки подкарьерных запасов рудных месторождений методом экономико-математического моделирования / Антипин Ю.Г., Барановский К.В., Рожков А.А., Никитин И.В., Соломеин Ю.М. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №2. С. 23–35. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-2-23-35>



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

OPTIMIZATION OF UNDERGROUND GEOTECHNOLOGY PARAMETERS FOR THE MINING OF UNDER-PIT RESERVES OF ORE DEPOSITS BY THE METHOD OF ECONOMIC AND MATHEMATICAL MODELING

Antipin Yu.G., Baranovsky K.V., Rozhkov A.A., Nikitin I.V., Solomein Yu.M.

Institute of Mining Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

Abstract. The relevance of the research. Since the transition from open-pit to underground mining is usually characterized by a significant decrease of mining enterprise efficiency, a very urgent scientific and technical task is to find and justify an underground geotechnology for mining under-pit reserves, which allows minimizing economic damage in the transition period. **Objectives.** Substantiation of the parameters of underground geotechnology, taking into account geological and mining factors that affect the efficiency of the mining during the transition from open-pit mining in difficult economic conditions and the tightening of environmental safety requirements. **Methods.** An economic and mathematical modeling tool was used to simulate the process of mining the transitional zone of an ore deposit, to investigate the functioning of individual technological processes and to predict the technical and economic indicators of underground geotechnology. **Results.** The influence of the level height on the ore extraction indicators was studied for various options for mining systems. In order to improve ore extraction and preserve the surface, a variant of a sub-level open stoping with dry stowing and an ascending order of extraction of under-pit reserves has been developed. The dependences of the influence of the level height in the transition zone, which varies in the range from 40 to 100 m, and the production capacity of the enterprise in the transition period, which varies from 0.8 to 2.4 million tons per year on the main technical and economic indicators of the mining of under-pit reserves are established. **Conclusions.** It has been determined that the proposed technology, in comparison with the traditional one, is much more efficient in terms of losses, dilution and the cost of ore extraction, despite the worse labor productivity in the main processes of mining. The best technical and economic indicators are achieved with a level height of 40 m and a mine production capacity of 1.6 million tons per year.

Keywords: under-pit reserves, mining system, technical and economic indicators, level height, production capacity, cost of ore mining.

The research was carried out within the framework of State Assignment No. 075-00412-22 PR. Theme 1 (2022-2024). Methodological foundations of the strategy for the mining of mineral deposits in the dynamics of the development of mining systems (FUWE-2022-0005), reg. №1021062010531-8-1.5.1.

For citation

Antipin Yu.G., Baranovsky K.V., Rozhkov A.A., Nikitin I.V., Solomein Yu.M. Optimization of Underground Geotechnology Parameters for the Mining of Under-Pit Reserves of ore Deposits by the Method of Economic and Mathematical Modeling. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 2, pp. 23–35. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-2-23-35>

Введение

Переход от открытого к подземному способу разработки на рудных месторождениях, как правило, характеризуется значительным снижением дохода горнодобывающего предприятия. Данный факт обусловлен резким снижением производственной мощности, увеличением эксплуатационных затрат и ухудшением показателей извлечения полезного ископаемого [1–7].

В сложившихся условиях эффективность технических решений можно обеспечить за счет соответствующих систем разработки и комплек-

сов технологического оборудования. Система разработки определяет уровень основных показателей, таких как потери, разубоживание, удельный объем подготовительно-нарезных работ (ПНР) и производительность труда на основных технологических процессах, от которых зависят эксплуатационные затраты на добычу. Интенсивность основных технологических процессов в первую очередь зависит от производительности оборудования, применяемого на проведении подготовительно-нарезных выработок и очистной выемки [8–10]. Повышение производительности на основных процессах добычи

уменьшает численность и фонд заработной платы производственного персонала, количество необходимого технологического оборудования и повышает эффективность его использования [11]. При этом необходимо учитывать, что увеличение производственной мощности рудника требует применения более мощного крупногабаритного оборудования и увеличения сечения выработок, что неизбежно ведет к росту эксплуатационных затрат на проходку, доставку и транспортирование руды [12].

Таким образом, обоснование и выбор наиболее эффективной системы разработки с учетом влияния годовой производственной мощности подземного рудника при отработке подкарьерных запасов является весьма актуальной научно-технической задачей.

Подземная геотехнология отработки подкарьерных запасов

В качестве объекта освоения при изыскании подземной геотехнологии отработки подкарьерных запасов принятые осваиваемые комбинированной геотехнологией железорудные месторождения, поскольку в данном случае достаточно низкая рентабельность их освоения подземным способом служит хорошим индикатором эффективности разрабатываемых технологических решений.

Характерными являются следующие горно-геологические и горнотехнические условия объекта [13–16]:

- значительная глубина распространения запасов под дном карьера (300 м и более), предопределяющая целесообразность перехода на подземный способ добычи;
- предельные контуры открытых горных работ (глубина карьера 300–400 м), обуславливающие необходимость скорейшего ввода в эксплуатацию и выхода шахты на проектную производственную мощность;
- значительная мощность (20–70 м) и крутой угол падения рудных тел (более 70°), определяющие техническую возможность применения высокопроизводительных систем подземной разработки;
- рядовые по содержанию железа в руде (менее 40%). Следствием низкого содержания полезного компонента является невысокая извлекаемая ценность руды, что определяет зависимость эффективности технологии в большей степени от уровня затрат на добычу;

- наличие отвалов вскрышных пород на поверхности или внутри карьера.

Вышеназванные условия привели к тому, что в настоящее время при комбинированной разработке месторождений рядовых железных руд наиболее распространенной технологией выемки подкарьерных запасов является подэтажное обрушение с торцовым выпуском руды. Данная технология имеет существенные достоинства в виде высокой производительности труда на очистной выемке и относительно низких затрат на добычу, однако характеризуется низкими показателями извлечения руды (потери – 20%, разубоживание – 27%) и большим удельным объемом ПНР, что отрицательно сказывается на ее эффективности в современных экономических условиях [17–23]. При проведении дальнейших исследований технология выемки подкарьерных запасов системой подэтажного обрушения принята в качестве базового варианта (далее – вариант 1), с которым будут сравниваться разрабатываемые технические решения.

В условиях повышения цен на железорудный концентрат, количество которого определяется уровнем показателей извлечения, экологических требований в виде сохранения земной поверхности и утилизации отходов горного производства, тенденция развития подземной добычи при завершении открытых горных работ состоит в расширении области применения [24–30]:

- автомобильного транспорта с целью повышения интенсивности отработки месторождения;
- технологии камерной и восходящей выемки с последующей закладкой выработанного пространства отвальным породами с целью улучшения показателей извлечения руды и утилизации отходов горного производства;
- дистанционного управления технологическим оборудованием при реализации процессов очистной выемки.

В результате разработан вариант подэтажно-камерной системы разработки с сухой закладкой (далее – вариант 2), отвечающий основным тенденциям совершенствования подземной добычи руды. Вариант 2 предусматривает разделение этажа на подэтажи, отработка которых осуществляется под изолирующим рудным целиком в восходящем порядке камерами, расположенными на разных уровнях по высоте, с оствлением постоянных треугольных предохранительных целиков и сухой закладкой (рис. 1).

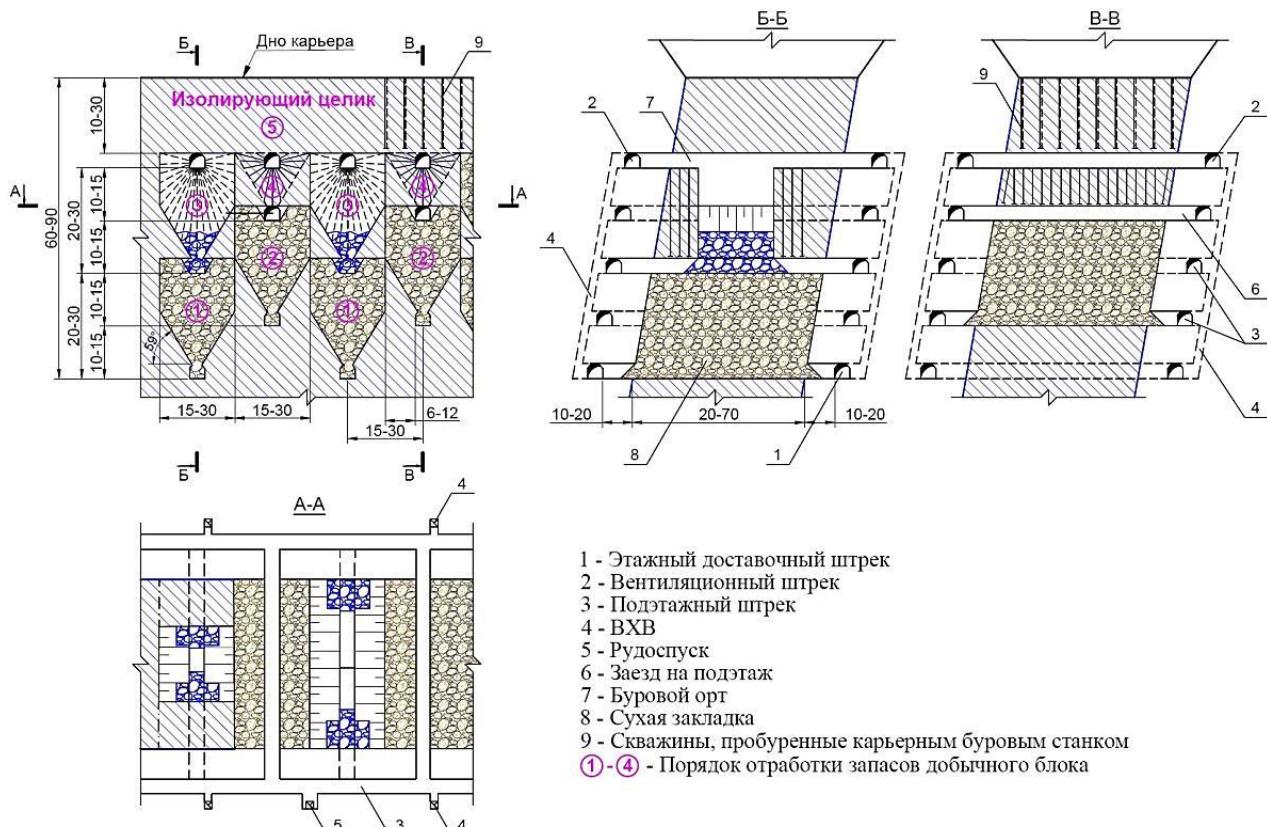


Рис. 1. Подэтажно-камерная система разработки с восходящей выемкой и сухой закладкой (вариант 2)
Fig. 1. A sub-level room-and-pillar system with an ascending order of extraction and dry stowing (option 2)

Выемка камерных запасов осуществляется двумя забоями путем отбойки секций нисходящих вееров скважин и торцового выпуска и доставки руды с помощью погрузочно-доставочных машин (ПДМ) с дистанционным управлением (ДУ). После отработки камеры производится ее заполнение пустыми породами из отвалов открытых горных работ. Для транспортирования сухой закладки в камеры используются шахтные автосамосвалы. Формирование закладочного массива в очистном пространстве осуществляется шахтным бульдозером с ДУ.

Для обеспечения устойчивости закладочного массива нижележащих (смежных) камер, при выемке вышележащих камер на границе закладочного массива с отбиваемым рудным массивом формируются постоянные предохранительные треугольные целики высотой, равной половине высоты камеры. Восходящий порядок отработки, расположение камер со смещением относительно друг друга на половину их высоты и оставление постоянных рудных целиков позволяют полностью отказаться от использования дорогостоящей и усложняющей технологическую схему выемки запасов переходной зоны твердеющей закладки [31–33].

К моменту окончания отработки и закладки камер подкарьерного этажа оформляется нижняя граница изолирующего целика между подземными горными работами и карьерным пространством. Запасы изолирующего целика обуваются карьерными буровыми станками и в зависимости от сложившихся за время отработки подкарьерного этажа условий вынимаются либо открытым способом, либо производится их массовое обрушение и выпуск через подземные выработки с применением ПДМ с ДУ.

Традиционная геотехнология отработки переходной зоны системой подэтажного обрушения и торцовым выпуском руды (вариант 1) и предлагаемая подэтажно-камерная система разработки (вариант 2) приняты для исследования методом экономико-математического моделирования (ЭММ) с технико-экономическим сравнением.

Методика экономико-математического моделирования

Целью ЭММ являлось установление характера и степени изменения наиболее значимых технико-экономических показателей (ТЭП) (потери и разу-

боживание руды, себестоимость добычи 1 т руды, производительность труда) в зависимости от двух наиболее значимых горнотехнических параметров – высоты подкарьерного этажа и годовой производственной мощности шахты.

Высота подкарьерного этажа $H_{\text{эт}}$ определяет объем запасов и срок их отработки, показатели извлечения, удельный объем ПНР, объем бурения скважин, расстояние транспортирования и, как следствие, себестоимость добытой руды. С учетом мировой практики комбинированной разработки рудных месторождений [34–37] рассмотрен следующий диапазон изменения $H_{\text{эт}}$: 40, 60, 80, 100 м.

Производственная мощность шахты $A_{\text{шах}}$ определяет параметры сечения выработок, объемы и интенсивность проходческих и очистных работ, производительность труда и, как следствие, величину капитальных и эксплуатационных затрат. Рассмотрен следующий диапазон изменения $A_{\text{шах}}$: 0,8; 1,6; 2,4 млн т/год (по горным возможностям шахты).

Параметры выемочных единиц приняты кратными рассматриваемым высотам подкарьерного этажа при средней мощности рудного тела – высота 20 м, ширина 20 м и длина 45 м.

В зависимости от $A_{\text{шах}}$ и варианта системы разработки при ЭММ принят соответствующий парк основного и вспомогательного технологического оборудования:

- для ведения проходческих и очистных работ приняты самоходные буровые установки типа *Sandvik DD 421-60* на бурении шпуров и *Sandvik DL 431-7* на бурении скважин диаметром 89 мм при варианте 1 и 102 мм при варианте 2;
- на уборке горной массы от проходческих работ – ПДМ типа *Epiroc ST 7* грузоподъемностью 7 т;
- для выпуска и доставки руды из забоя до рудоспуска в зависимости от $A_{\text{шах}}$ – ПДМ *Epiroc ST* грузоподъемностью 7, 10 и 14 т;
- для транспортирования руды в зависимости от $A_{\text{шах}}$ – шахтные автосамосвалы (ШАС) *Epiroc MT* грузоподъемностью 32, 42 и 54 т;
- для погрузки и транспортирования отвальной породы до места ведения закладочных работ – карьерный экскаватор типа ЭКГ-5А и ШАС *Epiroc MT* грузоподъемностью 32, 42 и 54 т;
- для формирования массива из сухой закладки в камере – шахтный бульдозер типа Б-10Ш.

В основу экономико-математической модели были заложены следующие целевые функции [38].

Производительность труда по системе разработки $\Pi_{\text{с.р.}}$ т/чел.-смен:

$$\Pi_{\text{с.р.}} = \frac{Q_{\text{экс}}^{\text{бл}}}{N_{\text{ПНР}} + N_{\text{ов}}} \rightarrow \max, \quad (1)$$

где $Q_{\text{экс}}^{\text{бл}}$ – эксплуатационные запасы блока, т; $N_{\text{ПНР}}$ – трудозатраты на ПНР, чел.-смен; $N_{\text{ов}}$ – трудозатраты на очистную выемку, чел.-смен.

$$Q_{\text{экс}}^{\text{бл}} = B_{\text{бл}} \frac{(1 - \Pi)}{(1 - P)}, \quad (2)$$

где $B_{\text{бл}}$ – балансовые запасы блока, т; Π и P – потери и разубоживание руды, доли ед.

$$N_{\text{ПНР}} = t_{\text{ПНР}} \cdot n_{\text{3B}}^{\text{ПНР}}, \quad (3)$$

$$N_{\text{ов}} = t_{\text{отб}} \cdot n_{\text{3B}}^{\text{отб}} + t_{\text{в.д.}} \cdot n_{\text{3B}}^{\text{в.д.}} + t_{\text{тр}} \cdot n_{\text{3B}}^{\text{тр}} + t_{\text{зак}} \cdot n_{\text{3B}}^{\text{зак}}, \quad (4)$$

где $t_{\text{ПНР}}$, $t_{\text{отб}}$, $t_{\text{в.д.}}$, $t_{\text{тр}}$, $t_{\text{зак}}$ – количество смен, необходимое на ПНР, отбойку руды, выпуск и доставку руды, транспортирование руды, закладку выработанного пространства, смен; $n_{\text{3B}}^{\text{ПНР}}$, $n_{\text{3B}}^{\text{отб}}$, $n_{\text{3B}}^{\text{в.д.}}$, $n_{\text{3B}}^{\text{тр}}$, $n_{\text{3B}}^{\text{зак}}$ – количество рабочих в звене, занятых на ПНР, отбойке руды, выпуске и доставке руды, транспортировании руды, закладке выработанного пространства, чел.

Себестоимость 1 т добытой руды по системе разработки $C_{\text{с.р.}}$, руб./т включает эксплуатационные затраты на ПНР $C_{\text{ПНР}}$, руб./т, затраты на очистную выемку $C_{\text{ов.}}$, руб./т и определяется по формуле

$$C_{\text{с.р.}} = C_{\text{ПНР}} + C_{\text{ов.}} \rightarrow \min. \quad (5)$$

Затраты на ПНР определяются по формуле

$$C_{\text{ПНР}} = \frac{C_{\text{гор}} \Delta V_{\text{ПНР}}^{\text{гор}} + C_{\text{вер}} \Delta V_{\text{ПНР}}^{\text{вер}}}{1000}, \quad (6)$$

где $C_{\text{гор}}$ и $C_{\text{вер}}$ – себестоимость проходки 1 м³ горизонтальных и вертикальных подготовительно-нарезных выработок, руб./м³; $\Delta V_{\text{ПНР}}^{\text{гор}}$ и $\Delta V_{\text{ПНР}}^{\text{вер}}$ – удельный объем горизонтальных и вертикальных подготовительно-нарезных выработок, м³/1000 т.

Затраты на очистную выемку определяются по формуле

$$C_{\text{ов.}} = C_{\text{отб}} + C_{\text{в.д.}} + C_{\text{тр}} + C_{\text{зак}}, \quad (7)$$

где $C_{\text{отб}}$, $C_{\text{в.д.}}$, $C_{\text{тр}}$ и $C_{\text{зак}}$ – затраты на отбойку (бурение, заряжание и взрывание скважин), выпуск и доставку, транспортирование руды и закладку выработанного пространства, руб./т.

$$C_{\text{отб}} = \frac{c_{\text{отб}} V_{\text{отб}}}{Q_{\text{экс}}}, \quad (8)$$

$$C_{\text{в.д.}} = \frac{c_{\text{маш.-см}}^{\text{ПДМ}} Q_{\text{о.в.}}}{P_{\text{см}}^{\text{ПДМ}} Q_{\text{экс}}^{\text{бл}}}, \quad (9)$$

$$C_{\text{тр}} = \frac{c_{\text{маш.-см}}^{\text{ШАС}} Q_{\text{о.в.}}}{P_{\text{см}}^{\text{ШАС}} Q_{\text{экс}}^{\text{бл}}}, \quad (10)$$

$$C_{\text{зак}} = \frac{V_{\text{зак}}}{Q_{\text{экс}}^{\text{бл}}} \left(\frac{c_{\text{маш.-см}}^{\text{ЭКГ}}}{P_{\text{см}}^{\text{ЭКГ}}} + \frac{c_{\text{маш.-см}}^{\text{ШАС}}}{P_{\text{см}}^{\text{ШАС}}} + \frac{c_{\text{маш.-см}}^{\text{бл}}}{P_{\text{см}}^{\text{бл}}} \right), \quad (11)$$

где $c_{\text{отб}}$ – себестоимость отбойки 1 м³ руды, руб./м³; $V_{\text{отб}}$ – объем отбиваемых балансовых запасов, м³; $Q_{\text{экс}}$ – эксплуатационные запасы блока, т; $Q_{\text{о.в.}}$ – эксплуатационные запасы очистной выемки, т; $c_{\text{маш.-см}}^{\text{ПДМ}}$, $c_{\text{маш.-см}}^{\text{ШАС}}$, $c_{\text{маш.-см}}^{\text{ЭКГ}}$, $c_{\text{маш.-см}}^{\text{бл}}$ – стоимость машино-смены ПДМ, шахтного автосамосвала (ШАС), карьерного экскаватора (ЭКГ) и шахтного бульдозера, руб./смену; $P_{\text{см}}^{\text{ПДМ}}$, $P_{\text{см}}^{\text{ШАС}}$ – эксплуатационная производительность ПДМ и шахтного автосамосвала, т/смену; $V_{\text{зак}}$ – объем закладываемого выработанного пространства, м³; $P_{\text{см}}^{\text{ЭКГ}}$, $P_{\text{см}}^{\text{ШАС}}$, $P_{\text{см}}^{\text{бл}}$ – эксплуатационная производительность карьерного экскаватора, шахтного автосамосвала на закладочных работах и бульдозера, м³/смену.

Представленные целевые функции включают множество переменных, описывающих свойства объекта освоения, параметры технологии, экономические и иные условия и факторы, учет которых при использовании инструмента ЭММ позволяет исследовать функционирование отдельных технологических процессов и прогнозировать ТЭП подземной геотехнологии [39].

Исследование параметров подземной геотехнологии

Известно, что основными показателями, характеризующими полноту и качество извлечения запасов из недр, являются потери и разубо-

живание руды, которые зависят от технологии ведения добывочных работ – класса применяемой системы разработки и параметров ее конструктивных элементов, учитывающих горно-геологические и горнотехнические условия месторождения. Поскольку данные показатели оказывают значительное влияние на эффективность геотехнологии, на первом этапе исследовано влияние на их величину $H_{\text{эт}}$ при вариантах 1 и 2 систем разработки (рис. 2).

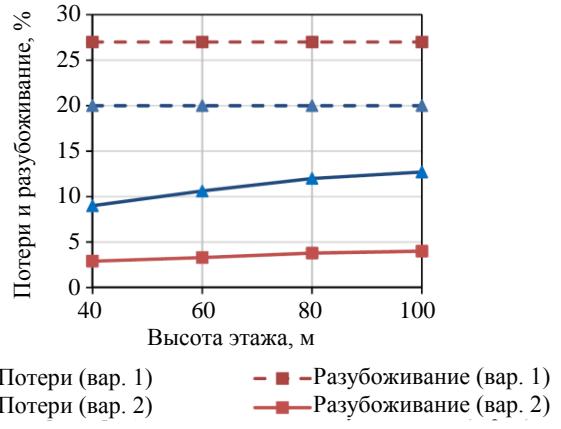


Рис. 2. Влияние высоты этажа на показатели извлечения

Fig. 2. Influence of the level height on extraction indicators

Анализ изменения потерь и разубоживания руды в зависимости от увеличения $H_{\text{эт}}$ от 40 до 100 м показывает:

- при варианте 1 показатели остаются постоянными из-за одинаковой высоты подэтажа и составляют соответственно 20 и 27%, что обусловлено характером и особенностями выпуска руды под обрушенными породами [8, 17];

- при варианте 2 показатели ухудшаются с увеличением $H_{\text{эт}}$ (потери увеличиваются с 9 до 13%, а разубоживание – с 2,9 до 4%). При этом соответствующие показатели при варианте 2 меньше в 1,5 и 6,8 раза, чем при традиционном варианте 1.

Таким образом, с точки зрения полноты и качества извлечения запасов из недр значительно более эффективен предлагаемый вариант геотехнологии, основанный на восходящей камерной выемке с сухой закладкой.

Далее для вариантов технологии 1 и 2 исследован показатель удельного объема ПНР на 1000 т добытой руды $\Delta V_{\text{ПНР}}$ в зависимости от $H_{\text{эт}}$ и $A_{\text{шк}}$ (рис. 3).

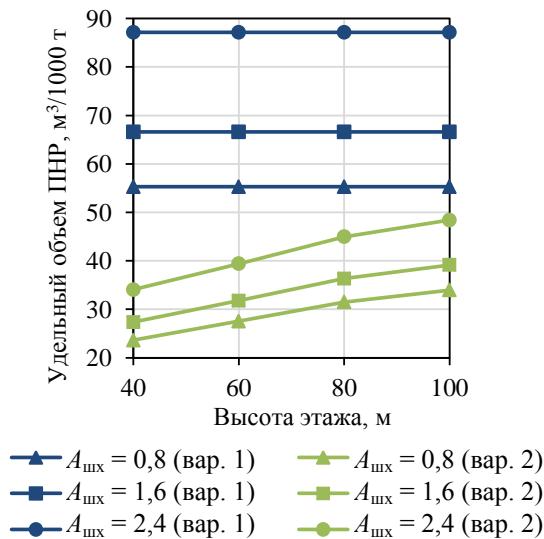


Рис. 3. Влияние высоты этажа на удельный объем ПНР при различной производственной мощности шахты

Fig. 3. Influence of the level height on the specific volume of commissioning at different production capacities of the mine

Анализ изменения $\Delta V_{ПНР}$ с увеличением $H_{эт}$ и $A_{шх}$ показывает:

- при варианте 1 исследуемый показатель не зависит от $H_{эт}$ и возрастает с увеличением $A_{шх}$ (от 55 до 87 $м³/1000$ т добытой руды);
- при варианте 2 $\Delta V_{ПНР}$ с увеличением $H_{эт}$ от 40 до 100 м растет в интервалах от 23,6 до 33,9, от 27,4 до 39,1 и от 34,1 до 48,4 $м³/1000$ т добытой руды соответственно, при $A_{шх}$ 0,8; 1,6; 2,4 млн т/год соответственно;
- показатель $\Delta V_{ПНР}$ при варианте 2 меньше в 1,6 раза при $A_{шх}=0,8$ млн т, в 1,7 раза при $A_{шх}=1,6$ млн т и 1,8 раза при $A_{шх}=2,4$ млн т, чем по варианту 1.

Таким образом, по критерию $\Delta V_{ПНР}$ предлагаемая технология во всем диапазоне изменения рассматриваемых горнотехнических факторов значительно эффективнее традиционной технологии подэтажного обрушения.

Далее исследовано влияние $H_{эт}$ и $A_{шх}$ на производительность труда по системе разработки $P_{с.р.}$. При определении $P_{с.р.}$ учитывались производительность труда на проходке подготовительно-нарезных выработок ПНР и очистной выемке руды $P_{о.в.}$, включающей буровзрывные работы, выпуск и доставку руды ПДМ, транспортирование руды ШАС и закладку выработанного пространства (рис. 4).

Анализ полученных результатов показывает:

- установлено, что $P_{ПНР}$ практически равны между собой по вариантам 1 и 2 при любой $A_{шх}$ и не зависит от $H_{эт}$ за счет постоянного объема проведения подготовительно-нарезных выработок. С увеличением $A_{шх}$ от 0,8 до 2,4 млн т $P_{ПНР}$ возрастает на 25% за счет увеличения доли объема горизонтальных и снижения доли вертикальных выработок в общем объеме ПНР в блоке, а также применения более производительных буровых установок;

- с увеличением $H_{эт}$ по варианту 1 $P_{о.в.}$ не изменяется, а по варианту 2 существенно снижается за счет увеличения расстояния транспортирования руды и наличия технологического процесса закладки;

- с увеличением $A_{шх}$ от 0,8 до 2,4 млн т $P_{о.в.}$ возрастает – по варианту 1 на 35 % при любой $H_{эт}$, а по варианту 2 на 40% за счет применения более производительного оборудования на доставке и транспортировании руды и сухой закладки;

- при варианте 2 с увеличением $H_{эт}$ происходит снижение $P_{о.в.}$. Данный показатель ниже на 32-34% относительно варианта 1 при аналогичных значениях $A_{шх}$, что объясняется наличием процесса закладки выработанного пространства, меньшей производительностью на бурении нисходящих скважин диаметром 102 мм [40], увеличения расстояния транспортирования руды;

- с увеличением $A_{шх}$ от 0,8 до 2,4 млн т $P_{с.р.}$ возрастает – по варианту 1 на 22 % при любой $H_{эт}$, а по варианту 2 на 24–32% за счет применения более производительного оборудования;

- при варианте 2 с увеличением $H_{эт}$ происходит снижение $P_{с.р.}$. Данный показатель ниже на 30–32% относительно варианта 1 при аналогичных значениях $A_{шх}$.

Таким образом, производительность труда по варианту 2 ниже, чем по варианту 1, преимущественно за счет дополнительного технологического процесса закладки выработанного пространства.

На последнем этапе ЭММ исследовано влияние $H_{эт}$ и $A_{шх}$ на себестоимость 1 т добытой руды $C_{с.р.}$, включающей себестоимости проходки подготовительно-нарезных выработок $C_{ПНР}$ и очистной выемки $C_{о.в.}$ (рис. 5). При определении $C_{о.в.}$ учитываются эксплуатационные затраты на отбойку, выпуск, доставку, транспортирование руды и закладку камер (для варианта 2).

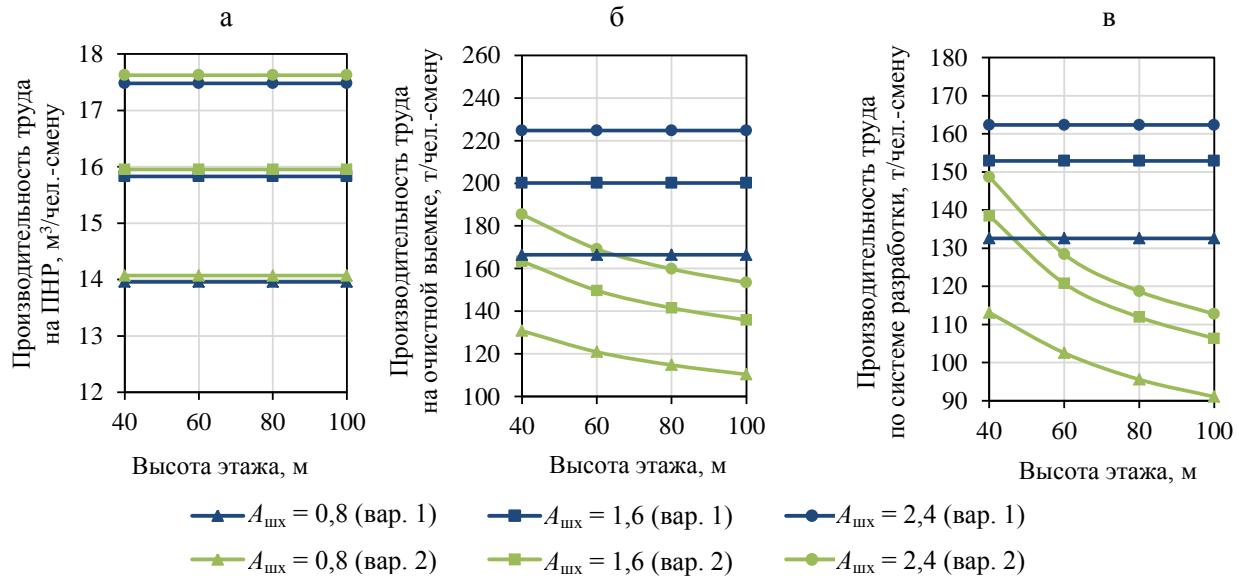


Рис. 4. Зависимость производительности труда от высоты этажа и производственной мощности шахты:
а – при ПНР; б – на очистной выемке; в – по системе разработки

Fig. 4. The dependence between labor productivity and the level height and production capacity of the mine:
a is during commissioning; b is during stoping operations; c is by the mining system

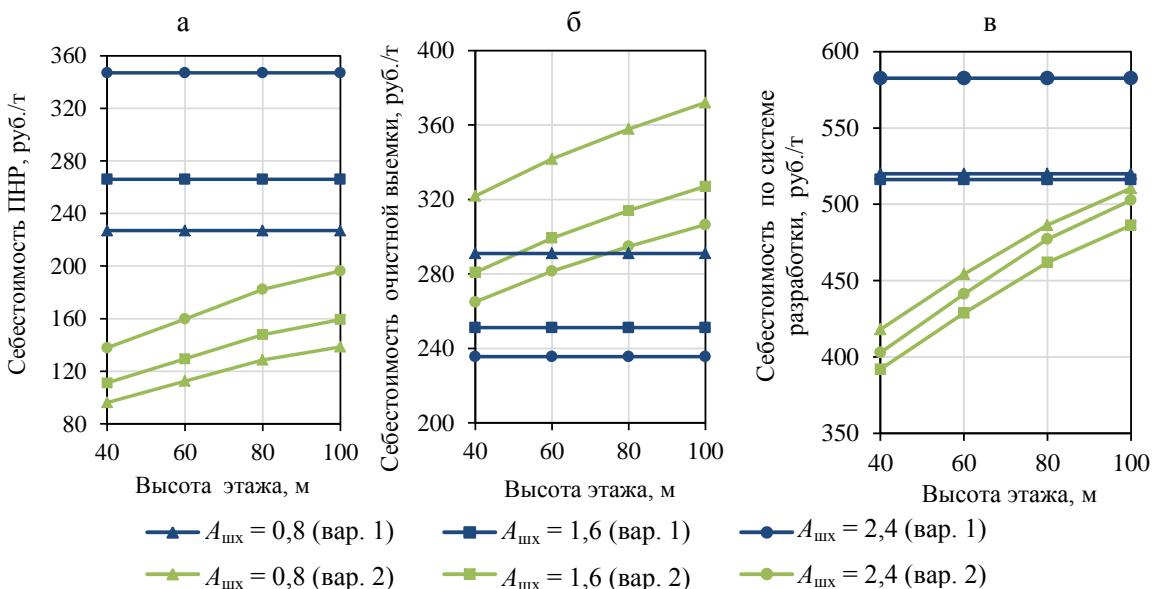


Рис. 5. Зависимость себестоимости от высоты этажа и производственной мощности шахты:
а – ПНР; б – очистной выемке; в – по системе разработки

Fig. 5. The dependence between the cost and the level height and production capacity of the mine:
a is during commissioning; b is during stoping operations; c is by the mining system

В результате анализа изменения $C_{ПНР}$, $C_{o.b}$ и $C_{c.p}$ в зависимости от $H_{эт}$ и $A_{шах}$ при вариантах 1 и 2 систем разработки установлено:

- с увеличением $H_{эт}$ по варианту 1 $C_{ПНР}$ не изменяется, а по варианту 2 повышается за счет роста $\Delta V_{ПНР}$. С увеличением $A_{шах}$ по варианту 1 $C_{ПНР}$ повышается на 53% при любой $H_{эт}$, по варианту 2 – на 41–44% за счет роста объема ПНР в результате увеличения сечения выработок для применения крупногабаритного оборудования;

- по варианту 2 $C_{ПНР}$ ниже на 39–43%, чем по варианту 1 при аналогичных параметрах $H_{эт}$ и $A_{шах}$;

- с увеличением $H_{эт}$ себестоимость $C_{o.b}$ по варианту 1 не изменяется за счет постоянных эксплуатационных затрат на отбойку, доставку и транспортирование руды, а по варианту 2 повышается за счет роста эксплуатационных затрат и снижения производительности труда на транспортировании руды и закладки;

- с увеличением $A_{шах}$ себестоимость $C_{o.b}$ по ва-

риантам 1 и 2 снижается на 18,9 и 17,7–24,5% соответственно, в результате повышения производительности труда на доставке и транспортировании руды и закладки, за счет применения более производительного самоходного оборудования;

- с увеличением $H_{\text{эт}}$ $C_{\text{о.в}}$ по варианту 2 больше на 28–30%, чем по варианту 1, за счет затрат на закладку выработанного пространства, а также более высоких затрат и снижения производительности на транспортировании руды с увеличением расстояния транспортирования;

- с увеличением $H_{\text{эт}}$ $C_{\text{ср}}$ по варианту 2 для $A_{\text{шх}}=0,8$ млн т меньше на 19,3% при $H_{\text{эт}}=40$ м и на 1,5% при $H_{\text{эт}}=100$ м, для $A_{\text{шх}}=1,6$ млн т меньше на 24,2% при $H_{\text{эт}}=40$ м и на 6,0% при $H_{\text{эт}}=100$ м, для $A_{\text{шх}}=2,4$ млн т меньше на 30,9% при $H_{\text{эт}}=40$ м и на 13,7% при $H_{\text{эт}}=100$ м, чем по варианту 1 за счет более низких затрат на ПНР.

Таким образом, по критерию себестоимости добычи $C_{\text{с.р}}$ предлагаемая технология эффективней, чем традиционная, во всем диапазоне изменения $H_{\text{эт}}$ и $A_{\text{шх}}$.

Выводы

1. Для условий отработки подкарьерных запасов в переходной зоне железорудных месторождений разработан вариант подэтажно-камерной системы разработки с закладкой, предусматривающий разделение этажа на подэтажи и отличающийся восходящим порядком отработки камер, расположенных на разных уровнях по высоте, с оставлением постоянных треугольных предохранительных целиков и сухой закладкой. Восходящий порядок отработки, расположение камер со смещением относительно друг друга на половину их высоты и оставление постоянных рудных целиков позволяют утилизировать отходы горного производства в подземном выработанном пространстве без дополнительных затрат на вяжущее и дробление породы, тем самым полностью отказаться от использования дорогостоящей твердеющей закладки.

2. Разработана экономико-математическая модель, основанная на комплексной методике определения параметров и сравнения ТЭП технологических процессов добычи руды (проходка выработок, отбойка, выпуск, доставка и транспортирование руды, закладочные работы) с учетом основных горнотехнических факторов (высоты этажа и производительности рудника), позволяющая оценить эффективность подземной геотехнологии в переходный период.

3. Установлены зависимости влияния высоты

этажа в интервале от 40 до 100 м и производственной мощности предприятия в интервале от 0,8 до 2,4 млн т/год на основные ТЭП отработки переходной зоны (потери и разубоживание руды, удельный объем ПНР, производительность труда и удельные эксплуатационные затраты по основным процессам добычи).

4. Определено, что предлагаемая технология в сравнении с традиционной наиболее эффективна за счет более высоких показателей извлечения руды и меньшей себестоимости 1 т добываемой руды даже при меньшей производительности труда на очистной выемке, предусматривающей закладку выработанного пространства.

5. Наилучшие значения ТЭП поэтажно-камерной системы разработки с восходящей выемкой и сухой закладкой выработанного пространства (вариант 2) в рассматриваемых условиях достигаются при $H_{\text{эт}}=40$ м и $A_{\text{шх}}=1,6$ млн т, следовательно, они являются оптимальными.

Список литературы

1. Karakus M., Zhukovskiy S., Goodchild D. Investigating the Influence of Underground Ore Productions on the Overall Stability of an Existing Open Pit // Procedia Engineering. 2017. Vol. 191. P. 600–608.
2. Влияние горнотехнических факторов на технико-экономические показатели отработки подкарьерного этажа под породной подушкой в условиях железорудных месторождений / И.В. Соколов, Ю.Г. Антипин, А.А. Рожков, И.В. Никитин, Ю.М. Соломеин // Известия вузов. Горный журнал. 2021. №8. С. 5–14 (In Eng.). DOI: 10.21440/0536-1028-2021-8-5-14
3. Обоснование рациональных вариантов перехода с открытого на подземный способ разработки месторождения «Малый Куйбас» / В.Н. Калмыков, С.Е. Гавришев, К.В. Бурмистров, А.А. Гоготин, О.В. Петрова, Н.Г. Томилина // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2013. №4. С. 132–139.
4. King B., Goycoolea M., Newman A. Optimizing the open pit-to-underground mining transition // European Journal of Operational Research. 2017. Vol. 257. No. 1. P. 297–309.
5. Combined optimization of an open-pit mine outline and the transition depth to underground mining / D. Whittle, M. Brazil, P. Grossman, H. Rubinstein, D. Thomas // European Journal of Operational Research. 2018. P. 268. DOI: 10.1016/j.ejor.2018.02.005.
6. Afum B.O., Ben-Awuah, E. A Review of models and algorithms for surface-underground mining options and transitions optimization: some lessons learnt and the way forward // Mining. 2021. Vol. 1. P. 112–134. <https://doi.org/10.3390/mining1010008>.
7. Flores G., Catalan A. A transition from a large open pit into a novel «macroblock variant» block caving geome-

try at Chuquicamata mine, Codelco Chile // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2019. Vol. 11. Iss. 3. P. 549–561.

8. Геотехнологические аспекты стратегии освоения крупных железорудных месторождений / И.В. Соколов, А.А. Смирнов, Ю.Г. Антипин, Н.В. Гобов, К.В. Барановский, И.В. Никитин, Ю.М. Соломеин, А.А. Рожков // Проблемы недропользования. 2014. №3(3). С. 113–125.

9. Каплунов Д.Р., Рыльникова М.В. Развитие научно-методических основ устойчивости функционирования горнотехнических систем в условиях внедрения нового технологического уклада // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2020. № 4. С. 24–39.

10. Соколов И.В. Оценка эффективности подземной геотехнологии при обосновании стратегии комбинированной разработки рудных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2011. №S11. С. 480–493.

11. Operator influence on the loading process at LKAB's iron ore mines / A. Gustafson, H. Schunnesson, J. Paraszczak, G. Shekhar, S. Bergström, P. Brännman // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2020. Vol. 120. Iss. 3. P. 191–202. DOI: 10.17159/2411-9717/376/2020.

12. Обзор комбинированных систем подземной разработки рудных месторождений / Ю.Г. Антипин, К.В. Барановский, А.А. Рожков, М.В. Клюев // Проблемы недропользования. 2020. № 3(26). С. 5–22. DOI: 10.25635/2313-1586.2020.03.005.

13. Рогов В.Ю. Оценка перспектив развития черной металлургии Иркутской области на основе ресурсов восточных Саян и инновационных технологий // Вестник Забайкальского государственного университета. 2022. Т. 28. №2. С. 19–28. DOI: 10.21209/2227-9245-2022-28-2-19-28.

14. Ресурсоиспользовающие, экологически сбалансированные геотехнологии комплексного освоения месторождений Курской магнитной аномалии / К.Н. Трубецкой, Д.Р. Каплунов, В.К. Томаев, И.И. Помельников // Горный журнал. 2014. №8. С. 45–49.

15. Svartsjaern M., Saiang D. Conceptual Numerical Modeling of Large-Scale Footwall Behavior at the Kiirunavaara Mine, and Implications for Deformation Monitoring // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2016. No. 49. P. 943–960. DOI: 10.1007/s00603-015-0750-x.

16. Подземная геотехнология при комбинированной разработке мощного железорудного месторождения / И.В. Соколов, А.А. Смирнов, Ю.Г. Антипин, И.В. Никитин, К.В. Барановский // Известия вузов. Горный журнал. 2014. № 7. С. 25–32.

17. Савич И.Н. Проблемы применения систем с принудительным обрушением при подземной разработке рудных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2014. № S1. С. 366–373.

18. Лобанов Е.А., Еременко А.А. Разработка подкарьерных рудных запасов месторождения Олений ручей // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2021. № 4(146). С. 86–95. DOI: 10.26730/1999-4125-2021-4-86-95.

19. Русин Е.П., Стажевский С.Б. О современном состоянии и перспективах шведского варианта системы добычи руд с подэтажным обрушением // Интерэкс-по Гео-Сибирь. 2017. Т. 2. № 2. С. 112–116.

20. Шамиев Ж.Б., Алибаев А.П. Технология комбинированной разработки подкарьерных запасов системой подэтажного обрушения с секционной отбойкой и торцевым выпуском руды через щель // Современные проблемы механики сплошных сред. 2010. №12. С. 62–70.

21. Shekhar G., Gustafson A. Draw control strategies in sublevel caving mines – a baseline mapping of LKABs Malmberget and Kiirunavaara mines // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2018. Vol. 118. No. 7. P. 723–733.

22. Tan Y., Guo M., Hao Y., Zhang C., Song W. Structural Parameter Optimization for Large Spacing Sublevel Caving in Chengchao Iron Mine // Metals. 2021. No. 11. P. 1619. <https://doi.org/10.3390/met11101619>.

23. Parameters influencing full scale sublevel caving material recovery at the Ridgeway gold mine / I.D. Brunton, S.J. Fraser, J.H. Hodgkinson, P.C. Stewart // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2010. Vol. 47. No. 4. P. 647–656.

24. Каплунов Д.Р. Проблемы комбинированной геотехнологии при устойчивом экологически сбалансированном освоении недр // Горный журнал. 2018. № 1. С. 14–17. DOI: 10.17580/gzh.2018.01.01.

25. Мажитов А.М. Оценка степени техногенного преобразования участка недр при разработке месторождения с обрушением руды и вмещающих пород в восходящем порядке // Горная промышленность. 2021. № 4. С. 113–118. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-4-113–118.

26. Комплексная экологоориентированная подземная геотехнология добычи и обогащения железных руд / И.В. Соколов, Н.В. Гобов, А.А. Смирнов, А.Н. Медведев // Экология и промышленность России. 2013. № 9. С. 16–20.

27. Wang Zhenwei, Song Gaofeng, Ding Kuo. Study on the Ground Movement in an Open-Pit Mine in the Case of Combined Surface and Underground Mining // Advances in Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 2020. DOI: 10.1155/2020/8728653

28. Бондаренко А.А., Шарипов Р.Х. Опыт и сравнительный анализ эффективности эксплуатации дизельных и электрических погрузочно-доставочных машин // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2021. № 4. С. 246–257. DOI: 10.46689/2218-5194-2021-4-1-246–257.

29. Casteel K. Underground haulage equipment trends // Engineering and Mining Journal. 2008. April. P. 773–775.

30. Li J.-G., Zhan K. Intelligent mining technology for an underground metal mine based on unmanned equipment // Engineering. 2018. №. 4. P. 381–391.

31. Отработка железорудного месторождения технологией с комбинированной закладкой / А.А. Смирнов, К.В. Барановский, А.А. Рожков, Ю.М. Соломеин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2021. № 5-1. С. 62–76. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_51_0_62.

32. Design and construction of a combined underground paste backfilling and surface paste storage system in Baiyinchagan Polymetallic Mine / L. Guo, H. Wang, X. Sun, J. Zhou, X. Liang // Proceedings of the 20th International Seminar on Paste and Thickened Tailings. – Beijing: University of Science and Technology, Beijing. 2017. P. 346–357. https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1752_38_Guo

33. Wu J. Research on sublevel open stoping recovery processes of inclined medium thick orebody on the basis of physical simulation experiments // PLoS ONE. 2020. Vol. 15(5). e0232640. 10.1371/journal.pone.0232640. DOI: 10.1371/journal.pone.0232640.

34. MacNeil J. A stochastic optimization formulation for the transition from open pit to underground mining // Optimization and Engineering. 2017. Vol. 18. P. 793–813. DOI: 10.1007/s11081-017-9361-6.

35. Pourrahimian Y., Askari Nasab H., Tannant D. A multi-step approach for block-cave production scheduling optimization // International Journal of Mining Science and Technology. 2013. Vol. 23. P. 739–750. DOI: 10.1016/j.ijmst.2013.08.019.

36. Неверов С.А., Конурин А.И., Шапошник Ю.Н. Безопасность очистных работ при подэтажной выемке с обрушением в тектонически напряженных массивах// Интерэкспо Гео-Сибирь. 2021. Т. 2. №3. С. 311–321. DOI: 10.33764/2618-981X-2021-2-3-311-321.

37. Ore dilution control practised at Sindesar Khurd Mine of Hindustan Zinc Ltd. / S. Dutta, A. Lal, V. Chittora, L. Chordia, D. Tailor // Design Methods 2015: Proceedings of the International Seminar on Design Methods in Underground Mining. Australian Centre for Geomechanics Perth. P. 553–568. https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1511_35_Dutta

38. Соколов И.В., Антипин Ю.Г., Никитин И.В. Принципы формирования и критерий оценки геотехнологической стратегии освоения переходных зон рудных месторождений подземным способом // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017. №9. С. 151–160. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-9-0-151-160.

39. Соколов И.В., Антипин Ю.Г., Никитин И.В. Методология выбора подземной геотехнологии при комбинированной разработке рудных месторождений: монография. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2021. 340 с.

40. Sokolov I.V., Smirnov A.A., Rozhkov A.A. Technology of Blasting of Strong Valuable Ores with Ring Borehole Pattern // Journal of Mining Institute. 2019. Vol. 237. P. 285–291. DOI: 10.31897/PMI.2019.3.285.

References

1. Karakus M., Zhukovskiy S., Goodchild D. Investigating the influence of underground ore productions on the overall stability of an existing open pit. Procedia Engineering, 2017, vol. 191, pp. 600–608.
2. Sokolov I.V., Antipin Yu.G., Rozhkov A.A., Nikitin I.V., Solomein Yu.M. Mining factors effect on the technical and economic indicators of mining the upper sublevel under the rock cushion at iron ore deposits. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal* [Minerals and Mining Engineering], 2021, no. 8, pp. 5–14. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-8-5-14
3. Kalmikov V.N., Gavrilov S.E., Burmistrov K.V., Gogotin A.A., Petrova O.V., Tomilina N.G. New underground mining approaches justification for the Mal'iy Kuybas open pit mining operations. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten* (nauchno-tehnichesky zhurnal) [Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)], 2013, no. 4, pp. 132–139. (In Russ.)
4. King B., Goycoolea M., Newman A. Optimizing the open pit-to-underground mining transition. European Journal of Operational Research, 2017, vol. 257, no. 1, pp. 297–309.
5. Whittle D., Brazil M., Grossman P., Rubinstein H., Thomas D. Combined optimisation of an open-pit mine outline and the transition depth to underground mining. European Journal of Operational Research, 2018, vol. 268, no. 2, pp. 624–634. DOI: 10.1016/j.ejor.2018.02.005
6. Afum B.O., Ben-Awuah E. A review of models and algorithms for surface-underground mining options and transitions optimization: some lessons learnt and the way forward. Mining, 2021, vol. 1, pp. 112–134. <https://doi.org/10.3390/mining1010008>
7. Flores G., Catalan A. A transition from a large open pit into a novel «macroblock variant» block caving geometry at Chuquicamata mine, Codelco Chile. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2019, vol. 11, no. 3, pp. 549–561.
8. Sokolov I.V., Smirnov A.A., Antipin Yu.G., Gobov N.V., Baranovskiy K.V., Nikitin I.V., Solomein Yu.M., Rozhkov A.A. Geo-technological aspects of large iron ore deposits development strategy. *Problemy nedropolzovaniya* [Subsoil Use Problems], 2014, vol. 3(3), pp. 113–125. (In Russ.)
9. Kaplunov D.R., Rybnikova M.V. Development of scientific and methodological foundations for sustainability of the functioning of mining-engineering systems, when introducing a new technological paradigm. *Izvestiya Tulsogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle* [News of Tula State University. Earth Sciences], 2020, no. 4, pp. 24–39. (In Russ.)
10. Sokolov I.V. Assessing efficiency of underground geotechnology, when providing the rationale for the strategy of combined mining of ore deposits. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten* (nauchno-tehnichesky zhurnal) [Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)], 2011, no. S11, pp. 480–493. (In Russ.)

11. Gustafson A., Schunnesson H., Paraszczak J., Shekhar G., Bergström S., Brännman P. Operator influence on the loading process at LKAB's iron ore mines. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2020, vol. 120, no. 3, pp. 191–202. DOI: 10.17159/2411-9717/376/2020

12. Antipin Yu.G., Baranovskiy K.V., Rozhkov A.A., Klyuev M.V. Overview of combined underground mining systems for ore deposits. *Problemy nedropolzovaniya* [Subsoil Use Problems], 2020, vol. 3(26), pp. 5–22. (In Russ.). DOI: 10.25635/2313-1586.2020.03.005

13. Rogov V.Yu. Assessment of the ferrous metallurgy development prospects in the Irkutsk Region based on the resources of the Eastern Sayans and innovative technologies. *Vestnik Zabaikalskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Transbaikal State University], 2022, vol. 28, no. 2, pp. 19–28. (In Russ.). DOI: 10.21209/2227-9245-2022-28-2-19-28

14. Trubetskoy K.N., Kaplunov D.R., Tomaev V.K., Pomelnikov I.I. Resource-reproducing and ecologically balanced geotechnologies for comprehensive exploitation of mineral deposits in the area of the Kursk Magnetic Anomaly. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal], 2014, no. 8, pp. 45–49. (In Russ.)

15. Svartsjaern M., Saiang D. Conceptual numerical modeling of large-scale footwall behavior at the Kiirunavaara Mine, and implications for deformation monitoring. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, no. 49, pp. 943–960. DOI: 10.1007/s00603-015-0750-x

16. Sokolov I.V., Smirnov A.A., Antipin Yu.G., Nikitin I.V., Baranovskiy K.V. Underground geotechnology for combined mining of a large iron ore deposit. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal* [Minerals and Mining Engineering], 2014, no. 7, pp. 25–32. (In Russ.)

17. Savich I.N. Problems of using systems with forced caving in underground mining of ore deposits. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten* (nauchno-tehnichesky zhurnal) [Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)], 2014, no. S1, pp. 366–373. (In Russ.)

18. Lobanov E.A., Eremenko A.A. Mining of under-pit ore reserves at the Oleniy Ruchey deposit. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Kuzbass State Technical University], 2021, no. 4(146), pp. 86–95. (In Russ.). DOI: 10.26730/1999-4125-2021-4-86-95.

19. Rusin E.P., Stazhevskiy S.B. About the current state and prospects of the Swedish version of the ore mining system with sublevel caving. *Interekspo Geo-Sibir* [Interexpo Geo-Siberia], 2017, vol. 2, pp. 112–116. (In Russ.)

20. Shamiev Zh.B., Alibaev A.P. Technology of combined mining of under-pit reserves by a system of sub-level caving with sectional breaking and end-cutting of ore through a slot. *Sovremennye problemy mekhaniki sploshnykh sred* [Modern Problems of Continuum Mechanics], 2010, no. 12, pp. 62–70. (In Russ.)

21. Shekhar G., Gustafson A. Draw control strategies in sublevel caving mines - A baseline mapping of LKAB's Malmberget and Kiirunavaara mines. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2018, vol. 118, no. 7, pp. 723–733.

22. Tan Y., Guo M., Hao Y., Zhang C., Song W. Structural parameter optimization for large spacing sublevel caving in Chengchao Iron Mine. *Metals*, 2021, no. 11, p. 1619. <https://doi.org/10.3390/met11101619>

23. Brunton I.D., Fraser S.J., Hodgkinson J.H., Stewart P.C. Parameters influencing full scale sublevel caving material recovery at the Ridgeway gold mine. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2010, vol. 47, no. 4, pp. 647–656.

24. Kaplunov D.R. Problems of combined geotechnology in sustainable ecologically balanced subsoil development. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal], 2018, no. 1, pp. 14–17. (In Russ.) DOI: 10.17580/gzh.2018.01.01

25. Mazhitov A.M. Assessment of the extent of man-induced transformation of a subsoil block in upward mining using ore and host rock caving. *Gornaya promyshlennost* [Mining Industry], 2021, no. 4, pp. 113–118. (In Russ.) DOI: 10.30686/1609-9192-2021-4-113-118.

26. Sokolov I.V., Gobov N.V., Smirnov A.A., Medvedev A.N. Integrated environmentally-oriented underground geotechnology of mining and beneficiation of iron ores. *Ekologiya i promyshlennost Rossii* [Ecology and Industry of Russia], 2013, no. 9, pp. 16–20. (In Russ.)

27. Wang Zhenwei, Song Gaofeng, Ding Kuo. Study on the ground movement in an open-pit mine in the case of combined surface and underground mining. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 2020, ID 8728653, DOI: 10.1155/2020/8728653

28. Bondarenko A.A., Sharipov R.Kh. Experience and comparative analysis of operating efficiency of diesel and electric loading and delivery machines. *Izvestiya Tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle* [News of Tula State University. Earth Sciences], 2021, no. 4, pp. 246–257. (In Russ.) DOI: 10.46689/2218-5194-2021-4-1-246-257

29. Casteel K. Underground haulage equipment trends. *Engineering and Mining Journal*, 2008, April, pp. 773–775.

30. Li J.-G., Zhan K. Intelligent mining technology for an underground metal mine based on unmanned equipment. *Engineering*, 2018, no. 4, pp. 381–391.

31. Smirnov A.A., Baranovsky K.V., Rozhkov A.A., Sologubin Yu.M. Cut-and-fill stoping using mixed backfill. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten* (nauchno-tehnichesky zhurnal) [Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)], 2021, no. 5-1, pp. 62–76. (In Russ.) DOI: 10.25018/0236_1493_2021_51_0_62

32. Guo L., Wang H., Sun X., Zhou J., Liang X. Design and construction of a combined underground paste backfilling and surface paste storage system in Baiyinchagan Polymetallic Mine. *Proceedings of the 20th International Seminar on Paste and Thickened Tailings*, Beijing University of Science and Technology, Beijing, 2017, pp. 346–357, https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1752_38_Guo

33. Wu J. Research on sublevel open stoping recovery processes of inclined medium thick orebody on the basis of

physical simulation experiments. *PLoS ONE*, 2020, vol. 15(5), e0232640. DOI: 10.1371/journal.pone.0232640

34. MacNeil J. A stochastic optimization formulation for the transition from open pit to underground mining. *Optimization and Engineering*, 2017, vol. 18, pp. 793–813. DOI: 10.1007/s11081-017-9361-6

35. Pourrahimian Y., Askari Nasab H., Tannant D. A multi-step approach for block-cave production scheduling optimization. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2013, vol. 23, pp. 739–750. DOI: 10.1016/j.ijmst.2013.08.019.

36. Neverov S.A., Konurin A.I., Shaposhnik Yu.N. Safety of stoping operations during sublevel excavation with collapse in tectonically stressed massifs. *Interespo Geo-Sibir* [Interexpo Geo-Siberia], 2021, vol. 2, no. 3, pp. 311–321. (In Russ.). DOI: 10.33764/2618-981X-2021-2-3-311-321.

37. Dutta S., Lal A., Chittora V., Chordia L., Tailor D. Ore dilution control practiced at Sindesar Khurd Mine of Hindustan Zinc Ltd. Proceedings of the International Seminar on Design Methods in Underground Mining, Australian Centre for Geomechanics, Perth, 2015,

38. Sokolov I.V. Antipin Yu.G., Nikitin I.V. Basic principles and assessment criteria of technological strategy for underground mining in transition zones. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten* (nauchno-tehnichesky zhurnal) [Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)], 2017, no. 9, pp. 151–160. (In Russ.). DOI: 10.25018/0236-1493-2017-9-0-151-160

39. Sokolov I.V., Antipin Yu.G., Nikitin I.V. *Metodologiya vybora podzemnoy geotekhnologii pri kombinirovannoy razrabotke rudnykh mestorozhdeniy: monografiya* [Methodology for choosing underground geotechnology in the combined mining of ore deposits: monograph]. Yekaterinburg: Ural University Publishing House, 2021, 340 p. (In Russ.)

40. Sokolov I.V., Smirnov A.A., Rozhkov A.A. Technology of blasting of strong valuable ores with ring borehole pattern. *Journal of Mining Institute*, 2019, vol. 237, pp. 285–291. DOI: 10.31897/PMI.2019.3.285

Поступила 14.04.2022; принята к публикации 26.05.2022; опубликована 28.06.2022
Submitted 14/04/2022; revised 26/05/2022; published 28/06/2022

Антипин Юрий Георгиевич – кандидат технических наук, заведующий лабораторией подземной геотехнологии, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия.
Email: geotech910@yandex.ru. ORCID 0000-0002-3564-0310

Барановский Кирилл Васильевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории подземной геотехнологии, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия.
Email: geotech910@yandex.ru. ORCID 0000-0002-2572-166X

Рожков Артём Андреевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории подземной геотехнологии, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия.
Email: 69artem@bk.ru. ORCID 0000-0003-3007-1099

Никитин Игорь Владимирович – научный сотрудник лаборатории подземной геотехнологии, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия.
Email: real_Igrik@mail.ru. ORCID 0000-0002-3593-4319

Соломеин Юрий Михайлович – научный сотрудник лаборатории подземной геотехнологии, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия.
Email: yuriysolo@mail.ru. ORCID 0000-0002-8226-6894

Yuri G. Antipin – PhD (Eng.), Head of the Laboratory of Underground Geotechnology, Institute of Mining, the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia.
Email: geotech910@yandex.ru. ORCID 0000-0002-3564-0310

Kirill V. Baranovsky – PhD (Eng.), Senior Researcher, Laboratory of Underground Geotechnology, Institute of Mining, the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia.
Email: geotech910@yandex.ru. ORCID 0000-0002-2572-166X

Artem A. Rozhkov – PhD (Eng.), Senior Researcher, Laboratory of Underground Geotechnology, Institute of Mining, the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia.
Email: 69artem@bk.ru. ORCID 0000-0003-3007-1099

Igor V. Nikitin – Researcher, Laboratory of Underground Geotechnology, Institute of Mining, the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia.
Email: real_Igrik@mail.ru. ORCID 0000-0002-3593-4319

Yuri M. Solomein – Researcher, Laboratory of Underground Geotechnology, Institute of Mining, the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia.
Email: yuriysolo@mail.ru. ORCID 0000-0002-8226-6894

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

УДК 622.272.6

DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-2-36-43



СНИЖЕНИЕ ОПАСНОГО ВЛИЯНИЯ ОЧИСТНЫХ РАБОТ НА УДАРООПАСНЫЙ МАССИВ ПРИ ОТРАБОТКЕ СЕВЕРОУРАЛЬСКИХ БОКСИТОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ БЕЗВЗРЫВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Холмский А.В., Фомин С.И.

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Актуальность работы. Североуральские бокситовые месторождения являются основным источником высококачественного алюминиевого сырья в России. Отработку месторождений ведут с 1970-х годов, и в настоящее время фронт горных работ достиг отметки более 1 км вглубь залежи. Для месторождений Североуральского бокситового бассейна характерны сложные горно-геологические условия, отдельно стоит отметить удароопасность, которая повышается с глубиной. В пределах 15 лет на рудниках АО «Североуральский бокситовый рудник» планируется увеличение производственной мощности, в том числе с применением высокопроизводительных технологических схем отработки. Нынешние технологические схемы отработки не способны обеспечить необходимое повышение производительности без ущерба безопасности ведения очистных работ, одним из факторов которой является воздействие очистных работ на удароопасный массив. В связи с этим поиск и обоснование технологических решений по снижению влияния очистных работ на удароопасный массив является актуальной задачей горной науки. **Используемые методы.** В ходе исследований использованы такие методы, как статистический анализ, сравнительный анализ, определение параметров отбойки, оказывающих влияние на удароопасный массив. **Новизна.** Новизна заключается в том, что для отработки Североуральских бокситовых месторождений предлагается принципиально новая технология отработки, обеспечивающая снижение влияния очистных работ на удароопасный массив и повышение производительности выемочного блока. **Результат.** Рассмотрена взаимосвязь между параметрами отбойки запасов камер и опорным давлением на краевой части массива, сделан вывод о том, что отбойка запасов камер гидромолотом в условиях отработки Североуральских бокситовых месторождений позволяет снизить влияние очистных работ на удароопасный массив. **Практическая значимость.** Предлагаемая безвзрывная технология отработки месторождений Североуральского бокситового рудника обеспечивает повышение производительности, снижение себестоимости добычи и отличается от применяемых технологических схем тем, что оказывает сравнительно меньшее влияние на удароопасный массив.

Ключевые слова: подземная разработка месторождений, сложные горно-геологические условия, безвзрывная технология, гидромолот, механическая отбойка.

© Холмский А.В., Фомин С.И., 2022

Для цитирования

Холмский А.В., Фомин С.И. Снижение влияния очистных работ на удароопасный массив при отработке Североуральских бокситовых месторождений за счет применения безвзрывной технологии // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №2. С. 36–43. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-2-36-43>



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

REDUCING THE EFFECT OF STOPING ON THE BUMP HAZARDOUS MASSIF USING THE BLAST-FREE TECHNOLOGY, WHEN DEVELOPING THE NORTH URALS BAUXITE DEPOSITS

Kholmskiy A.V., Fomin S.I.

Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

Abstract. Relevance. The North Urals bauxite deposits are a main source of high quality aluminum raw materials in Russia. These deposits are mined since the 1970s and now mining operations have reached the level deeper than 1 km. The North Urals bauxite deposits are characterized by difficult mining and geological conditions. It is particularly important to mention the rock burst hazard, increasing with depth. Within 15 years JSC North Urals Bauxite Mine intends to increase production capacity of mines, including by applying high performance mining process flows. The existing mining processes do not provide for the required increase in production capacity without prejudicing safety of stoping operations. One of the factors is the effect of stoping on the bump hazardous massif. Therefore, searching and providing the rationale for process solutions on reducing the effect of stoping on the bump hazardous massif is currently relevant for mining science. **Methods Applied.** When conducting the studies, we used such methods as a statistical analysis, a comparative analysis, determination of the breakage parameters, influencing the bump hazardous massif. **Originality.** Originality is that the radically new technology is proposed for mining the North Urals bauxite deposits. The said technology contributes to decreasing the effect of stoping on the bump hazardous massif and increasing performance of a mining block. **Results.** The paper describes the relation between the breakage parameters and abutment pressure on the selvedge of the massif. It was concluded that breakage of chamber reserves with hydraulic breakers at the North Urals bauxite deposits reduced the effect of stoping on the bump hazardous massif. **Practical Relevance.** The proposed blast-free technology of mining of the North Urals bauxite deposits provides for increased production capacity, decreased mining cost and differs from the applicable process flows in having comparatively less effect on the bump hazardous massif.

Keywords: underground mining, difficult mining and geological conditions, blast-free technology, hydraulic breaker, mechanical breakage.

For citation

Kholmskiy A.V., Fomin S.I. Reducing the Effect of Stoping on the Bump Hazardous Massif Using the Blast-Free Technology, when Developing the North Urals Bauxite Deposits. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 2, pp. 36–43. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-2-36-43>

Введение

На сегодняшний день горнодобывающая промышленность сталкивается с тем, что поверхностные запасы месторождений полезных ископаемых исчерпаны. В связи с этим более актуальными становятся запасы месторождений, залегающих на глубине более 800 м. К этой категории можно отнести месторождения Североуральского бокситового бассейна, запасы которых отрабатываются рудниками АО «СУБР». Большая часть высококачественного алюминиевого сырья России добывается именно рудниками АО «СУБР», суммарная годовая производственная мощность которых достигает 3 млн т руды в год.

Переход очистной выемки запасов месторождений на глубокие горизонты сопряжен ря-

дом проблем, которые обусловлены одним фактором – сложными горно-геологическими условиями. Месторождения Североуральского бокситового бассейна характеризуются следующими условиями залегания: пластообразные залежи мощностью от 4 до 8 м с углом падения 25–35°, разнокачественные бокситы, слагающие массив, изменчивая гипсометрия залежей, удароопасность месторождений [1]. Запасы выемочного блока отрабатывают камерно-столбовой системой с оставлением ленточных целиков по простирианию залежи [2], на отбойке руды применяют буровзрывной способ.

Курсом развития предприятия является увеличение объемов добычи бокситовой руды за счет применения новых технологических схем, обеспечивающих не только повышение производительности выемочных блоков, но и сохране-

ния показателей безопасности, связанных с отработкой удароопасных месторождений. В этой связи стоит отметить ряд ограничений, связанных с повышением производительности технологических схем отработки с отбойкой руды буровзрывным способом. В условиях разработки Североуральских бокситовых месторождений взрывные работы оказывают дополнительное сейсмическое воздействие на удароопасный массив, нередко являясь причиной возникновения горных ударов. Изменение проектов на отработку в пользу увеличения общего расхода взрывчатки на отбойку запасов выемочного блока, увеличение числа забоев в одновременной работе может привести к учащению возникновения горных ударов в результате техногенного воздействия на удароопасный массив. В сложных горно-геологических условиях Североуральских бокситовых месторождений следует применять безвзрывной способ отбойки руды, обеспечивающий намного меньшее влияние на удароопасный массив в процессе ведения очистных работ.

Целью исследований является обоснование снижения опасного воздействия на массив горных пород, склонных к горным ударам за счет применения в условиях отработки месторождений «СУБР» безвзрывного способа отбойки руды гидромолотами [3].

Таблица 1. Классификация горных ударов по И.А. Турчанинову

Table 1. Classification of rock bursts by I.A. Turchaninov

Класс горного удара	Сейсмическая энергия, Дж	Виды разрушений
Микро	<10	Поверхностные, локальные разрушения
Слабый	10-100	Локальные разрушения и незначительный выброс пород в выработку
Средний	100-10000	Быстрое разрушение, выброс значительного объема пород в выработки на участках длиной до нескольких метров
Сильный	10000-10000000	Быстрое разрушение, выброс в выработку больших объемов пород в выработки на участке длиной до нескольких десятков метров
Катастрофический	>10000000	Площадь разрушения - сотни, тысячи квадратных метров

Таблица 2. Статистика по горным ударам при отработке Североуральских бокситовых месторождений

Table 2. Statistics of rock bursts during the mining of the North Urals bauxite deposits

Период отслеживания горных ударов	Количество сильных ударов	Количество сильных ударов при наличии в массиве красных немарких/яшмовидных бокситов	Техногенный фактор	Средняя энергия горного удара, Дж
С 1979 по 2013 гг.	53 (17 с 2008 по 2013 гг.)	18/15	Взрывные работы	440 000
С 1970 по 2013 гг.	14 (3 с 2008 по 2013 гг.)	7/2	Бурение шпурков	1900000

Материалы и методы исследования

Для постановки проблемы горных ударов при отработке месторождений на рудниках АО «СУБР» необходимо обратиться к горно-геологическим и горнотехническим условиям отработки [4]. Пластообразное рудное тело слагают бокситы нескольких марок, которые обладают различными физико-механическими характеристиками. Из их числа наибольшее влияние на показатель удароопасности оказывает предел прочности на сжатие. Прочные хрупкие бокситы более склонны к мгновенному выделению энергии, накопившейся в результате техногенного воздействия. Литология рудного тела представлена следующими разновидностями бокситов: красный маркий, красный немаркий, яшмовидный, серый, пестроцветный. Самыми прочными из них являются красный немаркий и яшмовидный бокситы, также считаются самыми удароопасными разновидностями бокситов. Согласно статистике, больше половины горных ударов при отработке Североуральских бокситовых месторождений произошло в результате ведения буровзрывных работ [5]. Стоит отметить, что по энергии произошедшие горные удары относятся к сильным, согласно классификации горных ударов по И.А. Турчанинову (табл. 1). Результаты статистического анализа приведены в табл. 2.

Исходя из приведенного в табл. 2 анализа, можно сделать вывод о том, что при ведении буро-взрывных работ в сложных условиях месторождений на рудниках АО «СУБР» повышается количество горных ударов, характеризующихся большим объемом разрушений и длительной ликвидацией последствий этих ударов (более 1 суток). В этой связи предлагается осуществлять отбойку бокситовой руды гидромолотами, так как безвзрывная технология отработки обеспечивает наименьшее влияние на напряженно-деформированное состояние удароопасного массива.

Обсуждение результатов

Решение проблемы горных ударов в результате влияния очистных работ достигается за счет применения безвзрывной технологии отработки Североуральских бокситовых месторождений с отбойкой руды гидромолотами (далее – механи-

ческая отбойка). Технологическая схема с механической отбойкой [6] реализуется на базе камерно-столбовой системы разработки и включает в себя отработку запасов камер с поперечным сечением $22,5 \text{ м}^2$ с применением проходческой машины, на которую установлен гидромолот (рис. 1).

Предлагаемая технологическая схема обеспечивает повышение производительности выемочного блока в 1,5–2 раза по сравнению с показателями актуальной технологии отработки Североуральских бокситовых месторождений за счет организации очистных работ по циклично-поточной технологии [7, 8] и высокой суточной скорости подвигания забоя [9]. Данное утверждение доказывается сравнением технико-экономических показателей, которые определены по классическим методикам и представлены в табл. 3.

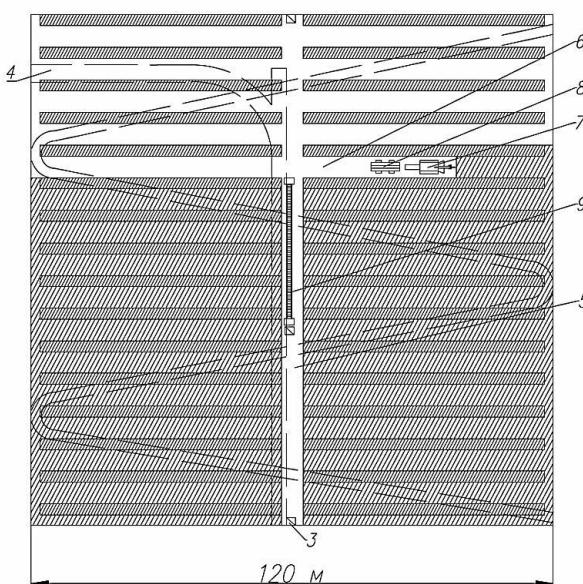


Рис. 1. Технологическая схема с механической отбойкой руды: 1 – откаточный орт; 2 – вентиляционный орт; 3 – рудоспуск; 4 – откаточный штrek; 5 – рудный восстающий; 6 – выемочная камера; 7 – проходческая машина; 8 – самоходный вагон; 9 – скребковый конвейер; 10 – наклонный автосъезд

Fig. 1. Process flow, including mechanical breakage of ore: 1 is a haulage cross-cut; 2 is a ventilation cross-cut; 3 is an ore chute; 4 is a haulage drift; 5 is an ore rise; 6 is an extraction chamber; 7 is a tunneling machine; 8 is a self-propelled car; 9 is a drag-type conveyor; 10 is an inclined ramp

Таблица 3. Сравнение технико-экономических показателей технологических схем
Table 3. Comparison of technical and economic performance of process flows

Наименование показателя	Технологическая схема с буро-взрывной отбойкой руды	Технологическая схема с механической отбойкой
Себестоимость добычи 1 т руды	510 руб./т	336 руб./т
Суточная скорость подвигания забоя	7,2 м/смену	11,4 м/смену
Производительность	216 т/смену	312 т/смену

Повышение скорости подвигания забоя обусловлено организацией очистных работ по циклично-поточной технологии. При этом коэффициент использования выемочного оборудования по технологической схеме составляет 0,78 по сравнению с коэффициентом использования выемочного оборудования при технологической схеме с буровзрывной отбойкой, равном 0,67. Коэффициент использования выемочного оборудования определен исходя из отношения времени, требуемого для процесса, к времени смены (7,2 ч). Снижение себестоимости добычи 1 т руды при технологической схеме с механической отбойкой достигается путем сокращения количества забойных рабочих, необходимого для ведения очистных работ. Затраты на материалы и оборудование также снижаются в связи с тем, что гидромолоты требуют меньшее количество расходных материалов при эксплуатации, при этом закупочная стоимость и амортизация базовых машин значительно меньше по сравнению с самоходными буровыми установками [10–12].

Показатели, изложенные выше, достигаются за счет применения на отбойке гидромолотов со следующими эксплуатационными характеристиками:

- эксплуатационная масса от 1500 до 2400 кг;
- частота ударов от 350 до 600 уд./мин;
- энергия удара от 4000 до 8000 Дж;
- рабочее давление от 15 до 16 МПа;
- диаметр исполнительного органа от 120 до 140 мм;
- рабочая длина исполнительного органа от 0,5 до 0,7 м.

При отбойке руды гидромолотами с такими характеристиками в условиях Североуральских бокситовых месторождений достигается наиболее рациональное соотношение производительности и себестоимости добычи 1 т руды. Вместе с тем наиболее важную роль в снижении воздействия на удароопасный массив играет рабочая длина исполнительного органа. Для обоснования данного положения необходимо сравнить [13] взаимосвязь параметров отбойки с опорным давлением в краевой части массива при буровзрывной отбойке и механической отбойке руды.

Взрывные работы оказывают сейсмическое влияние на удароопасный массив, достаточное для его перехода из напряженно-деформированного в запредельное состояние. При наличии включений прочных разновидностей бокситов, таких как красный немаркий и яшмовидный, воздействие взрывной волны или бурового инструмента способно спровоцировать вышеопи-

санский переход и последующее высвобождение накопленных напряжений в виде горного удара. На **рис. 2** показана схема взаимосвязи опорного давления на краевую часть массива при буровзрывном способе отбойки руды в камере.

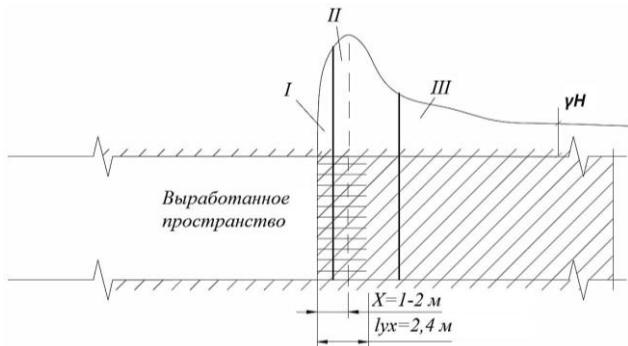


Рис. 2. Взаимосвязь опорного давления на краевую часть массива и параметров буровзрывной отбойки: I – зона пониженных напряжений; II – зона повышенных напряжений; III – зона напряжений, близких к первоначальным; X – расстояние до максимальных напряжений; l_{yx} – длина уходки

Fig. 2. Relation between abutment pressure on the selvedge of the massif and parameters of drilling and blasting breakage: I is a zone of lower stresses; II is a zone of higher stresses; III is a zone of stresses close to original stresses; X is a distance to maximum stresses; l_{adv} is drift advance length

Исходя из анализа взаимосвязи, представленной на **рис. 2**, можно сделать вывод о том, что очистные работы буровзрывным способом ведутся в зоне II, которая считается наиболее опасной с точки зрения воздействия на напряженно-деформированный массив горных пород. Зона III является зоной первоначальных напряжений, где вертикальная составляющая напряжений равна напряжениям в нетронутом массиве. На практике расстояние до максимума опорного давления равно 1–2 м. При упругих породах оно сокращается, при пластичных породах распространяется на величину 5–6 м. При актуальных горнотехнических условиях отработки Североуральских бокситовых месторождений длина уходки составляет 2,4 м. Такие горнотехнические условия являются опасными, так как работа ведется в зоне II. При наличии в этой зоне прочных пород, таких как красный немаркий или яшмовидный бокситы, достаточно минимального воздействия взрывной волны или бурового инструмента для их быстрого перехода в запредельное состояние в виде горного удара.

Для сравнения с параметрами буровзрывного способа отбойки руды в камере проанализирована взаимосвязь опорного давления на краевую часть массива и механической отбойки (рис. 3).

Анализ взаимосвязи, представленный на рис. 3, показывает значительные изменения во взаимосвязи параметров механической отбойки с опорным давлением при отработке запасов камеры. Длина уходки при отбойке руды гидромолотами составляет 0,5–0,7 м и обоснована показателями производительности при таких характеристиках применяемого оборудования. При этом отбойку ведут в зоне I, где массив обладает естественным структурным ослаблением, повышенным трещинообразованием, отслаиванием отдельных кусков руды. Данные условия способствуют более эффективной отбойке руды гидромолотами [15, 16]. Вместе с тем рабочая длина исполнительного органа сравнимо меньше расстояния до максимума опорного давления, соответственно, очистные работы ведут в более безопасной зоне напряженно-деформированного массива. Наличие в зоне I красных немарких или яшмовидных бокситов не представляет опасности по их быстрому переходу в запредельное состояние, так как подвигание забоя при отбойке руды гидромолотами не предполагает, по сравнению с буровзрывным способом отбойки, одномоментной выемки из массива большого объема руды.

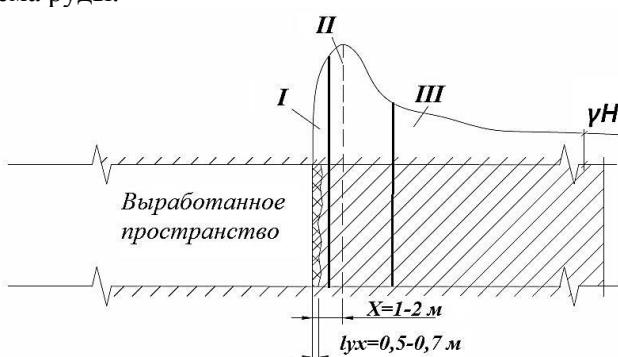


Рис. 3. Взаимосвязь опорного давления на краевую часть массива и параметров механической отбойки: I – зона пониженных напряжений; II – зона повышенных напряжений; III – зона напряжений, близких к первоначальным; X – расстояние до максимальных напряжений; l_{yx} – длина уходки

Fig. 3. Relation between abutment pressure on the selvedge of the massif and parameters of mechanical breakage: I is a zone of lower stresses; II is a zone of higher stresses; III is a zone of stresses close to original stresses; X is a distance to maximum stresses; l_{adv} is drift advance length

Заключение

Современное состояние отработки Североуральских бокситовых месторождений сопряжено с ведением очистных работ в сложных горно-геологических условиях. Одним из осложняющих факторов является удароопасность массива, которая обусловлена наличием прочных разновидностей бокситов. Бокситы такого типа быстро переходят из напряженно-деформированного состояния в запредельное состояние при минимальном воздействии очистных работ. Согласно результатам статистического анализа, большая часть сильных горных ударов с большим объемом разрушений произошла в результате ведения буровзрывной отбойки. С целью повышения производительности, снижения себестоимости и снижения влияния очистных работ на удароопасный массив предлагается применение безвзрывной технологии отработки Североуральских бокситовых месторождений. Основным отличием является отбойка запасов камеры гидромолотами. В ходе исследований установлено, что отбойка руды гидромолотом оказывает сравнимо меньшее влияние на удароопасный массив за счет того, что отбойку ведут в зоне пониженных напряжений. Зона пониженных напряжений также характеризуется повышенной трещиноватостью массива, отслаиванием отдельных кусков руды, что способствует более эффективной отбойке. Таким образом, предложено технологическое решение проблемы влияния очистных работ на удароопасный массив, которое обеспечивает повышение производительности без ущерба безопасности ведения работ.

Список литературы

1. Анфимов А.Л. Литолого-фациальные особенности бемитсодержащих известняков нарудной толщи Североуральского бокситового рудника // Литология и полезные ископаемые. Екатеринбург. 2015. №3. С. 3–8.
2. Сидоров Д.В. Геомеханическое обоснование конструктивных параметров камерно-столбовой системы разработки для проектирования глубоких горизонтов СУБРа // Записки Горного института. 2012. Т. 199. С. 134–141.
3. Galchenko Yu.P. Solution of geoecological problems in underground mining of deep iron ore deposits // Eurasian Mining. 2018. №1. Р. 35–40. DOI: 10.17580/em.2018.01.08
4. Кожахметова З.Ж., Кожахметов О.С. О современных методах разработки бокситовых месторождений // Молодой ученый – 2017. № 17 (151). С. 95–98.

5. Сидоров Д.В. Методология снижения удароопасности при применении камерно-столбовой системы разработки Североуральских бокситовых месторождений на больших глубинах // Записки Горного института. 2017. Т. 223. С. 58–69. DOI: 10.18454/PMI.2017.1.58
6. Ismael M. Performance prediction of hydraulic breakers in excavation of a rock mass // Rudarsko-geološko-naftni zbornik (The Mining-Geological-Petroleum Bulletin). 2021. Т. 36. №4.
7. Литвинов А.Р. Обоснование параметров схем поточной технологии безвзрывной послойно-полосовой отработки массивов крепких пород: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2001. 24 с.
8. Ficarella A., Giuffrida A., Laforgia D. Numerical investigations on the working cycle of a hydraulic breaker: off-design performance and influence of design parameters // International journal of fluid power. 2006. Т. 7. №3. С. 41–50.
9. Анистратов Ю.И. Эффективность безвзрывных технологий разработки горных пород на карьерах // Горная промышленность. 1997. № 2. С. 20–23.
10. Панкевич Ю.Б. Применение мощных гидромолотов фирмы Krupp на безвзрывной разработке месторождений полезных ископаемых решает вопросы экологии и качества продукции // Горная промышленность. 1997. №2. С. 45.
11. Лабутин В.Н., Марков В.С. Перспективы применения комбинированного способа разрушения горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. №12.
12. Лысиков Б.А., Резник А.В., Дубинин А.В. Безвзрывная экологически чистая проходка тоннелей гидромолотами. Донецк: ДонТУ, 2004. С. 143–145.
13. Toraño J. et al. Environmental impact of rock excavation in urban areas: comparison between blasting and hydraulic breaker hammer // Civil Engineering and Environmental Systems. 2006. Т. 23. №2. С. 117–126.
14. Болобов В.И., Ле-Тхань Б., Плащинский В.А. О распространении трещины по горной породе при ударе // Обогащение руд. 2019. №6. С. 3–8.
15. Зависимость наработки пики гидромолота от износостойкости ее материала / Болобов В.И., Ле Тхань Бинь, Чупин С.А., Плащинский В.А. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2020. №5. С. 68–79. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-5-0-68-79
16. Холодняков Г.А., Половинко А.В., Лигоцкий Д.Н. Экологичная разработка крепких горных пород с помощью гидромолотов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2012. №3. С. 70–74.

References

1. Anfimov A.L. The lithological and facies characteristics of the boehmite-containing limestones of the above-ore strata at the North Urals Bauxite Mine. *Litologiya i poleznye iskopаемые* [Litology and Minerals], 2015, no. 3, pp. 3–8. (In Russ.)
2. Sidorov D.V. Geomechanical rationale for structural parameters of the room-and-pillar system to design deep levels at the North Urals Bauxite Mine. *Zapiski Gornogo Instituta* [Journal of Mining Institute], 2012, vol. 199, pp. 134–141. (In Russ.)
3. Galchenko Yu.P. Solution of geoecological problems in underground mining of deep iron ore deposits. *Eurasian Mining*, 2018, no. 1, pp. 35–40. DOI: 10.17580/em.2018.01.08
4. Kozhakhmetova Z.Zh., Kozhakhmetov O.S. Modern methods of mining bauxite deposits. *Molodoy ucheny* [Young Scientist], 2017, no. 17 (151), pp. 95–98. Available at: <https://moluch.ru/archive/151/42900/> (In Russ.)
5. Sidorov D.V. Methodology of reducing rock-bump hazard, when using the room-and-pillar system of mining of the North Urals Bauxite Mine at great depth. *Zapiski Gornogo Instituta* [Journal of Mining Institute], 2017, vol. 223, pp. 58–69. DOI: 10.18454/PMI.2017.1.58
6. Ismael M. Performance prediction of hydraulic breakers in excavation of a rock mass. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik* (The Mining-Geological-Petroleum Bulletin), 2021, vol. 36, no. 4.
7. Litvinov A.R. *Obosnovanie parametrov skhem potochnoy tekhnologii bezvzryvnoy posloyno-polosovoy otrabotki massivov krepkikh porod: avtoref. diss. kand. tekhn. nauk* [Providing the rationale for parameters of flow technology of blast-free layer-band mining of hard rock massifs: Abstract of the PhD thesis]. Moscow, 2001, 24 p. (In Russ.)
8. Ficarella A., Giuffrida A., Laforgia D. Numerical investigations on the working cycle of a hydraulic breaker: off-design performance and influence of design parameters. *International Journal of Fluid Power*, 2006, vol. 7, no. 3, pp. 41–50.
9. Anistratov Yu.I. Efficiency of blast-free technologies for open pit mining of rocks. *Gornaya promyshlennost* [Mining Industry], 1997, no. 2, pp. 20–23. (In Russ.)
10. Pankevich Yu.B. The use of powerful hydraulic breakers by Krupp for blast-free mining of mineral deposits solves the issues of ecology and product quality. *Gornaya promyshlennost* [Mining Industry], 1997, no. 2, p. 45. (In Russ.)
11. Labutin V.N., Markov V.S. Prospects of using a combined method of rock breaking. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin], 2015, no. 12. (In Russ.)
12. Lysikov B.A., Reznik A.V., Dubinin A.V. Blast-free environmentally friendly tunneling with hydraulic breakers. Donetsk: Donetsk Technical University, 2004, pp. 143–145. (In Russ.)
13. Toraño J. et al. Environmental impact of rock excavation in urban areas: comparison between blasting and hydraulic breaker hammer. *Civil Engineering and Environmental Systems*, 2006, vol. 23, no. 2, pp. 117–126.
14. Bolobov V.I., Le Thanh B., Plashchinsky V.A. On the crack propagation along the rock on impact. *Obogashchenie rud* [Enrichment of Ores], 2019, no. 6, pp. 3–8. (In Russ.)

15. Bolobov V.I., Le Thanh Binh, Chupin S.A., Plashchinsky V.A. Dependence between the life of a hydraulic breaker pick and wear resistance of its material. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tehnicheskiy zhurnal)* [Mining Informational and Analytical Bulletin (Science and Technical Journal)], 2020, no. 5, pp. 68-79. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-5-68-79

16. Kholodnyakov G.A., Polovinko A.V., Ligotskiy D.N. Ecological mining of hard rocks using hydraulic breakers. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tehnicheskiy zhurnal)* [Mining Informational and Analytical Bulletin (Science and Technical Journal)], 2012, no. 3, pp. 70-74. (In Russ.)

Поступила 31.05.2022; принята к публикации 14.06.2022; опубликована 28.06.2022
Submitted 31/05/2022; revised 14/06/2022; published 28/06/2022

Холмский Алексей Валерьевич – аспирант,
Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия.
Email: chelwick@yandex.ru. ORCID 0000-0003-1311-0949

Фомин Сергей Игоревич – доктор технических наук, профессор,
Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия.
Email: fomisi@mail.ru. ORCID 0000-0002-0939-1189

Alexey V. Kholmskiy – postgraduate student,
Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia
Email: chelwick@yandex.ru. ORCID 0000-0003-1311-0949

Sergey I. Fomin – DrSc (Eng.), Professor,
Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia.
Email: fomisi@mail.ru. ORCID 0000-0002-0939-1189

МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

METALLURGY OF FERROUS, NON-FERROUS AND RARE METALS

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

УДК 549:54.055

DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-2-44-52



ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ ШЛАКОВ ФЕРРОВОЛЬФРАМОВОГО ПРОИЗВОДСТВА КЛЮЧЕВСКОГО ЗАВОДА (СРЕДНИЙ УРАЛ)

Ерохин Ю.В., Пономарев В.С.

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 Ключевского завода ферросплавов, полученных при производстве ферровольфрама. **Используемые методы.** Химический состав породообразующих и рудных минералов шлака установлен на электронно-зондовом микронализаторе CAMECA SX 100 с пятью волновыми спектрометрами (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 ферровольфрамового производства Ключевского металлургического завода. Установлено, что они сложены фтормайенит-шпинелевым агрегатом со значительным содержанием флюорита и присутствием кусpidина, фторкюйгенита, а также металла (Fe-W-сплава и интерметаллида Fe_7W_6). Данные шлаки являются отходами ферровольфрамового производства, а температура их образования, по всей видимости, оценивается в узких пределах – 1360–1460°C. **Практическая значимость.** Изученные нами шлаки можно пускать в дополнительную переработку, так как породообразующая шпинель является хорошим абразивным материалом, а попутно выделяемый ферровольфрам (он легко выделяется магнитной сепарацией) можно далее использовать в качестве легирующих добавок к сталим.

Ключевые слова: фтормайенит, шпинель, флюорит, кусpidин, минералогия, шлаки, Ключевской завод ферросплавов.

Авторы благодарят руководство ПАО «Ключевской завод ферросплавов» и Ключевской обогатительной фабрики за возможность посетить и отобрать пробы на шлакоотвале.

Исследования проведены в рамках Госбюджетной тематики ИГГ УрО РАН.

© Ерохин Ю.В., Пономарев В.С., 2022

Для цитирования

Ерохин Ю.В., Пономарев В.С. Вещественный состав шлаков ферровольфрамового производства Ключевского завода (Средний Урал) // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №2. С. 44–52. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-2-44-52>



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 FROM THE FERROTUNGSTEN PRODUCTION PROCESS AT THE KLYUCHEVSKOY PLANT (THE MIDDLE URALS)

Erokhin Yu.V., Ponomarev V.S.

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

Abstract. Problem Statement (Relevance). The Ural region is a metallurgical center of Russia more than 300 years, and for such a long period a large amount of man-made waste (slag) has accumulated here. The study on the material composition of the slags is a relevant task, since before you dispose of them you need to understand what kind of a mineral composition we are dealing with. 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 from the Klyuchevskoy Ferroalloy Plant formed as a result of ferrotungsten production. **Methods Applied.** The chemical composition of rock-forming and ore minerals of the slag was determined with a CAMECA SX 100 electron probe microanalyzer with five wave spectrometers (the Institute of Geology and Geochemistry, the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg). To analyze it, we used polished petrographic thin sections cut from pieces of slag. **Originality.** The material composition of the slags was studied from the point of view of conventional mineralogy, using the modern mandatory nomenclature of the International Mineralogical Association. **Result.** For the first time, the mineralogy of ferrotungsten slags produced at the Klyuchevskoy Metallurgical Plant was studied. It has been established that they are composed of a fluormayenite-spinel aggregate with a significant content of fluorite and the presence of cuspidine, fluorkyuygenite, and metal (Fe-W alloy and Fe₇W₆ intermetallic compound). These slags are waste products of ferrotungsten production, and the temperature of their formation is apparently estimated within narrow limits of 1360–1460°C. **Practical Relevance.** The slags under study can be used for additional processing, because rock-forming spinel is a good abrasive material, and ferrotungsten as a by-product (it is easily produced by magnetic separation) can be further used as alloying additions to steels.

Keywords: fluormayenite, spinel, fluorite, cuspidine, mineralogy, slags, Klyuchevskoy Ferroalloy Plant.

Acknowledgements

The authors express gratitude to the management of PJSC Klyuchevskoy Ferroalloy Plant and Klyuchevskoy Beneficiation Plant for visiting and taking samples at the slag disposal area.

The studies were carried out as part of the state-financed subject of the Institute of Geology and Geochemistry, the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

For citation

Erokhin Yu.V., Ponomarev V.S. Material Composition of Slags from the Ferrotungsten Production Process at the Klyuchevskoy Plant (the Middle Urals). *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 2, pp. 44–52. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-2-44-52>

Введение

Ключевской завод ферросплавов (ПАО «КЗФ») расположен в 50 км к юго-востоку от г. Екатеринбурга на восточной окраине пос. Двуреченск (Свердловская область, Сысертский район). Основано предприятие в 1941 г. на базе обогатительной фабрики хромитов, которые добывались здесь же, в рядом расположенным одноименном Ключевском гипербазитовом массиве. На данный момент завод представляет собой современное предприятие по производству различных ферросплавов и лигатур с добавлением редких и редкоземельных металлов, а также бора и алюминия. Ключевской завод работает исключительно на привозном сырье, так как местные

хромитовые рудники были полностью истощены еще до основания предприятия.

С момента основания завода здесь сразу применялся метод внепечной алюминотермической плавки без применения металлургических агрегатов. В годы Великой Отечественной войны на предприятии выпускали хромалюминиевую лигатуру, низкоуглеродистый феррохром, а также металлический хром и марганец. В 1954 г. началось возведение новых конструкций завода, а фактически полная его перестройка. В 1957 г. ввели в действие ферросплавный цех по внепечному производству сплавов хрома и его лигатур. В 1961–1975 гг. были приняты в эксплуатацию цеха по внепечной выплавке ферротитана и феррониобия электропечным способом. Уже к 1968 г. выплавка

сплавов в электропечах составила 57% от всего объема производства. В 1972–1975 гг. была проведена реконструкция во всех цехах с установкой электропечей и систем газоочисток. Общий выпуск ферросплавов к 1990 г. был увеличен в 12 раз по сравнению с 1957 г. В период 1961–1991 гг. завод являлся крупнейшим в мире производителем металлического хрома [1].

К сожалению, за вполне длительную историю завода детального изучения вещественного состава шлаков ферровольфрамового производства Ключевского завода не проводилось, хотя их было накоплено около 20 тыс. т. При этом некоторые сведения по минеральному и химическому составу данных шлаков приводилось в работе О.А. Завьялова [2].

Отбор образцов шлака и методы исследования

Шлаки Ключевского завода являются основным техногенным мусором в окрестностях завода и самого пос. Двуреченск, их часто используют для отсыпки дорожного полотна. Благодаря этому шлаковый материал является полностью доступным для отбора и изучения. При этом шлаки ферровольфрамового производства, как малотоннажные и редкие, находятся в пределах заводского шлакоотвала (привязка с GPS-навигатора – N 56°60'19.6'', E 61°11'71.4''), расположенного на территории самого предприятия непосредственно южнее дороги Двуреченск – Колюткино. В отвале преобладают вполне обычные для Ключевского завода и известные нам разноокрашенные шлаки рубин-дяюдаоитового, шпинелевого и корунд-хибонитового состава [3–9]. С северо-западной и северной стороны заводского отвала нами были обнаружены крупные блоки необычного для данного предприятия светло-серого шлака, размером до 1 м, изучение которых и представлено в настоящей работе. Данные блоки имеют визуальную зональность, так как их нижняя часть (примерно 25% от всего объема) выглядит более плотной и практически не содержит полостей. При этом верхняя часть блоков достаточно сильно пористая (количество пор достигает 20% от объема породы) и содержит полости размером до 2–3 см.

Химический состав породообразующих и рудных минералов определен на электронно-зондовом микроанализаторе CAMECA SX 100 с пятью волновыми спектрометрами (ИГГ УрО РАН, г. Екатеринбург, аналитик И.А. Готтман). Для микрозондового анализа использовались полированные петрографические шлифы, вырезанные из кусочков шлака.

Полученные результаты и их обсуждение

В результате исследований оказалось, что отобранные нами шлаки сложены фтормайенит-шпинелевым агрегатом со значительным содержанием флюорита и присутствием куспидина, фторкюйгенита, ферровольфрама. Химический состав шлака следующий (в вес. %): WO₃ – 0,2–0,8; MoO₃ – 0,1–0,2; SiO₂ – 0,5–1,0; Fe₂O₃ – 0,1–0,4; Al₂O₃ – 54,8–58,9; MgO – 2,8–5,3; CaO – 33,7–38,1 (дано по [2]).

Фтормайенит (Ca₁₂Al₁₄O₃₂[□₄F₂]) является одним из главных породообразующих минералов шлака, он образует вытянутые скелетные кристаллы, размером до 1 мм в длину, а также мелкие изометрические индивиды, размером до 50 мкм. Его содержание достигает 35–40 об.% породы (рис. 1–4).

Кристаллы не содержат каких-либо минеральных включений и не имеют зональности. По данным микрозондового анализа (табл. 1) они вполне уверенно определяются как фтормайенит [10]. В качестве примесей в минерале отмечаются кремнезем (SiO₂ до 0,2 мас. %), магний (MgO до 0,5 мас. %) и хлор (Cl до 0,3 мас. %). По данным кристаллохимического пересчета содержит до 5% минала хлормайенита. На границе с открытыми полостями зерна фтормайенита замещаются каймами водосодержащего фторкюйгенита. Интересно, что до недавнего времени природный майенит характеризовался как абсолютно безводный и не содержащий галогенов минерал [11]. С 2013 г. группу майенита полностью переформатировали с введением в структуру минерала новой позиции, которая может быть занята хлором, фтором или водой [12]. При этом фторсодержащий майенит, аналог нынешнего природного фтормайенита, описывался в техногенных образованиях (различные цементы и др.) еще в 1973 г. [13]. В природных условиях фтормайенит пока обнаружен в ларнитсодержащих пирометаморфических породах провинции Хатрурим (Израиль) [10].

Шпинель (MgAl₂O₄) является главным породообразующим минералом в шлаке, местами его содержание достигает 75–80 об.%, особенно в нижней и более плотной части блоков (см. рис. 1–4). Минерал абсолютно бесцветный, иногда с внешней белой корочкой. Часто содержит включения рудного минерала. В полостях индивиды полностью прозрачные и представлены хорошо образованными октаэдрами размером до 1 мм в диаметре. Они не содержат каких-либо включений и имеют сильный, близкий к алмазному, блеск, то есть являются драгоценным камнем – лейкошпинелью.

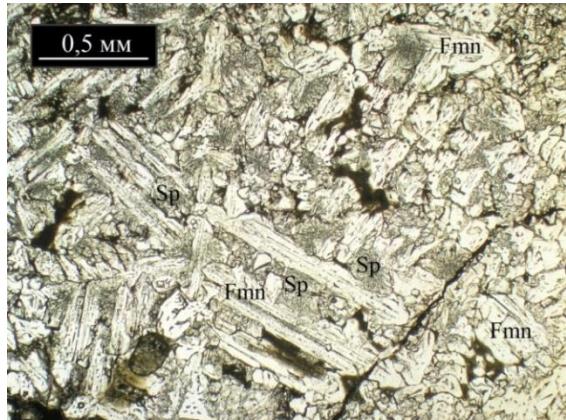


Рис. 1. Внешний вид шлака Ключевского завода с крупными кристаллами фтормайенита (Fmn) и шпинели (Sp). Фото шлифа без анализатора
 Fig. 1. Slag from the Klyuchevskoy Plant with large crystals of fluormayenite (Fmn) and spinel (Sp). Photo of the thin section, without analyzer

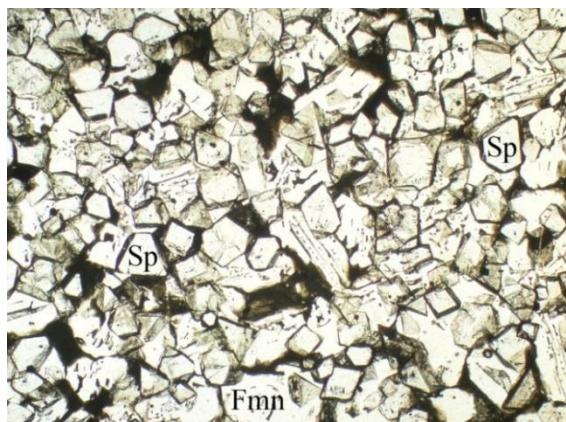


Рис. 3. Внешний вид шлака из нижней части блоков с обильной шпинелью (Sp) и редкими зернами фтормайенита (Fmn). Фото шлифа, без анализатора, размер поля 1,5 мм
 Fig. 3. Slag from a lower part of blocks with abundant spinel (Sp) and rare fluormayenite (Fmn) grains. Photo of the thin section, without analyzer, field size of 1.5 mm

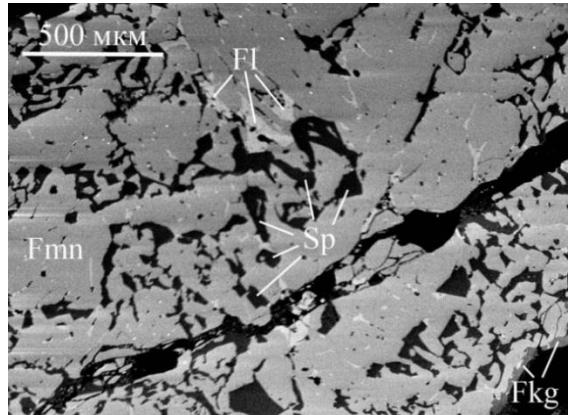


Рис. 2. Фтормайенит (Fmn), фторкюйгенит (Fkg), шпинель (Sp) и флюорит (Fl) в матрице шлака. BSE-изображение, CAMECA SX 100
 Fig. 2. Fluormayenite (Fmn), fluorkyuygenite (Fkg), spinel (Sp), and fluorite (Fl) in a slag matrix. BSE image, CAMECA SX 100

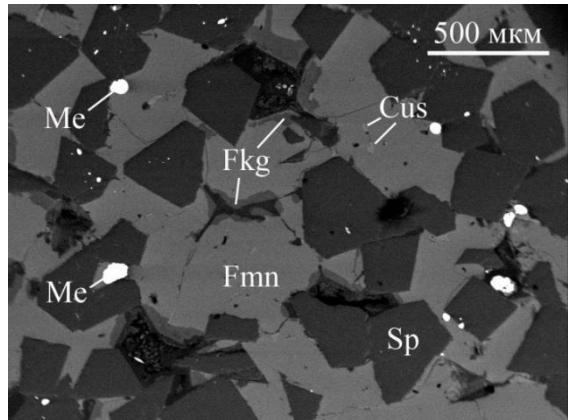


Рис. 4. Ферровольфрам (Me), фторкюйгенит (Fkg) и куспидин (Cus) в агрегате фтормайенита (Fmn) и шпинели (Sp). BSE-изображение, CAMECA SX 100
 Fig. 4. Ferrotungsten (Me), fluorkyuygenite (Fkg), and cuspidine (Cus) in an aggregate of fluormayenite (Fmn) and spinel (Sp). BSE image, CAMECA SX 100

Таблица 1. Химический состав фтормайенита из шлака Ключевского завода, мас. %
 Table 1. Chemical composition of fluormayenite from slag from the Klyuchevskoy Plant, wt. %

Номер анализа	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	F	Cl	-O=F ₂	-O=Cl ₂	Сумма
1	0,10	49,98	0,54	47,92	2,68	0,22	-1,13	-0,05	100,26
2	0,12	50,00	0,50	48,17	2,76	0,26	-1,16	-0,06	100,59
3	0,18	50,25	0,46	47,96	2,74	0,03	-1,15	-0,01	100,45
4	0,14	50,29	0,42	48,00	2,68	0,06	-1,13	-0,01	100,43
5	0,11	50,18	0,46	47,89	2,74	0,11	-1,15	-0,03	100,31

Кристаллохимическая формула в расчете на 28 формульных единиц

1	(Ca _{12,00} Mg _{0,14}) _{12,14} (Al _{13,77} Si _{0,02}) _{13,79} O ₃₂ [□ _{3,93} (F _{1,98} Cl _{0,09}) _{2,07}]
2	(Ca _{12,01} Mg _{0,11}) _{12,13} (Al _{13,71} Si _{0,03}) _{13,74} O ₃₂ [□ _{3,87} (F _{2,03} Cl _{0,10}) _{2,13}]
3	(Ca _{11,99} Mg _{0,12}) _{12,11} (Al _{13,82} Si _{0,04}) _{13,86} O ₃₂ [□ _{3,97} (F _{2,02} Cl _{0,01}) _{2,03}]
4	(Ca _{12,01} Mg _{0,11}) _{12,12} (Al _{13,85} Si _{0,03}) _{13,88} O ₃₂ [□ _{4,00} (F _{1,98} Cl _{0,02}) _{2,00}]
5	(Ca _{11,98} Mg _{0,12}) _{12,10} (Al _{13,81} Si _{0,03}) _{13,84} O ₃₂ [□ _{3,94} (F _{2,02} Cl _{0,04}) _{2,06}]

Микрозондовые анализы показали, что химический состав октаэдров довольно устойчивый и определяется как шпинель (табл. 2). Из значимых примесей в минерале отмечается только кальций (CaO до 0,3 мас.-%), то есть эта шпинель близка к эталонным значениям. При этом по литературным данным шпинель из шлаков Ключевского завода характеризуется примесями титана или хрома, в зависимости от перерабатываемой руды [5, 9]. К примеру, нами было установлено, что шпинель из шлаков алюминотермического производства хрома содержит до 5,6 мас.% Cr₂O₃ [8]. В природных условиях шпинель встречается достаточно часто, это обычный аксессорный минерал магнезиальных скарнов, а точнее входящих в их состав магнезитовых и доломитовых мраморов [14]. Кроме того, шпинель часто описывают в составе различных метеоритов, иногда даже в значительных количествах [15].

Таблица 2. Химический состав шпинели из шлака Ключевского завода, мас. %

Table 2. Chemical composition of spinel from slag from the Klyuchevskoy Plant, wt. %

Номер анализа	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Сумма
1	0,07	70,82	-	-	28,14	0,21	99,24
2	-	71,09	0,04	0,01	28,43	0,19	99,76
3	-	71,27	-	0,08	28,16	0,21	99,72
4	0,02	71,10	0,06	0,02	27,92	0,20	99,32
5	0,07	71,15	-	-	28,25	0,32	99,80
Кристаллохимическая формула в расчете на 3 формульные единицы							
1	(Mg _{1,00} Ca _{0,01}) _{1,01} Al _{1,99} O ₄						
2	(Mg _{1,00} Ca _{0,01}) _{1,01} Al _{1,99} O ₄						
3	(Mg _{0,99} Ca _{0,01}) _{1,00} Al _{2,00} O ₄						
4	(Mg _{0,99} Ca _{0,01}) _{1,00} Al _{2,00} O ₄						
5	(Mg _{1,00} Ca _{0,01}) _{1,01} Al _{1,99} O ₄						

Флюорит (CaF₂) является второстепенным пордообразующим минералом в шлаке, местами его содержание достигает 10–15 об.%, особенно в верхней, более пористой, части блоков. Минерал образует скопления размером до 20–25 мкм и тонкие прожилки в интерстициях между кристаллами фтормайенита и шпинели (см. рис. 2). Химический состав минерала (табл. 3) полностью соответствует эталонному флюориту. Из значимых примесей в минерале отмечается присутствие натрия (Na₂O до 0,3 мас.-%) и магния (MgO до 0,1 мас.-%). В целом, присутствие

флюорита в данных шлаках вполне объяснимо, так как данный минерал используют как флюс при алюминотермических реакциях, а также он повышает текучесть шлака [16]. В природных условиях флюорит является достаточно часто встречающимся минералом, причем кристаллизуется как в осадочных породах [17], так и в магматических системах [18].

Таблица 3. Химический состав флюорита из шлака Ключевского завода, мас. %

Table 3. Chemical composition of fluorite from slag from the Klyuchevskoy Plant, wt. %

Номер анализа	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	F	-O≡F ₂	Сумма
1	0,05	0,12	71,63	0,24	48,02	-20,22	99,84
2	0,03	0,05	71,79	0,27	47,95	-20,19	99,90
3	0,01	0,12	71,56	0,26	48,31	-20,34	100,15
4	0,06	0,08	71,42	0,27	48,04	-20,22	99,65
5	0,02	0,10	71,62	0,29	48,49	-20,42	100,10
Кристаллохимическая формула в расчете на 3 формульные единицы							
1-5 _{ср.зи.}	(Ca _{1,00} Na _{0,01}) _{1,01} F _{1,99}						

Фторкюйгенит (Ca₁₂Al₁₄O₃₂[(H₂O)₄F₂]) встречается редко в данном шлаке и отмечается по краям индивидов фтормайенита в виде тонких кайм мощностью до 30 мкм (см. рис. 2, 4). По данным микрозондового анализа химический состав следующий (в мас.%, среднее из 10-ти анализов): SiO₂ – 0,26; Al₂O₃ – 46,56; MgO – 0,69; CaO – 44,37; F – 2,33; Cl – 0,27; -O≡F₂ – 0,98; -O≡Cl₂ – 0,06; сумма 93,44, то есть минерал вполне соответствует фторкюйгениту.

Пересчет на кристаллохимическую формулу – (Ca_{11,96}Mg_{0,19})_{12,15}(Al_{13,81}Si_{0,07})_{13,88}O₃₂[(H₂O)_{4,03}(F_{1,86}Cl_{0,11})_{1,97}]. Приурочен к полостям в шлаке, что говорит о наличии небольшого количества воды в расплаве. В природных условиях фторкюйгенит, так же как и фтормайенит, пока обнаружен в ларнитсодержащих пирометаморфических породах провинции Хатрурим (Израиль) [10].

Кусpidин (Ca₈[Si₂O₇]₂F₄) является редким минералом данного шлака и его содержание не превышает 5 об.% породы. Встречается он исключительно в виде включений в зернах фтормайенита, образуя редкие идиоморфные удлиненные индивиды размером до 20 мкм (см. рис. 4). По данным микрозондового анализа минерал имеет следующий химический состав (в мас.%, среднее из 6-ти анализов): SiO₂ – 31,93; Al₂O₃ – 0,74; MgO – 0,12; CaO – 61,45; F – 10,44; -O≡F₂ – 4,40; сумма 100,28. Пересчет на кристаллохимическую формулу –

$(\text{Ca}_{7.99}\text{Mg}_{0.01})_{8.01}[(\text{Si}_{3.88}\text{Al}_{0.11})_{3.99}\text{O}_{32}]\text{F}_{4.01}$ показывает, что данный состав полностью соответствует куспидину. В природе он встречается редко, обычно как минерал высокотемпературных известковистых скарнов [19], а также отмечается в щелочных породах и в пирометаморфических формациях [20]. В техногенных условиях куспидин установлен в горелых отвалах угольных месторождений [21], кроме того, он характерный минерал для различных фосфорсодержащих шлаков [22].

Ферровольфрам (FeW) слагает в шлаке обильные мелкие округлые и комковатые выделения размером до 100 мкм (см. **рис. 4**). Наибольшее его количество отмечается в нижней части шлакоблоков среди агрегата шпинели. Встречается как в межзерновых интерстициях, так и в виде включений в кристаллах шпинели. В режиме обратно-рассеянных электронов металлическая фаза выглядит однородной, без зональности и не содержит включений. При этом металл имеет разнородный химический состав от зерна к зерну и по данным кристаллохимического пересчета определяется как ферровольфрам переменного состава (**табл. 4**). Интересно, что анализ с наибольшим содержанием вольфрама (см. **табл. 4**, анализ 2) приближается по своему составу к известному интерметаллиду Fe_7W_6 , который часто встречается в сплавах и сталях, легированных вольфрамом [23]. В природе все эти вольфрамовые соединения пока не обнаружены.

Таблица 4. Химический состав ферровольфрама из шлака Ключевского завода, мас. %
Table 4. Chemical composition of ferrotungsten from slag from the Klyuchevskoy Plant, wt. %

Номер анализа	Si	Cr	Al	Fe	Mn	W	P	Сумма
1	1,88	0,58	0,02	35,25	0,55	61,90	0,24	100,40
2	1,42	0,59	0,05	28,64	0,31	68,33	0,05	99,41
3	2,16	0,71	0,03	34,52	1,03	61,46	0,36	100,24
Кристаллохимическая формула в расчете на 1 формульную единицу								
1	$(\text{Fe}_{0.61}\text{W}_{0.33}\text{Si}_{0.03}\text{Cr}_{0.01}\text{Mn}_{0.01}\text{P}_{0.01})_{1.00}$							
2	$(\text{Fe}_{0.55}\text{W}_{0.40}\text{Si}_{0.03}\text{Cr}_{0.01}\text{Mn}_{0.01})_{1.00}$							
3	$(\text{Fe}_{0.60}\text{W}_{0.32}\text{Si}_{0.04}\text{Mn}_{0.02}\text{Cr}_{0.01}\text{P}_{0.01})_{1.00}$							

Обнаруженный нами сплав железа и вольфрама позволяет говорить о том, что изученные шлаки Ключевского завода являются отходами производства ферровольфрама. Температуру кристаллизации этих шлаков сложно оценить, так как в изученной породе нет надежных минералов-индикаторов, но сама собой эта температура ниже

самой алюминотермической реакции, которая протекает в интервале 1900–2400°C [24]. При этом температура плавления/кристаллизации майенита, если рассматривать систему $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ по разным авторам [25, 26 и др.], оценивается в пределах 1360–1460°C.

Полученные нами результаты достаточно сильно отличаются от ранее приведенной информации по минеральному составу данных шлаков [2]. Так, О.А. Завьялов привел следующий минеральный состав: майенит – 65–70%, мономагнит кальция – 20–25% и шпинель – 5–10%. Это определение делалось на основе рентгенофазового анализа и, как видно, совсем не отражает полной картины минерального состава ферровольфрамовых шлаков.

В целом изученный шлак можно пускать в дополнительную переработку. При использовании магнитной сепарации можно легко выделить ферровольфрам, который далее пойдет в металлургический передел, то есть в качестве легирующих добавок к сталям. Шпинель как твердый минерал является хорошим абразивным материалом, а фтормайенит может быть использован как вяжущее вещество в цементном производстве.

Заключение

Таким образом, впервые изучена минералогия светло-серых глиноземистых шлаков Ключевского завода ферросплавов. Установлено, что они сложены фтормайенит-шпинелевым агрегатом со значительным содержанием флюорита и присутствием куспидина, фторкюйгенита, а также металла (Fe-W-сплава и интерметаллида Fe_7W_6). Данные шлаки являются отходами ферровольфрамового производства, а температура их образования, по всей видимости, оценивается в узких пределах – 1360–1460°C.

Список литературы

1. Ключевской завод ферросплавов: к 75-летию Ключевского завода ферросплавов. Энциклопедия / под ред. Н.В. Кузьмина. 2-е изд., перераб. Екатеринбург: Уральский рабочий, 2016. 519 с.
2. Завьялов О.А. Жаростойкие бетоны на основе алюминотермических шлаков ферросплавного производства: автореф. ... дис. канд. техн. наук. Днепропетровск, 1981. 24 с.
3. Лапин В.В., Курцева Н.Н., Острогорская О.П. О шпинели, корунде (рубине) и своеобразном «β-глиноземе» в алюминотермических шлаках // Труды ИГЕМ АН СССР. 1958. Вып. 30. С. 124–133.
4. Подногин А.К., Сучильников С.И., Шклэр Р.С. О минеральном составе шлака алюминотермической

плавки ферротитана // Труды 2-го Уральского петрографического совещания «Петрография оgneупоров, шлаков и синтетических минералов». Свердловск: ИГГ УФАН СССР, 1968. Т. 7. С. 112–115.

5. Вещественный состав и свойства главных разновидностей шлаков ОАО «Ключевской завод ферросплавов» / Перепелицын В.А., Рытвин В.М., Кормина И.В., Игнатенко В.Г. // Новые оgneупоры. 2006. №9. С. 15–20.
6. Ерохин Ю.В. Минералогия глиноземистого шлака Ключевского завода ферросплавов // Минералогия техногенеза. 2012. №13. С. 65–75.
7. Ерохин Ю.В., Берзин С.В. Сапфир-хибонитовый шлак из Ключевского завода ферросплавов // Минералогия техногенеза. 2014. №15. С. 70–81.
8. Ерохин Ю.В., Пономарев В.С., Михеева А.В. Шпинелевый шлак из Ключевского завода ферросплавов // Минералогия техногенеза. 2018. №19. С. 70–80.
9. Техногенное минеральное сырье Урала: монография / Перепелицын В.А., Рытвин В.М., Коротеев В.А., Макаров А.Б., Григорьев В.Г., Гильварг С.И., Абызов В.А., Абызов А.Н., Табулович Ф.А. Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2013. 332 с.
10. Galuskin E.V., Gfeller F., Armbruster T., Galuskina I.O., Vapnik Y., Dulski M., Murashko M., Dzierżanowski P., Sharygin V.V., Krivovichev S.V., Wirth R. Mayenite supergroup, part III: Fluormayenite, $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{32}[\square_4\text{F}_2]$, and fluorkyuygenite, $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{32}[(\text{H}_2\text{O})_4\text{F}_2]$, two new minerals from pyrometamorphic rocks of the Hatrurim Complex, South Levant // European Journal of Mineralogy. 2015. V. 27. P. 123–136. DOI: 10.1127/ejm/2015/0027-2420
11. Hentschel G. Mayenit, $12\text{CaO } 7\text{Al}_2\text{O}_3$, und brownmillerit, $2\text{CaO } (\text{Al},\text{Fe})_2\text{O}_3$, zwei neue Minerale in den kalksteineschlüssen der lava des Ettringer Bellerberges // Neues Jahrbuch für Mineralogie. Monatshefte. 1964. S. 22–29.
12. Galuskin E.V., Kusz J., Armbruster T., Bailau R., Galuskina I.O., Ternes B., Murashko M. A reinvestigation of mayenite from the type locality, the Ettringer Bellerberg volcano near Mayen, Eifel district, Germany // Mineralogical Magazine. 2012. V. 76. P. 707–716. DOI: 10.1180/minmag.2012.076.3.18
13. Williams P.P. Refinement of the structure of $11\text{CaO } 7\text{Al}_2\text{O}_3 \text{ CaF}_2$ // Acta Crystallographica. 1973. B29. P. 1550–1551.
14. Лебедев А.М., Сумин Н.Г. О красной шпинели из Слюдянки // Труды Минералогического Музея АН СССР. 1952. Вып. 4. С. 149–151.
15. Bjärnborg K., Schmitz B. Large spinel grains in a CM chondrite (Acfer 331): Implications for reconstructions of ancient meteorite fluxes // Meteoritics and Planetary Science. 2013. V. 48. №2. P. 180–194.
16. Шлакообразование в процессе внепечной алюминотермической выплавки ферровольфрама / Пашкеев И.Ю., Пашкеев К.Ю., Калинин К.С., Карпенко Е.Н. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2013. Т. 13. №1. С. 29–33.
17. Абрамович Ю.М., Нечаев Ю.А. Аутигенный флюорит в кунгурских отложениях Пермского Приуралья // Доклады АН СССР. 1960. Т. 135. №2. С. 414–415.
18. Калюжный В.А., Ляхов Ю.В. Включения касситерита и флюорита в кристаллах из пегматитов Волыни // Доклады АН СССР. 1962. Т. 143. №5. С. 1182–1185.
19. Henry D.A. Cuspidine-bearing skarn from Chesney Vale, Victoria // Australian Journal of Earth Sciences, 1999. Vol. 46. №2. P. 251–260.
20. Gross S. The mineralogy of the Hatrurim Formation, Israel // Geological Survey of Israel. 1977. Bulletin №70. 80 p.
21. Kruszewski L. Oldhamite-periclase-portlandite-fluorite assemblage and coexisting minerals of burnt dump in Siemianowice Śląskie-Dąbrówka Wielka area (Upper Silesia, Poland) – preliminary report // Mineralogia Polonica Special Papers. 2006. Vol. 28. P. 118–120.
22. Wilson A., Leary J.K. The occurrence of cuspidine in phosphorus furnace slag // American Mineralogist. 1961. V. 46. P. 759–761.
23. Song W., Xu L., Shan K., Zhou Yu., Xiao F., Shen H., Wei S. Development of a new high-density iron-tungsten alloy (FWA) reinforced by Fe7W6 and Fe2W particles with high tensile strength and specific strength // Journal of Alloys and Compounds. 2021. Vol. 854. Article 157323. DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.157323
24. Пленер Ю.Л., Сучильников С.И., Рубинштейн Е.А. Алюминотермическое производство ферросплавов и лигатур. М.: Металлургия, 1963. 175 с.
25. Rankin G.A., Wright F.E. Ternary System $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ // American Journal Science. 1915. Vol. 39. №1. P. 11–12.
26. Mao H., Hillert M., Selleby M., Sundman B. Thermodynamic assessment of the $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ system // Journal of the American Ceramic Society. 2006. Vol. 89. №1. P. 298–308. DOI: 10.1111/j.1551-2916.2005.00698.x

References

1. Ed. by Kuzmin N.V. *Klyuchevskoy zavod ferrosplavov: k 75-letiyu Klyuchevskogo zavoda ferrosplavov. Entsiklopediya* [The Klyuchevskoy Ferroalloy Plant: to the 75th Anniversary of the Klyuchevskoy Ferroalloy Plant. Encyclopedia]. 2nd edition, revised. Yekaterinburg: Ural Worker Publishing House, 2016, 519 p. (In Russ.)
2. Zavyalov O.A. *Zharostoykie betony na osnove alyuminotermicheskikh shlakov ferrosplavnogo proizvodstva: avtoref. diss. kand. tekhn. nauk* [Heat-resistant concrete based on aluminothermic slags of ferroalloy production. Extended abstract of the Ph.D. thesis]. Dnepropetrovsk, 1981. 24 p.
3. Lapin V.V., Kurtseva N.N., Ostrogorskaya O.P. On spinel, corundum (ruby) and a kind of "β-alumina" in aluminothermic slags]. *Trudy IGEM AN SSSR* [Proceedings of the Institute of Geology and Earth Mechanics of the

Academy of Sciences of the USSR], 1958, issue 30, pp. 124–133. (In Russ.)

4. Podnogin A.K., Suchilnikov S.I., Shklyar R.S. On the mineral composition of slag from the aluminothermic smelting of ferrotitanium. *Trudy 2-go Uralskogo petrograficheskogo soveshchaniya «Petrografiya ogneuporov, shlakov i sinteticheskikh mineralov»* [Proceedings of the 2nd Ural petrographic meeting "Petrography of refractories, slags and synthetic minerals"]. Sverdlovsk: Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the Academy of Sciences of the USSR], 1968, vol. 7, pp. 112–115. (In Russ.)
5. Perepelitsyn V.A., Rytvin V.M., Kormina I.V., Ignatenko V.G. Material composition and properties of the main types of slags of OJSC Klyuchevskoy Ferroalloy Plant]. *Novyye ogneupory* [New Refractories], 2006, no. 9, pp. 15–20. (In Russ.)
6. Erokhin Yu.V. Mineralogy of aluminous slag from the Klyuchevskoy Ferroalloy Plant]. *Mineralogiya tekhnogeneza* [Mineralogy of Technogenesis], 2012, no. 13, pp. 65–75. (In Russ.)
7. Erokhin Yu.V., Berzin S.V. Sapphire-hibonite slag from the Klyuchevskoy Ferroalloy Plant]. *Mineralogiya tekhnogeneza* [Mineralogy of Technogenesis], 2014, no. 15, pp. 70–81. (In Russ.)
8. Erokhin Yu.V., Ponomarev V.S., Mikheeva A.V. Spinel slag from the Klyuchevskoy Ferroalloy Plant. *Mineralogiya tekhnogeneza* [Mineralogy of Technogenesis], 2018, no. 19, pp. 70–80. (In Russ.)
9. Perepelitsyn V.A., Rytvin V.M., Koroteev V.A., Makarov A.B., Grigoriev V.G., Gilvarg S.I., Abyzov V.A., Abyzov A.N., Tabulovich F.A. *Tekhnogennoe mineralnoe syrie Urala: monografiya* [Technology-related mineral raw materials of the Urals: monograph]. Yekaterinburg: Editorial and Publishing Unit of the Ural Branch of RAS, 2013, 332 p. (In Russ.)
10. Galuskin E.V., Gfeller F., Armbruster T., Galuskina I.O., Vapnik Y., Dulski M., Murashko M., Dzierżanowski P., Sharygin V.V., Krivovichev S.V., Wirth R. Mayenite supergroup, part III: Fluormayenite, $Ca_{12}Al_{14a}O_{32}[\square_4F_2]$, and fluorkyuygenite, $Ca_{12}Al_{14}O_{32}[(H_2O)_4F_2]$, two new minerals from pyrometamorphic rocks of the Hatrurim Complex, South Levant. *Eur. Jour. Miner.* 27, 123–136 (2015). DOI: 10.1127/ejm/2015/0027-2420
11. Hentschel G. Mayenit, $12CaO\ 7Al_2O_3$, und Brownmillerit, $2CaO\ (Al,Fe)_2O_3$, zwei neue Minerale in den Kalksteinenschlüssen der Lava des Ettringer Bellerberges. *Neues Jahrb. Miner. Monats.* 22–29 (1964).
12. Galuskin E.V., Kusz J., Armbruster T., Bailau R., Galuskina I.O., Ternes B., Murashko M. A reinvestigation of mayenite from the type locality, the Ettringer Bellerberg volcano near Mayen, Eifel district, Germany. *Mineralogical Magazine*, 76, 707–716 (2012). DOI: 10.1180/minmag.2012.076.3.18
13. Williams P.P. Refinement of the structure of $11CaO\ 7Al_2O_3\ CaF_2$. *Acta Crystallographica*, B29, 1550–1551 (1973).
14. Lebedev A.M., Sumin N.G. On red spinel from Slyudyanka. *Trudy Mineralogicheskogo Muzeya AN SSSR* [Proceedings of the Mineralogical Museum of the USSR Academy of Sciences], 1952, vol. 4, pp. 149–151. (In Russ.)
15. Bjärnborg K., Schmitz B. Large spinel grains in a CM chondrite (Acfer 331): Implications for reconstructions of ancient meteorite fluxes. *Meteor. Planet. Sci.* 48, 2, 180–194 (2013).
16. Pashkeev I.Yu., Pashkeev K.Yu., Kalinin K.S., Karpenko E.N. Slag formation in the process of secondary aluminothermic smelting of ferrotungsten. *Vestnik YuUrGU. Seriya «Metallurgiya»* [Bulletin of SUSU. Series: Metallurgy], 2013, vol. 13, no. 1, pp. 29–33. (In Russ.)
17. Abramovich Yu.M., Nechaev Yu.A. Authigenic fluorite in the Kungurian deposits of the Permian Cisurals. *Doklady AN SSSR* [Reports of the USSR Academy of Sciences], 1960, vol. 135, no. 2, pp. 414–415. (In Russ.)
18. Kalyuzhny V.A., Lyakhov Yu.V. Inclusions of cassiterite and fluorite in crystals from Volyn pegmatites. *Doklady AN SSSR* [Reports of the USSR Academy of Sciences], 1962, vol. 143, no. 5, pp. 1182–1185. (In Russ.)
19. Henry D.A. Cuspidine-bearing skarn from Chesney Vale, Victoria. *Austr. Jour. Earth Sci.* 46, 2, 251–260 (1999).
20. Gross S. The mineralogy of the Hatrurim Formation, Israel. *Geol. Surv. Israel. 1977. Bull. No. 70.* 80 p.
21. Kruszewski Ł. Oldhamite-periclase-portlandite-fluorite assemblage and coexisting minerals of burnt dump in Siemianowice Śląskie-Dąbrówka Wielka area (Upper Silesia, Poland) - preliminary report. *Miner. Polon. Spec. Papers.* 28, 118–120 (2006).
22. Wilson A., Leary J.K. The occurrence of cuspidine in phosphorus furnace slag. *Amer. Miner.* 46, 759–761 (1961).
23. Song W., Xu L., Shan K., Zhou Yu., Xiao F., Shen H., Wei S. Development of a new high-density iron-tungsten alloy (FWA) reinforced by Fe_7W_6 and Fe_2W particles with high tensile strength and specific strength. *Jour. All. Comp.* 854, 157323 (2021). DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.157323
24. Plener Yu.L., Suchilnikov S.I., Rubinshtein E.A. *Aluminotermicheskoe proizvodstvo ferrospalov i ligatur* [Aluminothermic production of ferroalloys and addition alloys]. Moscow: Metallurgy, 1963, 175 p. (In Russ.)
25. Rankin G.A., Wright F.E. Ternary system $CaO-Al_2O_3-SiO_2$. *Amer. Jour. Sci.* 39, 1, 11–12 (1915).
26. Mao H., Hillert M., Selleby M., Sundman B. Thermodynamic assessment of the $CaO-Al_2O_3-SiO_2$ system. *Jour. Amer. Ceram. Soc.* 89, 1, 298–308 (2006). DOI: 10.1111/j.1551-2916.2005.00698.x

Поступила 19.04.2022; принята к публикации 11.05.2022; опубликована 28.06.2022
Submitted 19/04/2022; revised 11/05/2022; published 28/06/2022

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

Yury V. Erokhin – PhD (Geology and Mineralogy), Lead Researcher, Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of RAS, 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, Ural Branch of RAS, Yekaterinburg, Russia.
Email: p123v@yandex.ru. ORCID 0000-0002-1651-1281

ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

MATERIAL PROCESS ENGINEERING

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

УДК 669:662.9:658.512

DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-2-53-61



ПРИМЕР МИНИ-ЗАВОДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ В КАЧЕСТВЕ СЫРЬЯ ВТОРИЧНОЙ СТАЛИ

Ишметьев М.Е., Назаров Д.А., Левандовский С.А., Моллер А.Б., Тулупов О.Н.

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

Аннотация. Актуальность. На сегодняшний день, несмотря на замедление роста потребления стали в год, ведется развитие идеи металлургического мини-завода. Цель работы. Разработка концепции металлургического мини-завода, использующего в качестве сырья вторичную сталь. Используемые методы. В статье представлен обзор состояния мини- заводов в Российской Федерации и в мире, а также классификация данных предприятий. Проведена разработка концепции мини-завода. В ходе выполнения работы было решено выбрать старогодные рельсы в качестве сырья, а продукцию составит арматурная сталь и/или мелющие шары. Была рассмотрена технология производства с выделением следующих операций: нагрев рельсов под перекатку, перекатка рельсов в заготовку и прокатка в готовую продукцию. Были проанализированы несколько типов нагрева, после чего на основе критерии выбран наиболее благоприятный, для которого была разработана технологическая схема с указанием её особенностей. Перекатка рассматривалась при наличии процесса предварительного разделения рельса на 2 или 3 части. Был расписан участок прокатного стана, его состав и технические характеристики. Результат. На основе данных была спроектирована предварительная схема промышленной площадки под указанный мини- завод с указанием расположения оборудования. Практическая значимость. Полученная технологическая линия является высокоэкологичной, поскольку в качестве основного источника энергии используется электрический ток с ГЭС, а также не используется технология вторичной переплавки лома. Разработанная технология обладает благоприятной перспективой внедрения при нынешних экономических условиях, особенно для областей, имеющих высокое содержания железнодорожного полотна на своей территории.

Ключевые слова: арматурная сталь, вторичная сталь, индукционный нагрев, мелющие шары, мини- завод, прокатка, рельсовая сталь, старогодные рельсы.

© Ишметьев М.Е., Назаров Д.А., Левандовский С.А., Моллер А.Б., Тулупов О.Н., 2022

Для цитирования

Пример мини-завода с использованием в качестве сырья вторичной стали / Ишметьев М.Е., Назаров Д.А., Левандовский С.А., Моллер А.Б., Тулупов О.Н. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №2. С. 53–61. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-2-53-61>



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

AN EXAMPLE OF A MINI-PLANT USING SECONDARY STEEL AS A RAW MATERIAL

Ishmetev M.E., Nazarov D.A., Levandovskiy S.A., Moller A.B., Tulupov O.N.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Relevance. Today, despite the slowdown in the consumption growth per year, the ideas of a metallurgical mini-plant continue their development. **Objective.** The research is aimed at developing the concept of the metallurgical mini-plant using secondary steel as a raw material. **Methods Applied.** The paper presents an overview of the state of mini-plants in the Russian Federation and in the world, as well as the classification of these factories. The research provides for development of the idea for the mini-plant. In the course of the research, it was decided to choose used rails as raw materials, and the products would include reinforcing steel and/or grinding balls. The manufacturing process under consideration included the following operations: heating rails for rerolling, rerolling rails into a billet and rolling billets into finished products. Several heating types were analyzed, and the most favorable one was selected subject to the criteria. A process flow chart was developed for such heating type, indicating its special features. Rerolling was considered with a process of rail separation into 2 or 3 parts. There was a schedule of the rolling mill section, its composition and technical characteristics. **Result.** The data were used to design a preliminary equipment layout at the industrial site for the specified mini-plant. **Practical Relevance.** The resulting production line is highly environmentally friendly, because electric current from hydroelectric power stations is used as a main source of energy, and the technology of secondary scrap remelting is not used. The developed technology has a favorable prospect of implementation in the current economic conditions, especially for areas with many railroad tracks.

Keywords: reinforcing steel, secondary steel, induction heating, grinding balls, mini-plant, rolling, rail steel, used rails.

For citation

Ishmetev M.E., Nazarov D.A., Levandovskiy S.A., Moller A.B., Tulupov O.N. An Example of a Mini-Plant Using Secondary Steel as a Raw Material. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 2, pp. 53–61. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-2-53-61>

Введение

Последние пять лет в металлургической отрасли наблюдаются следующие тенденции: медленный рост потребления стали в год, в среднем до 3%, несмотря на произошедшее в 2021 году увеличение до 13%, загруженность мощностей по производству продукции от 70 до 80%, а также снижение капиталовложений. Поэтому как производители металлопродукции, так и производители металлургического оборудования ищут пути адаптации к ситуации.

В последнее время наблюдается ориентирование на технологии производства в условиях мини- заводов, что было подтверждено на четвертой конференции компании Danieli «Fourth Danieli Innovaction Meeting», проведённой с 3 по 5 октября 2017 года в Италии [1, 2].

Мини- заводы: определение и классификация

Мини- завод – формат металлургического предприятия, характеризующийся следующими особенностями: небольшие размеры (географи-

ческие площади), небольшой сортамент продукции, ориентирование на реализацию продукции в регионе расположения.

На сегодня в области мини- заводов итальянская компания Danieli зарекомендовала себя в качестве надёжного партнёра [2]. Среди запущенных компаний заводов за последние пять лет можно отметить: мини- завод компании «Commercial Metals Co» (США) с производительностью до 500 тыс. т/год, мини- завод компании Grupo Simec (Мексика) с производительностью до 600 тыс. т/год и мини- завод компании POSCO SS-Vina (Вьетнам) с производительностью до 1,8 млн т/год, два микрозвода компании Taybah Group (Пакистан) с суммарной производительностью до 1 млн т/год, компания Aceria de Angola в Барра до Данде (Ангола) с микрозводом производительностью 300 тыс. т/год, компания Mass Global Investment (Ирак) с мини- заводом производительностью до 1 млн т/год и др.

Мини- заводы, находящиеся на территории Российской Федерации: Абинский электрометаллургический завод ООО «АЭМЗ» с производи-

тельностью до 1,2 млн т/год, Тюменский металлургический завод «Электросталь Тюмени» с производительностью 550 тыс. т/год, Нижнесергинский метизно-металлургический завод (г. Ревда, Свердловская область) с производительностью 2 млн т/год, металлургический завод ОАО «Амурсталь» (г. Комсомольск-на-Амуре) с производительностью до 2,2 млн т/год, Ашинский металлургический завод с производительностью до 1,3 млн т/год. В данных примерах мини- заводов, кроме последнего, производят арматуру, катанку, угловой прокат, на Ашинском заводе производят тонкий и толстый лист, а также ленту [3].

Существует два способа классификации мини- заводов: по составу оборудования данного предприятия и по объёму производства (табл. 1 и 2). [4, 5].

Таблица 1. Классификация мини- заводов по составу оборудования

Table 1. Classification of mini-plants by a composition of equipment

Группа	Характеристики
Усечённые	Полупродукт производится в виде литых заготовок
Передельные	Полупродукт в конечном виде производится без выплавки на территории завода
С полным циклом	Выплавка и последующая обработка стали

Таблица 2. Классификация мини- заводов по объёму выпускаемой продукции

Table 2. Classification of mini-plants by production volume

Группа	Производительность, тыс. т/год	Стратегия развития
Нано- завод	40–230	Фиксация определённого сегмента рынка Специализация в производстве продукции
Микро- завод	230–600	Фиксация определённого сегмента рынка Специализация в производстве продукции Минимизация издержек
Мини- завод	600–2000	Минимизация издержек Комбинирование разных стратегий

Несмотря на переизбыток мощностей, плавный рост производства продолжается, что связано с желанием участников рынка самостоятельно обеспечить свой регион продукцией. В усло-

виях экспансии китайских товаров и введения ограничений на ввоз поддержка локальных производителей существенно возрастает. Сейчас экономики разных стран стараются поддержать локальных участников рынка металлургии.

В странах бывшего СССР (в частности, Российская Федерация, Украина, Казахстан) до недавнего времени развитие концепций и создание металлургических мини- заводов было существенно замедлено. Данная ситуация может быть объяснена последствиями распада СССР в 1990-е годы и впоследствии ухудшением экономической ситуации в мире после кризиса 2008 года [6].

Создание мини- заводов для производства сортового или специального проката является одним из направлений развития. Данные предприятия относятся к малотоннажным специализированным производствам и позволяют удовлетворить региональные потребности в прокате для строительного назначения [7].

Распространение мини- заводов приводит к росту потребности в ломе. Для некоторых мини- заводов используется передельный чугун и перспективное железо прямого восстановления (ЖПВ). С сырьевой точки зрения в РФ есть хорошие перспективы развития технологии производства ЖПВ ввиду наличия существенных запасов природного газа и железной руды.

Мини- заводы укрепляют региональную экономику, а конкуренция между ними является стимулом для развития и совершенствования технологий. Как правило, ниши экономики, где существуют возможности и потребности, достаточно быстро заполняются.

Разработка концепции передельного мини- завода

В последние десятилетия увеличивается число производств, использующих вторичную сталь как источник сырья, как, например, мини- завод по производству труб из отслуживших свой срок автопокрышек [8]. Рассмотрим один из таких примеров – разработка технологии для передельного мини- завода, реализующего технологию переработки старогодных железнодорожных рельсов в мелющие шары и арматурную сталь для условий работы в Иркутской области. Технология разработана на основе методик и подходов развивающихся на кафедре ТОМ (технологий обработки материалов) ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Сырьём для завода рассматриваются старогодные (отработавшие свой эксплуатационный срок) железнодорожные рельсы и литая заготовка квадратного сечения (предполагается закупка у стороннего производителя). Использование в качестве сырья квадратной заготовки подразумевает применение достаточно эффективных (уже существующих) технологий, однако готовых решений для использования старогодных рельсов в качестве сырья не существует.

На начальной стадии был поставлен вопрос: возможно ли использовать рельсовую сталь для изготовления арматурной стали и мелящих шаров? Целесообразно в этом вопросе ориентироваться на рельсовую сталь К76, поскольку данная марка чаще всего применяется в конструкции железнодорожных путей. После анализа нормативной документации было выявлено сходство между марками К76 и 80С (табл. 3). Возможно применение рельсовой стали для производства арматурной стали класса прочности А600 без термообработки [9]. Что касается мелящих шаров, химический состав рельсовой стали полностью подходит для изготовления данного вида продукции.

Таблица 3. Сравнение характеристик марок стали К76 и 80С

Table 3. Comparison of steel grades K76 and 80S

Характеристики	К76	80С
Содержание С, %	0,71–0,82	0,74–0,82
Содержание Mn, %	0,8–1,1	0,5–0,9
Содержание Si, %	0,25–0,45	0,6–1,1
Содержание P, %	≤0,035	≤0,04
Содержание S, %	≤0,04	≤0,045
Предел текучести σ_t , Н/мм ² , не менее	740	590
Временное сопротивление разрыву σ_b , Н/мм ² , не менее	1137	883
Относительное удлинение, %, не менее	6	6

На следующем этапе проводилась оценка возможности и целесообразности разработки такой технологии и её последующего применения. Составлен список предприятий с аналогичной деятельностью и изучен вопрос наличия/доступности вторичной стали (старогодных рельсов) в требуемом количестве (на рынке РФ существует несколько компаний, занимающихся поставкой старогодных рельсов, например ООО «Сила Сибири» и др.).

Были рассмотрены заводы-аналоги, производящие продукцию из старогодных рельсов, и сделан вывод, что применение такой технологии технически возможно. Изучение состояния рынка старогодных рельсов позволило понять, что перекатка изношенных рельсов не только возможна, но и будет обходиться дешевле, чем их переплавка [10–12]. Преимущественно 70% производимых рельсов – это типы Р-65 и Р-50, следовательно, можно ориентироваться на подобные типоразмеры.

Обратим внимание на технологию производства. Рассмотрим технологические операции:

- 1) предварительная обработка старогодных рельсов;
- 2) нагрев рельсов под прокатку;
- 3) прокатка заготовок под арматуру и шары;
- 4) прокатка арматурной стали;
- 5) прокатка мелящих шаров;
- 6) обработка после прокатки;
- 7) отгрузка и складирование.

Из всех элементов технологических операций стоит обратить особое внимание на нагрев рельсов под прокатку. Так как планируется запуск мини-завода на территории имеющейся промышленной площадки и сформированная ранее инфраструктура характеризуется сравнительно дешевой и доступной электрической энергией (географическое расположение вблизи гидроэлектростанции (ГЭС)), которую можно будет использовать, то сделан предварительный вывод об экономической целесообразности использования индукционного нагрева. Для принятия окончательного решения был проведён анализ основных способов нагрева заготовок под прокатку (табл. 4).

Как видно из табл. 4, выбор индукционного нагрева технологически обоснован [13].

Далее была представлена технологическая схема индукционного нагрева с учётом необходимой скорости нагрева для обеспечения запланированного объёма производства. Индукторы должны быть секционированы и между ними должны располагаться поддерживающие приводные ролики. Применяется двухчастотный нагрев: сначала рельс нагревают с частотой тока 2,4 кГц, затем подошву и шейку догревают с частотой тока 10 кГц при поддержании температуры головки на заданном уровне. Данная схема эффективна с точки зрения дальнейшего расхода энергии и позволяет сократить длину индуктора.

Таблица 4. Сравнительный анализ способов нагрева заготовок под прокатку
Table 4. Comparative analysis of methods for heating blanks for rolling

Особенность нагрева	Тип нагрева			
	Газовый	В печах сопротивления	Электро-контактный	Индукционный
Поточность	+	-	-	+
Обезуглероживание	-	-	+	+
Нагрев сложной формы сечения	-	-	-	+
Окалинообразование	-	-	+	+
Инфраструктура	-	+	+	+
Экологичность	-	+	+	+
Общий балл комплексной оценки	1	2	4	6

Особенности индукционного нагрева перед прокаткой рельса:

- нагрев всех типоразмеров рельсов на частоте 2,4 кГц с догревом шеек и подошв на частоте 10 кГц. Применять две линии по 5 модулей 500 кВт, 2,4 кГц и три модуля 250 кВт, частота 10 кГц в выходной части. Длина нагревательной части 12 м;

- нагрев квадратной заготовки: в линии устанавливаются 6 модулей 500 кВт, частота 1 кГц с общей системой автоматического управления и защиты. Длина нагревательной части 8 м.

Индукционный нагрев перед прокаткой шаров ведётся на рабочей частоте 4 кГц при мощности 2000 кВт (4 блока по 500 кВт).

Далее рассмотрим технологию прокатки (перекатки) рельсов. Сегодня в мировой практике применяются несколько способов перекатки рельсов в заготовку, которую используют для последующего производства сортовой продукции. После патентного поиска и литературного обзора обнаружены три способа: перекатка с наплавкой, перекатка цельного рельса и перекатка в универсальных калибрах. Достаточно сложно реализовать данные способы без разделения рельса.

В большинстве случаев заводы используют метод прокатки с разделением на две или три части. Данные технологии запатентованы: патенты РФ RU 2541211C2 и RU 2491139. Решение патента RU2541211C2 – разделение рельса на три части: шейку, головку и подошву. Наиболее перспективным, с точки зрения реализации в рассматриваемых условиях, представляется решение патента RU 2491139 – перекатка рельсов с предварительным поперечным разделением на две части по шейке (рис. 1). Изученные охранные документы рекомендуют: нагрев до температуры в диапазоне значений 1000–1200°C, соблюдение минимальных вытяжек для устранения усталостных явлений и полного восстановления исходных свойств стали [14, 15].

Разделение рельса на две части является более простой операцией, которая также может быть выполнена и будет выполняться в прокатных клетях. Вместе с этим в технологии предусмотрено, что получаемое сечение требует дополнительных проходов для целенаправленного изменения формы.

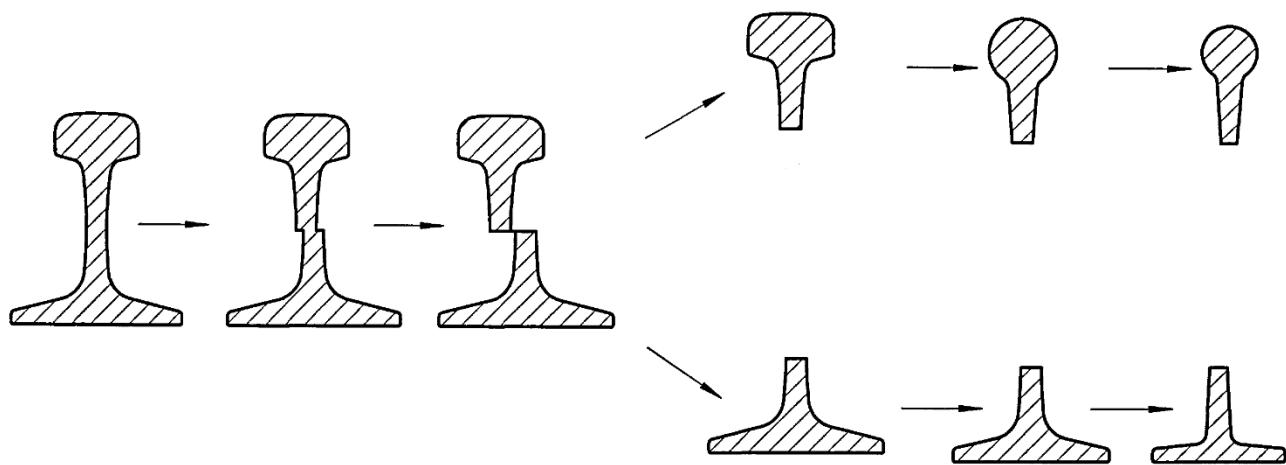


Рис. 1. Перекатка рельсов согласно патенту RU 2491139
Fig. 1. Rerolling rails according to patent RU 2491139

При разработке технологии учитывались габаритные размеры предварительно выбранной промышленной площадки (10 тыс. м²), особенности её инфраструктуры (рис. 2), которая рассматривалась как основа для размещения требуемого технологического оборудования, и наличие, а также расположение основных энергоснабителей.

Рассматривались три варианта реализации технологии прокатки: первый вариант – непрерывные станы 700/500 и 300 при разделении рельса на две части, второй вариант – непрерыв-

ный стан 300 при разделении рельса на три части, третий вариант – реверсивный стан с клетью трио 500 и линейный стан 300 (500/300) при разделении рельса на две части.

Относительно обозначенных условий обеспечения технологических возможностей (прокатки продукции из квадратной заготовки со стороной квадрата до 100 мм и длиной от 3 до 6 м, перспективной разработки калибровки валков для производства углового проката со стороной до 40 мм) был выбран третий вариант, принципиальная схема которого представлена на рис. 3.

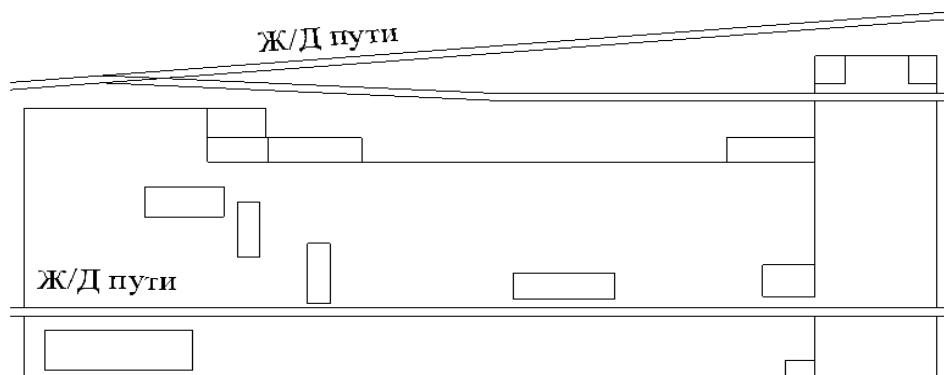


Рис. 2. Схема промышленной площадки под строительство завода
Fig. 2. Layout of the industrial site for the construction of the plant

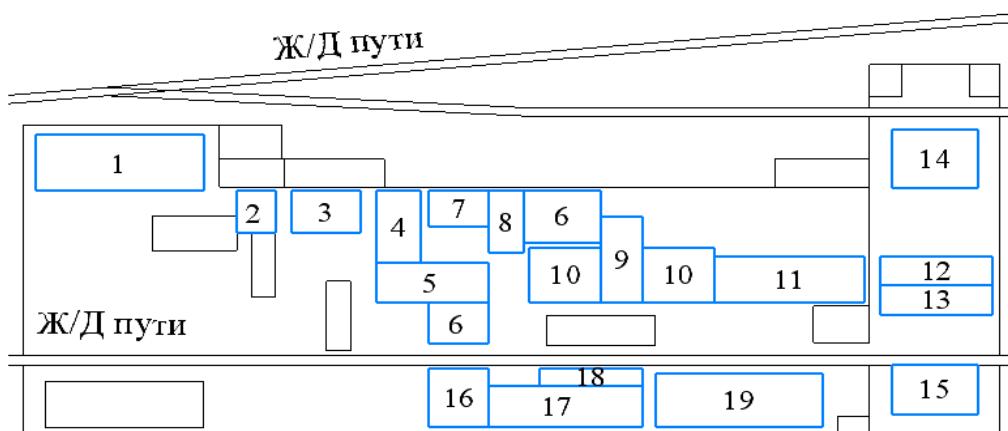


Рис. 3. Схема производства: 1 – участок правки и зачистки рельсов; 2 – загрузочный стол; 3 – индукторы; 4 – шлеппер; 5 – передаточный рольганг; 6 – передаточный шлеппер; 7 – подъёмно-качающийся стол; 8 – линия стана трио; 9 – линия стана дуо; 10 – петлевое поле; 11 – холодильник; 12 – правильная машина и ножницы холодной резки; 13 – карман; 14 – склад готового проката; 15 – склад шаров; 16 – склад заготовок для шаропрокатного стана; 17 – машинное отделения шаропрокатного стана; 18 – участок резки и правки заготовок; 19 – шаропрокатный стан

Fig. 3. Flow chart: 1 is an area for straightening and stripping rails; 2 is a loading table; 3 are inductors; 4 is a transfer bed; 5 is a transfer roller table; 6 is a transfer bed; 7 is a lifting-oscillating table; 8 is a three-high rolling mill line; 9 is a two-high rolling mill line; 10 is a loop field; 11 is a cooling bed; 12 is a straightening machine and cold cutting shears; 13 is a pocket; 14 is a storage area for finished rolled products; 15 is a warehouse of balls; 16 is a storage area for workpieces for the ball rolling mill; 17 is a machine room of the ball rolling mill; 18 is an area for cutting and straightening billets; 19 is a ball rolling mill

Итоговая цепочка технологических операций:

1. Подготовка рельсов к прокатке: очистка поверхности.
2. Порезка до длины не более 4 м (обрезка концов с отверстиями не производится).
3. Загрузка 4-метровых рельсов на загрузочный стол.
4. Нагрев в индукционной печи до температуры 1200–1250°C при выдаче заготовок с заданной скоростью.
5. Разделение рельса прокатными валками на две части в средней клети линии трио 500 с применением разделяющих калибров (относительно способа из патента RU 2491139).
6. После разделения часть рельса с головкой прокатывается до круглого поперечного сечения диаметром 20–50 мм на третьей клети линии трио 500, режется на мерные длины и отгружается в карман (штанги используются в качестве заготовки для шаропрокатного стана).
7. Часть рельса с подошвой прокатывается в первой клети линии трио 500 и затем в линейном стане 300.
8. Часть круглых заготовок для шаропрокатного стана перекатываются в арматуру с повторным нагревом. Заготовки после охлаждения краем перегружаются на загрузочный стол и прокатываются в линии трио и линейной группе.
9. После прокатки раскат разрезается на лежачих ножницах под длину холодильника, охлаждается, правится и режется на мерные длины.
10. Заготовки в виде круга 20–50 мм далее прокатываются на специализированном шаропрокатном стане (была подобрана технология для ШПС 20-60).

Повторному нагреву и прокатке будет подвергаться около 40–60 тыс. т/год. Требуемая производительность индукционной печи должна составлять 170–190 тыс. т/год. Расчётная производительность шаропрокатного стана составляет от 9500–36000 т/год (в зависимости от прокатываемого профиля от 20 до 60 мм).

Была обозначена необходимость использования в качестве заготовки (кроме обозначенного выше потенциального случая использования привозной квадратной заготовки) отслужившие свой срок железнодорожные рельсы категории Р1-Р3 (старогодные) и Р4 (не пригодные для укладки в железнодорожный путь) типа Р65 (вероятность 90%) и Р50, Р75 (вероятность 10%) длиной 12,5 м, которые подготавливаются к прокатке путем порезки автогеном на заготовки

длиной 4–6 м (с учетом возможности рационального использования участков, имеющих сверления на стенке рельса).

Участок прокатного стана состоит из линии трио и линии дуо.

Линия трио включает три клети трио. Краткая характеристика клетей: максимальное расстояние между осями валков – 530 мм, максимальный диаметр валков – 500 мм, длина бочки валка – 900 мм, обороты валков – 110 об/мин, мощность двигателя – 1500 кВт. Главная линия клетей трио состоит из следующих основных узлов: трех рабочих клетей, шпинделей, шестеренной клети, редуктора, маховика и электродвигателя.

Линейная группа дуо состоит из 7-ми клетей переменное дуо. Краткая характеристика клетей: максимальное расстояние между осями валков – 360 мм, максимальный диаметр валков – 400 мм, длина бочки валка – 500 мм, обороты валков – 200 об/мин, мощность двигателя – 1500 кВт. Заказчику даны рекомендации по выбору поставщика оборудования для прокатных станов (станины трио и дуо) – компания Danieli ввиду того, что итальянские технологические линии, как правило, дешевле немецких аналогов от компании SMS Group (однако необходимо запросить конкретные коммерческие предложения на разработанную технологию у обеих компаний).

Для реализации технологии: разработаны технологические режимы (в том числе и калибровка прокатных валков) для референтного сортамента (арматурная сталь номинальным диаметром 10–32 мм, заготовка для шара мелющего диаметром 20–60, шар мелющий диаметром 20–60 мм); рассчитана производительность (объем производства 80–130 тыс. т в год при нормативном фонде рабочего времени 7200 часов в год); описаны типовые пункты системы автоматизации и метрологического обеспечения и экологическая оценка технологии и оборудования.

Заключение

Технологии мини- заводов на сегодня продолжают развиваться и адаптироваться под потребности и возможности локальных рынков. Пример мини-завода, приведенный в статье, характеризуется потреблением вторичного металлургического сырья, минимальными отходами и, поскольку электричество поступает с ГЭС, экологичностью.

Список литературы

1. Danieli group. Danieli Innovaction meeting. Strategies for managing successfully during “new normal”// DaNews: электрон. науч. журн. 2018. №177. URL: <https://www.danieli.com/en/news/da-news.htm#> (дата обращения: 20.02.2022).
2. Danieli group. Danieli undisputed leadership in minimill technology// DaNews: электрон. науч. журн. 2016. №173. URL: <https://www.danieli.com/en/news/da-news.htm#> (дата обращения: 24.02.2022).
3. Гусев В.Е., Потапова М.В., Потапов М.Г. Анализ работы и перспективы развития metallургических мини- заводов Российской Федерации // Технологии metallургии, машиностроения и материалаообработки. 2017. №16. С. 21–28.
4. Металлургические мини- заводы: монография / Смирнов А.Н., Сафонов В.М., Дорохова Л.В., Цуприн А.Ю. Донецк: Норд-пресс, 2005. 469 с.
5. Рожков Г.К., Левандовский С.А. Развитие концепции мини- заводов для производства стального проката // Калибровочное бюро. 2018. № 12. С. 5–9.
6. Куберский С. В. Реализация стратегии создания микро- и мини- заводов в условиях metallургического комплекса России // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. 2020. № 18(61). С. 61–70.
7. Семенцул Р. В. Создание мини- заводов для производства сортового проката // Литье и metallургия. 2013. № 3S(72). С. 46–49.
8. Пат. 2096174 Российской Федерации, МПК B29B 17/00 B29D 23/00. Мини- завод по производству труб из отслуживших свой срок автопокрышек / Д.С. Тукнов; заявитель и патентообладатель Д.С. Тукнов. № 96105469/25; заявл. 22.03.1996; опубл. 20.11.1997.
9. Разработка современной ресурсосберегающей технологии производства арматурного проката и мелящих шаров / Г.К. Рожков, С.А. Левандовский, С.Ю. Саранча, А.Б. Моллер, Д.И. Кинзин, О.Н. Тулупов // Моделирование и развитие процессов ОМД. 2019. № 3 (30). С. 18–22.
10. Бахтинов Ю.Б. О целесообразности перекатки изношенных рельсов в сортовые профили // Производство проката. 2000. №7. С. 2–4.
11. Совершенствование режимов прокатки рельсовых профилей специального назначения при их производстве на универсальном рельсобалочном стане / А.А. Уманский, В. В. Дорофеев, А.В. Головатенко, А.В. Добрянский // Черные металлы. 2018. № 10. С. 38–42.
12. Разработка энергоэффективной технологии прокатки длинномерных железнодорожных рельсов на универсальном рельсобалочном стане АО «ЕВРАЗ ЗСМК» / А.В. Головатенко, В.В. Дорофеев, А.В. Добрянский, Д.Э. Первушин// Черные металлы. 2019. № 6. С. 29–34.
13. Рожков Г. К., Левандовский С.А. Особенности нагрева старогодных рельсов для производства сортового проката // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2017. Т.1. С. 93–96.
14. Пат. 2541211 Российской Федерации, МПК B21B1/08. Способ изготовления сортового металло-проката из фрагментов рельс / А.М. Матлашов; заявитель и патентообладатель А.М. Матлашов. № 2012142473/02; заявл. 04.10.2012; опубл. 10.02.2015.
15. Пат. 2491139 Российской Федерации, МПК B21B1/08. Способ производства фасонного проката / И.З. Вольшонок, А.И. Трайно, Д.М. Иванов, А.Д. Русаков, М.П. Рыжик; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС"». №2012109999/02; заявл. 15.03.2012; опубл. 27.08.2013.

References

1. DANIELI GROUP. Danieli Innovaction meeting. Strategies for managing successfully during “New Normal”. DaNews: electronic scientific journal. 2018, no. 177. Available at: <https://www.danieli.com/en/news/da-news.htm#> (Accessed on February 20, 2022).
2. DANIELI GROUP. Danieli undisputed leadership in minimill technology. DaNews: electronic scientific journal. 2016, no. 173. Available at: <https://www.danieli.com/en/news/da-news.htm#> (Accessed on February 24, 2022).
3. Gusev V.E., Potapova M.V., Potapov M.G. Analysis of performance and possibilities for the development of metallurgical mini-plants in the Russian Federation. *Tekhnologii metallurgii, mashinostroeniya i materialoobrabotki* [Technologies of Metallurgy, Mechanical Engineering and Material Processing], 2017, no. 16, pp. 21–28. (In Russ.)
4. Smirnov A.N., Safonov V.M., Dorokhova L.V., Tsuprin A.Yu. Metallurgicheckie mini-zavody: monografiya [Metallurgical mini-plants: monograph]. Donetsk: Nord-press, 2005, 469 p. (In Russ.)
5. Rozhkov G.K., Levandovskiy S.A. Developing a concept of the mini-plants for the production of steel rolled products. *Kalibrovochnoe byuro* [Calibration Bureau], 2018, no. 12, pp. 5–9. (In Russ.)
6. Kuberskiy S.V. Implementation of the strategy for designing micro- and mini-plants in the conditions of the metallurgical complex of Russia. *Sbornik nauchnykh trudov Donbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Collection of Research Papers of Donbass State Technical University], 2020, no. 18(61), pp. 61–70. (In Russ.)
7. Sementsul R.V. Designing mini-plants for manufacturing long products. *Litie i metallurgia* [Foundry and Metallurgy], 2013, no. 3S(72), pp. 46–49. (In Russ.)
8. Tuknov D.S. *Mini-zavod po proisvodstvu trub iz otsluzhivshikh svoy srok avtopokryshek* [A mini-plant for manufacturing pipes from tires with an expired service life]. Patent RU, no. 2096174, 1997.

9. Rozhkov G.K., Levandovskiy S.A., Sarancha S.Yu., Moller A.B., Kinzin D.I., Tulupov O.N. Development of a modern resource-saving technology for the production of reinforcing steel and grinding balls. *Modelirovaniye i razvitiye protsessov OMD* [Modeling and Developing Metal Forming Processes], 2019, no. 3(30), pp. 18–22. (In Russ.)
10. Bakhtinov Yu.B. Feasibility of rerolling used rails into section bars. *Proizvodstvo prokata* [Rolled Products Manufacturing], 2000, no. 7, pp. 2–4. (In Russ.)
11. Umanskiy A.A., Dorofeev V.V., Golovatenko A.V., Dobryanskiy A.V. Improving rolling schedules for special purpose rail bars, when producing them on a universal rail and structural steel mill. *Chernye metally* [Ferrous Metals], 2018, no. 10, pp. 38–42. (In Russ.)
12. Golovatenko A.V., Dorofeev V.V., Dobryanskiy A.V., Pervushin D.E. Developing the energy efficient rolling technology for long railway rails on the universal rail and structural steel mill at JSC EVRAZ ZSMK. *Chernye metally* [Ferrous Metals], 2019, no. 6, pp. 29–34. (In Russ.)
13. Rozhkov G.K., Levandovskiy S.A. Features of heating used rails for the production of long products. *Aktualnye problemy sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya* [Current Problems of Modern Science, Equipment and Education], 2017, vol. 1, pp. 93–96. (In Russ.)
14. Matlashov A.M. *Sposob izgotovleniya sortovogo metalloprokata iz fragmentov rels* [A method of manufacturing section bars from parts of rails]. Patent RU, no. 2541211, 2015.
15. Volshonok I.Z., Traino A.I., Ivanov D.M., Rusakov A.D., Ryzhik M.P. *Sposob proizvodstva fasonnogo prokata* [A method of producing structural shapes]. Patent RU, no. 2491139, 2013.

Поступила 14.04.2022; принята к публикации 11.05.2022; опубликована 28.06.2022
Submitted 14/04/2022; revised 11/05/2022; published 28/06/2022

Ишметьев Матвей Евгеньевич – магистрант, кафедра технологий обработки материалов, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: matvey280798@gmail.com

Назаров Дмитрий Алексеевич – аспирант, кафедра технологий обработки материалов, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: seo@kolibri-group.ru

Левандовский Сергей Анатольевич – доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры технологий обработки материалов, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: levandovskiy@mail.ru. ORCID 0000-0002-8650-2241

Моллер Александр Борисович – профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой технологий обработки материалов, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: amoller@mail.ru. ORCID 0000-0001-9090-2080

Тулупов Олег Николаевич – профессор, доктор технических наук, профессор кафедры технологий обработки материалов, проректор по научной и инновационной работе, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: o.tulupov@mail.ru

Matvey E. Ishmetev – master's degree student, Materials Processing Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: matvey280798@gmail.com

Dmitry A. Nazarov – postgraduate student, Materials Processing Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: seo@kolibri-group.ru

Sergey A. Levandovskiy – PhD (Eng.), Associate Professor, Materials Processing Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: levandovskiy@mail.ru. ORCID 0000-0002-8650-2241

Aleksandr B. Moller – DrSc (Eng.), Professor, Head of the Materials Processing Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: amoller@mail.ru. ORCID 0000-0001-9090-2080

Oleg N. Tulupov – DrSc (Eng.), Professor, Materials Processing Department, Vice Rector for Research and Innovation, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: o.tulupov@mail.ru

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.762. (035.5)
DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-2-62-72



ВЛИЯНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ УПРУГОДИССИПАТИВНОЙ ПОДЛОЖКИ НА УДАРНО-АБРАЗИВНУЮ ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ГОРЯЧЕШТАМПОВАННЫХ ПОРОШКОВЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

Сиротин П.В.¹, Гасанов Б.Г.¹, Исмаилов М.А.¹, Дробязко Н.А.²

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

²Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Актуальность исследований. Обусловлена необходимостью разработки новых износостойких конструкционных материалов, в том числе методами порошковой металлургии, устойчивых к ударно-абразивному изнашиванию и технологии изготовления деталей для буровых насосов. **Используемые методы.** Для аналитического описания реологии механической модели испытания конструкционных материалов на ударно-абразивную износостойкость использовали закон сохранения энергии или баланса работы и принцип суперпозиции на основе оценки суммарной деформации. Ударно-абразивную износостойкость оценивали на специально разработанной установке при непрерывной подаче порошкообразного электрокорунда. Для экспериментального определения напряженно-деформированного состояния упругодиссипативную подложку осаждали при нагрузке 300 Н на стенде, разработанном для статических испытаний многослойных материалов. Для изучения напряженно-деформированного состояния цилиндрических образцов с упругодиссипативной подложкой использовали также программный комплекс ANSYS Mechanical. Микрорентгеноспектральный анализ проводили в ЦКП ЮРГПУ(НПИ) на растровом электронном микроскопе Quanta 200 разрешающей способностью 5 нм, с рентгеновским микроанализатором EDAX GENESIS, оснащенным ЭВМ и соответствующим программным обеспечением. **Результаты и научная значимость.** Установлено, что при ударно-абразивном испытании конструкционной стали П40Х, полученной горячей штамповкой пористых спеченных заготовок, с использованием резиновой УДП величина поглощенной энергии зависит не только от физико-механических свойств УДП, но и от ее геометрических параметров. Экспериментально показано, что при одинаковой высоте резиновой УДП с отверстием работа диссипации, соответственно, ударно-абразивная износостойкость испытуемого материала в 1,5–2 раза больше, чем при использовании УДП без отверстия. **Практическая значимость.** Предложен метод определения напряженно-деформированного состояния резиновой упругодиссипативной подложки при испытании конструкционных материалов на ударно-абразивную износостойкость и показано влияние интенсивности напряжений и деформаций на работу диссипации при этом. Выявлен механизм разрушения поверхности порошковых образцов при ударно-абразивном износе и показано влияние химического состава абразивных частиц на механизм разрушения поверхности порошковых сталей на начальной стадии испытания и в режиме установившегося износа.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, диссипативная подложка, ударно-абразивная износостойкость, горячештампованные порошковые стали.

© Сиротин П.В., Гасанов Б.Г., Исмаилов М.А., Дробязко Н.А., 2022

Для цитирования

Влияние напряженно-деформированного состояния упругодиссипативной подложки на ударно-абразивную износостойкость горячештампованных порошковых конструкционных сталей / Сиротин П.В., Гасанов Б.Г., Исмаилов М.А., Дробязко Н.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №2. С. 62–72. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-2-62-72>



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

INFLUENCE OF THE STRESS-STRAIN STATE OF AN ELASTIC-DISSIPATIVE SUBSTRATE ON IMPACT-ABRASIVE WEAR RESISTANCE OF HOT-STAMPED POWDER STRUCTURAL STEELS

Sirotin P.V.¹, Gasanov B.G.¹, Ismailov M.A.¹, Drobyazko N.A.²

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

²Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). Due to the need to develop new wear-resistant structural materials, including by methods of powder metallurgy, resistant to impact and abrasive wear, and manufacturing technology for parts of drilling pumps. **Methods Applied.** To prepare an analytical description of rheology of the mechanical model of testing structural materials for impact and abrasive wear resistance, the authors used the law of conservation of energy or work balance and the principle of superposition based on the assessment of total deformation. Impact and abrasive wear resistance was evaluated on a specially designed installation with continuous supply of powdered electrocorundum. To determine the experimental stress-strain state, an elastic-dissipative substrate was deposited at a load of 300 N on a stand designed for static testing of multilayer materials. The ANSYS Mechanical software suite was also used to study the stress-strain state of the cylindrical samples with the elastic-dissipative substrate. An X-ray microanalysis was carried out in the Resource Sharing Center of South-Russian State Polytechnic University (NPI), applying a Quanta 200 scanning electron microscope with a resolution of 5 nm with an EDAX GENESIS X-ray microanalyzer equipped with a computer and appropriate software. **Results and scientific importance.** It is established that during impact-abrasive testing of structural steel P40Kh produced by hot stamping of porous sintered blanks, using a rubber elastic-dissipative substrate, the amount of absorbed energy depends not only on the physical and mechanical properties of the elastic-dissipative substrate, but also on its geometric parameters. It has been experimentally shown that at the same height of the rubber elastic-dissipative substrate with a hole, the dissipation behaviour, and, respectively, impact-abrasive wear resistance of the tested material is 1.5–2 times greater than when using the elastic-dissipative substrate without a hole.

Practical Relevance. The paper proposes a method for determining the stress-strain state of the rubber elastic-dissipative substrate, when testing structural materials for impact and abrasive wear resistance, and shows the effect of intensity of stresses and deformations on dissipation. The mechanism of destruction of the powder sample surface during impact-abrasive wear is revealed. The paper shows the influence of a chemical composition of abrasive particles on the destruction mechanism of the surface of powder steels at the initial stage of testing and in the steady-state wear mode.

Keywords: stress-strain state, dissipative substrate, impact-abrasive wear resistance, hot-stamped powder steel.

For citation

Sirotin P.V., Gasanov B.G., Ismailov M.A., Drobyazko N.A. Influence of the Stress-Strain State of an Elastic-Dissipative Substrate on Impact-Abrasive Wear Resistance of Hot-Stamped Powder Structural Steels. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 2, pp. 62–72. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-2-62-72>

Введение

Одно из важных направлений повышения эксплуатационной надежности оборудования нефтегазовой промышленности является разработка новых материалов и технологий получения из них деталей различной конфигурации [1]. Это особо относится к деталям и агрегатам буровых насосов. Выявлено, что в процессе эксплуатации буровых насосов наименее надежны детали гидравлического блока, которые подвержены ударно-абразивному изнашиванию [2]. Поэтому при выборе материалов для их изготовления необходимо учитывать условия работы и

конструктивные особенности узлов насоса [3, 4].

Известно, что интенсивность ударно-абразивного изнашивания связана с химическим составом, структурой испытуемых материалов и энергетическими и кинематическими параметрами ударного воздействия [2, 5–7]. Экспериментально обосновано, что применение упругодиссипативных подложек (УДП) в конструкциях многих изделий позволяет увеличить стойкость компактных и порошковых сталей к ударно-абразивному изнашиванию за счет поглощения и рассеивания части энергии удара. Величина поглощенной энергии при этом зависит не только от физико-механических свойств материала УДП, но и от ее геометриче-

ских параметров. В частности, экспериментально показано, что при наличии отверстий в подложке ударно-абразивный износ испытуемого материала существенно снижается [7].

Целью данной работы является повышение износостойкости порошковых конструкционных сталей для клапанов буровых насосов на основе оценки влияния напряженно-деформированного состояния УДП на диссипацию энергии удара и механизм их ударно-абразивного изнашивания.

Теория, материалы и методы исследования

Для аналитического описания реологии механической модели испытания конструкционных материалов на ударно-абразивную износостойкость, показанной на **рис. 1**, можно использовать закон сохранения энергии или баланса работы и принцип суперпозиции на основе оценки суммарной деформации. Суммарная работа $A_{уд}$, совершаемая бойком 1, затрачивается на пластическую деформацию порошкового материала вдавливанием абразивных частиц A_p , упругую деформацию $A_{упр}$ испытуемого образца 2 с оправкой 3 и упругую деформацию диссипативной подложки 4 $A_{дис}$:

$$A_{уд} = A_p + A_{упр} + A_{дис}. \quad (1)$$

Если известны компоненты тензоров напряжений и деформаций, то работа пластической деформации материала частиц и упругой деформации порошкового образца можно определить по следующим выражениям [7]:

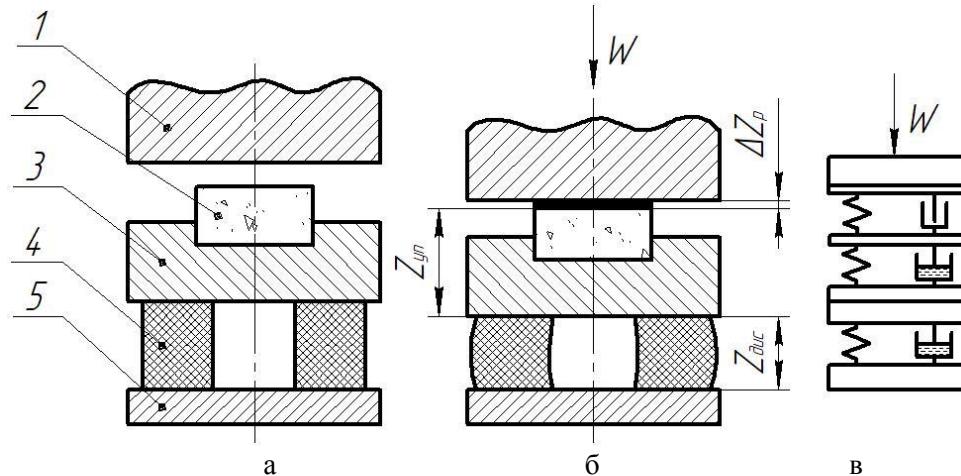


Рис. 1. Механические (а, б) и реологическая (в) модели испытания на ударно-абразивный износ порошковых материалов на УДП: 1 – боек (контртело); 2 – образец из испытуемого материала; 3 – оправка; 4 – упругодиссипативная подложка; 5 – опорная плита

Fig. 1. Mechanical (a, b) and rheological (v) models of testing for impact-abrasive wear of powder materials on the elastic-dissipative substrate: 1 is a striker (counterbody); 2 is a sample from the tested material; 3 is a mandrel; 4 is an elastic-dissipative substrate; 5 is a base plate

$$A_p = \frac{1}{2} \sigma_{ijp} \cdot \varepsilon_{ijp}; \quad A_{упр} = \frac{1}{2} \sigma_{ijупр} \cdot \varepsilon_{ijупр}. \quad (2)$$

При больших деформациях для расчета главных напряжений при известных главных деформациях используем следующую систему уравнений [8]:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{E}{3} (\varepsilon - \varepsilon_3^2); \quad \sigma_2 - \sigma_3 = \frac{E}{3} (\varepsilon_2^2 - \varepsilon_3^2), \quad (3)$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения; $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ – главные деформации; E – модуль упругости резины УДП.

Из выражений (2) и (3) следует, что для определения диссипативной работы в данной модели нужно найти компоненты тензоров деформаций и напряжений материальных точек (представительных элементов) подложки и вычислить по ним значения главных деформаций и напряжений.

Согласно схеме (**рис. 1, б**) суммарная (максимальная) деформация рассматриваемой системы

$$\sum \Delta Z = \Delta Z_{пл} + \Delta Z_{упр} + \Delta Z_{дис}, \quad (4)$$

где $\Delta Z_{пл}$ – абсолютная пластическая деформация в зоне контакта порошкового материала; $\Delta Z_{упр}$ – упругая деформация испытуемого образца и оправки; $\Delta Z_{дис}$ – упруговязкая деформация диссипативной подложки в момент t .

Величина $\Delta Z_{\text{пл}}$ принимается равной высоте неровностей или определяется экспериментально по линейному износу испытуемого порошкового материала. Значения $\Delta Z_{\text{упр}}$ испытуемых образцов с оправкой можно рассчитать, если известно напряженное состояние по следующей формуле [9]:

$$\sigma_{ij} = 3\lambda\epsilon_{\text{cp}}\delta_{ij} + 2\mu_{ij}, \quad (5)$$

где λ и μ – упругие константы Ляме; ϵ_{cp} – средняя упругая деформация пористого тела; δ_{ij} – символ Кронекера.

Среднюю деформацию ϵ_{cp} деформируемого тела определяют по формуле

$$\epsilon_{\text{cp}} = \frac{1}{3}(\lambda_{11} + \lambda_{22} + \lambda_{33}) = \frac{1}{3}(\epsilon_{11} + \epsilon_{22} + \epsilon_{33}), \quad (6)$$

где ϵ_{11} , ϵ_{22} , ϵ_{33} – диагональные компоненты тензора деформаций.

Допускаем, что на торце цилиндрической подложки приложена ударная нагрузка, расположенная симметрично ее оси и распределена одинаково во всех меридианских сечениях. Тогда для осесимметричного напряженного и деформационного состояния в цилиндрических координатах, переходя к конечно-разностным методам, компоненты тензора деформации вычисляют по следующим выражениям [9, 10]:

$$\epsilon_{\rho} = \frac{du_{\rho}}{d\rho}; \epsilon_{\theta} = \frac{u_{\rho}}{\rho}; \epsilon_{z} = \frac{du_z}{dz}; \gamma_{\rho z} = \frac{du_z}{d\rho} + \frac{du_{\rho}}{dz}, \quad (7)$$

где du_{ρ} , du_z – приращения радиуса вектора ρ и апликаты z за один удар (максимальные амплитудные приращения).

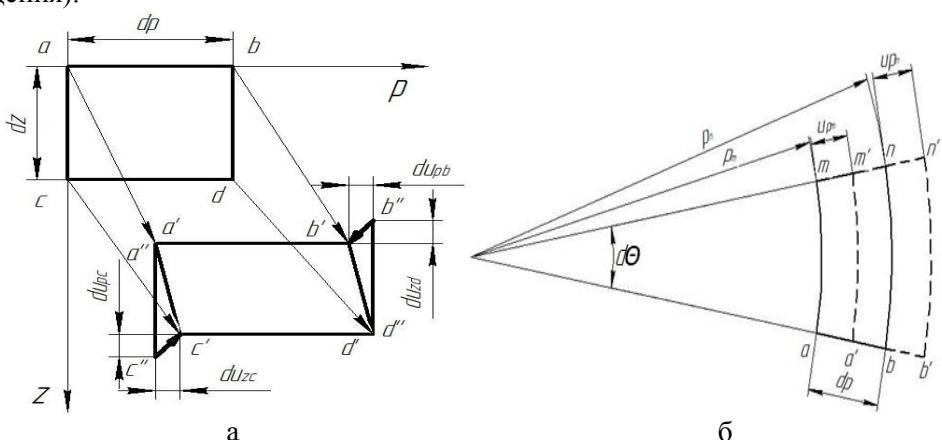


Рис. 2. Проекции представительного элемента УДП в цилиндрических координатах для определения приращений деформаций: а – боковая поверхность элемента; б – поверхность элемента в плоскости, перпендикулярной к оси симметрии

Fig. 2. Projections of a representative element of the elastic-dissipative substrate in cylindrical coordinates to determine the increments of deformations: а is a lateral surface of the element; б is a surface of the element in the plane perpendicular to the axis of symmetry

Приращения du_{ρ} , du_z , радиус вектора ρ и апликаты z экспериментально определяли для каждого конечного элемента графическим способом по схеме, показанной на рис. 2.

Для этого на подложку из резины наносили сетку, как показано на рис. 3, выделяли малый объем (представительный элемент) двумя плоскостями, проходящими через ось симметрии, под углом $d\theta$ между ними, двумя плоскостями, перпендикулярными к этой оси, и двумя цилиндрическими поверхностями с радиусами ρ и $\rho + d\rho$.

Из теории упругости известно, что удельная потенциальная энергия упругой деформации равна половине скалярного произведения тензора напряжений и тензора деформаций. Тогда согласно формуле (2) в главных осях получим

$$A_{\text{дис}} = \frac{1}{2}(\sigma_1\epsilon_1 + \sigma_2\epsilon_2 + \sigma_3\epsilon_3). \quad (8)$$

Для осесимметричного напряженного состояния зависимости между напряжениями и деформациями линейные и имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \epsilon_{\rho} - \epsilon_{\text{cp}} &= \frac{1}{2G}(\sigma_{\rho} - \sigma_{\text{cp}}); \gamma_{\rho\theta} = 0; \\ \epsilon_{\theta} - \epsilon_{\text{cp}} &= \frac{1}{2G}(\sigma_{\theta} - \sigma_{\text{cp}}); \gamma_{\theta\rho} = \frac{1}{G}; \sigma_{\theta\rho} = 0; \\ \epsilon_z - \epsilon_{\text{cp}} &= \frac{1}{2G}(\sigma_z - \sigma_{\text{cp}}); \gamma_{z\rho} = \gamma_{\rho z} = \frac{1}{G}\sigma_{\rho z}, \end{aligned} \quad (9)$$

где $\epsilon_{\text{cp}} = \frac{1}{3}(\epsilon_z + \epsilon_{\rho} + \epsilon_{\theta})$; $\sigma_{\text{cp}} = \frac{1}{3}(\sigma_z + \sigma_{\rho} + \sigma_{\theta})$;

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)}.$$

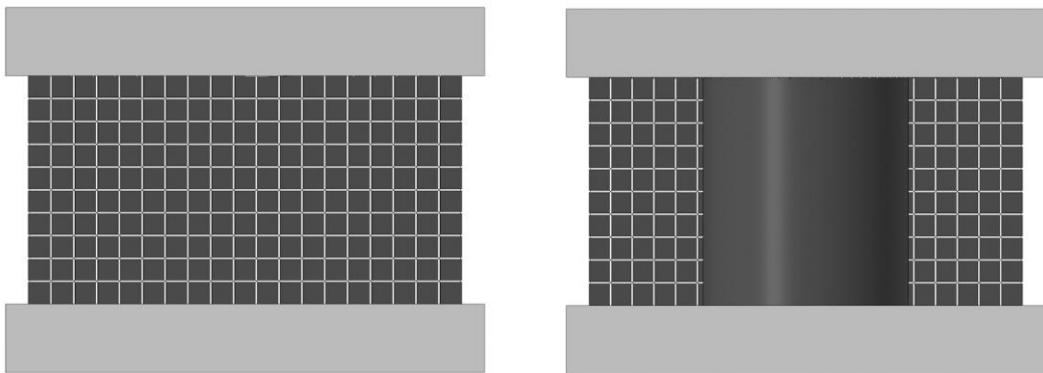


Рис. 3. Схема УДП с нанесенной сеткой на цилиндрической поверхности и сечении
Fig. 3. The scheme of the elastic-dissipative substrate with a grid applied on a cylindrical surface and the cross section

Если допускаем, что $\gamma_{rz} \rightarrow 0$, то есть форма диссипативной подложки не меняется при ударе, то ε_z , ε_θ , ε_ρ являются главными деформациями, а σ_z , σ_θ , σ_ρ – главными напряжениями. Тогда, решая совместно выражения (8) и (9), получаем

$$A_{\text{дис}} = \frac{1+\mu}{6E} \left[(\sigma_z - \sigma_\rho)^2 + (\sigma_\rho - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 \right]. \quad (10)$$

С учетом бочкообразования при осадке подложки из резины, можно вычислить по формулам (9) сдвиговые напряжения σ_{rz} и деформации γ_{rz} , а диссипативную работу (работу, затраченную на упругую деформацию) определим по следующей формуле:

$$A_{\text{дис}} = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon_i}{\sigma_i} \left[(\sigma_\rho - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_\rho)^2 \right], \quad (11)$$

где ε_i и σ_i – интенсивность деформаций и напряжений.

Для проведения экспериментальных исследований были изготовлены цилиндрические УДП, состоящие из бутилкаучука и металлических шайб из нормализованной стали 45 (см. **рис. 3**). Металлические шайбы и резиновые цилиндрики без и с отверстием склеивали kleem на основе хлоропренового каучука. Горячедеформированные цилиндрические образцы из стали П40Х остаточной пористостью не более 2–4% получали по технологии, приведенной в работе [11]. Ударно-абразивную износостойкость оценивали на специально разработанной установке [12] при непрерывной подаче порошкообразного электрокорунда. Для экспериментального определения напряженно-деформированного состояния каждого элемента из 11-ти выделенных по высоте слоев подложку осаждали при нагрузке 300 Н на стенде, разработанном для статических

испытаний многослойных материалов [13]. Для изучения напряженно-деформированного состояния цилиндрических образцов с упругодиссипативной подложкой использовали также программный комплекс ANSYS Inc., в том числе ANSYS Mechanical [14]. Микрорентгеноспектральный анализ проводили в ЦКП ЮРГПУ(НПИ) на растровом электронном микроскопе Quanta 200 разрешающей способностью 5 нм, с рентгеновским микроанализатором EDAX GENESIS, оснащенным ЭВМ и соответствующим программным обеспечением.

Результаты исследования и их обсуждение

При осадке резиновые подложки с нанесенной координатной сеткой с шагом 1 мм (см. **рис. 3**) принимали бочкообразную форму (**рис. 4**). После осадки замеряли конечную деформацию образца и выделенных слоев в направлении приложенной нагрузки и перпендикулярно ей. Используя схему на **рис. 2**, по формулам (7) и (9) вычисляли компоненты тензора деформаций и напряжений.

В **табл. 1** приведены среднестатистические значения компонента деформаций и напряжений всех элементов каждого слоя, начиная с верхнего (слой 1) до нижнего (слой 11). Степень относительной деформации по высоте 1-го ($\varepsilon_z = 0,155$) и 10-го ($\varepsilon_z = 0,155$) слоев мало отличается, а минимальное значение (0,135) имеет средний (5) слой. Максимальные значения ε_ρ и ε_θ имеют верхний и нижний слои, а минимальные значения получены у средних слоев, тогда как напряжения σ_ρ и σ_θ у слоев 1 и 10 составляют 41,1 и 40,7 кПа, а слоя 5 – 36 и 35,5 кПа, что связано с появлением дополнительных сдвиговых напряжений в зоне контакта плит и образцов.

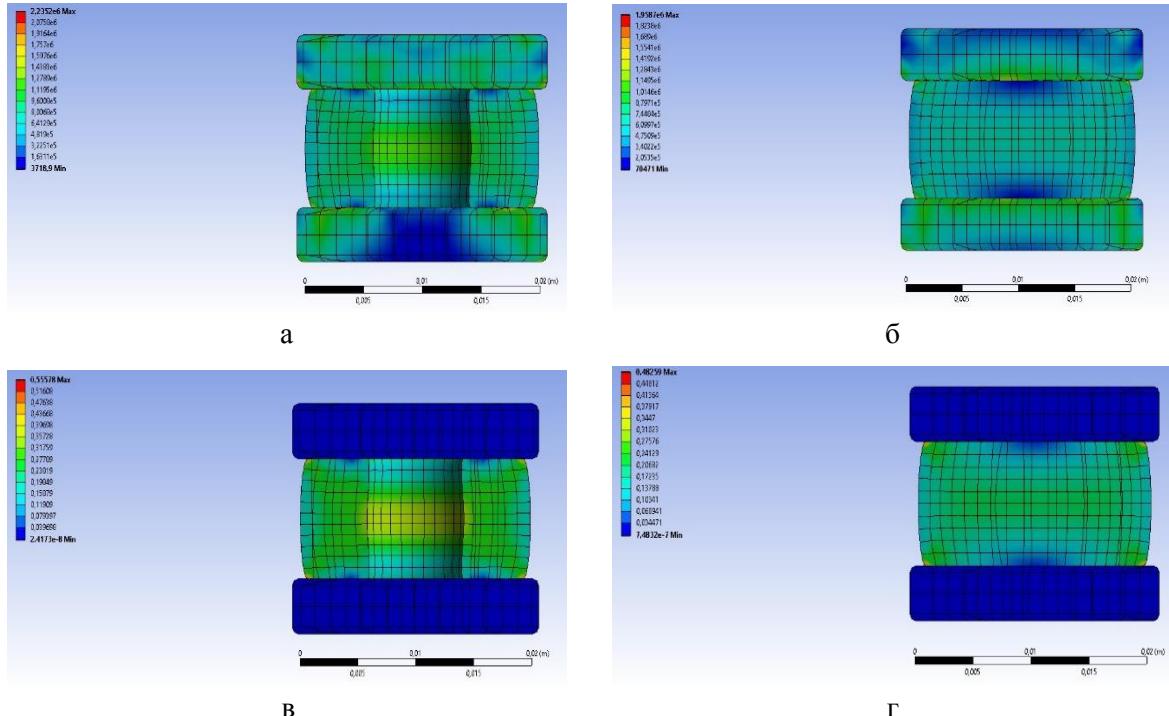


Рис. 4. Эпюры интенсивности напряжения (а, б) и деформации (в, г) при моделировании статической осадки УДП с отверстием (а, в) и без отверстия (б, г) в программном комплексе ANSYS Mechanical
 Fig. 4. Diagrams of stress intensity (a, b) and deformation (v, g), when modeling static precipitation of the elastic-dissipative substrate with a hole (a, v) and without a hole (b, g) in the ANSYS Mechanical software suite

Таблица 1. Поля деформаций и напряжений упругодиссипативной подложки с отверстием после статической осадки под нагрузкой 300 Н

Table 1. Fields of deformations and stresses of the elastic-dissipative substrate with a hole after static precipitation under a load of 300 N

Представительный элемент слоя	ε_p	ε_z	ε_θ	ε_{cp}	γ_{pz}	σ_p , кПа	σ_z , кПа	σ_θ , кПа	σ_{pz} , кПа
1	0,158	0,155	0,156	0,157	0,268	41,1	40,3	40,7	34,8
2	0,153	0,150	0,152	0,152	0,258	39,8	39	39,5	33,5
3	0,148	0,145	0,146	0,147	0,245	38,5	37,7	38,9	31,8
4	0,143	0,140	0,142	0,142	0,235	37,2	36,4	37,1	30,1
5	0,138	0,135	0,136	0,137	0,225	36	35,1	35,5	29,3
6	0,138	0,135	0,136	0,137	0,225	36	35,1	35,5	29,3
7	0,143	0,140	0,142	0,142	0,235	37,2	36,4	37,1	30,1
8	0,148	0,145	0,146	0,147	0,245	38,5	37,7	38,9	31,8
9	0,153	0,150	0,152	0,152	0,258	39,8	39	39,5	33,5
10	0,158	0,155	0,156	0,157	0,268	41,1	40,3	40,7	34,8

На рис. 5, а показано изменение расчетных значений интенсивности напряжений и деформаций в УДП с отверстием при статической осадке.

Максимальные значения интенсивности напряжений σ_i и деформаций ε_i получены для верхнего и нижнего слоев (60,3 кПа и 0,155). Они уменьшаются при приближении к центральным слоям (50,7 кПа и 0,130).

Значения интенсивности напряжений и деформаций были вычислены также по результатам моделирования в программном комплексе ANSYS Mechanical (рис. 5, б).

Сравнивая значения интенсивности напряжений и деформаций, показанные на рис. 5, можно сделать вывод о том, что оба способа могут быть использованы для оценки σ_i и ε_i УДП.

Несколько другие значения напряжений и деформаций получены при испытании в тех же условиях цилиндрических УДП без отверстия (табл. 2). Сопротивление деформации такой подложки заметно выше, чем у подложки с отверстием. Например, средняя величина ε_z верхнего слоя у подложки с отверстием составляет 0,11 (см. табл. 1), у подложки без отверстия $\varepsilon_z = 0,09$ (см. табл. 2). Аналогично значения ε_p , ε_θ и γ_{pz} получены у подложки без отверстия, которые несколько меньше, чем при осадке УДП с отверстием.

На рис. 6 показаны характерные особенности изменения по слоям интенсивности напряжений и деформаций при статической осадке подложки без отверстия. Полученные значения интенсивности напряжений ($\sigma_i = 46,7$ кПа) и деформации

($\varepsilon_i = 0,12$), например, первого слоя, меньше, чем у УДП с отверстием, из-за большего сопротивления слоев при статической осадке.

Значения интенсивности напряжений и деформаций УДП без отверстия, полученные экспериментальным путем (рис. 6, а), сравнивали с результатами моделирования (рис. 6, б). Как следует из полученных результатов, расчетные значения σ_i и ε_i практически не отличаются от результатов, определенных на основе моделирования процесса осадки с использованием программного комплекса ANSYS Inc.

Удельную работу деформации подложки с отверстием и без него вычисляли по формуле (11) для каждого слоя на основе результатов экспериментов, приведенных в табл. 1 и 2 и на рис. 5 и 6.

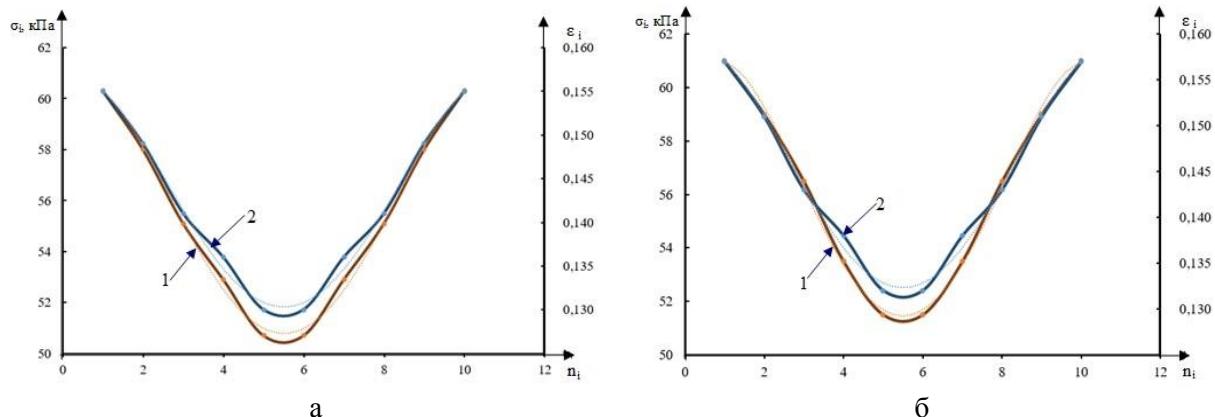


Рис. 5. Интенсивность напряжений (1) и деформаций (2) наружных представительных элементов слоев n_i УДП с отверстием при осадке: а – экспериментальные данные; б – вычисленные данные, используя ANSYS
Fig. 5. The intensity of stresses (1) and deformations (2) of the outer representative elements of the layers (n_i) of the elastic-dissipative substrate with a hole during precipitation: a is experimental data; b is data calculated using ANSYS

Таблица 2. Поля деформаций и напряжений упругодиссипативной подложки без отверстия после осадки под нагрузкой 300 Н

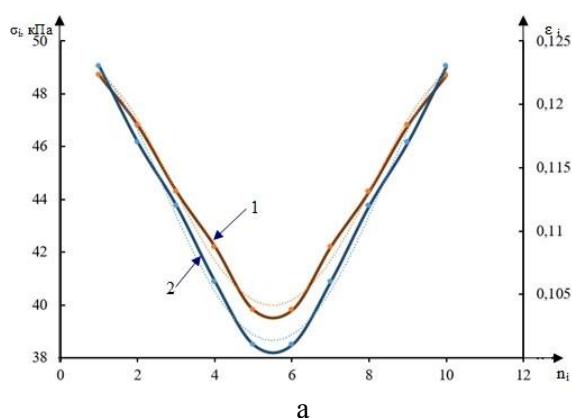
Table 2. Fields of deformations and stresses of the elastic-dissipative substrate without a hole after precipitation under a load of 300 N

Представительный элемент слоя	ε_p	ε_z	ε_θ	ε_{cp}	γ_{pz}	σ_p , кПа	σ_z , кПа	σ_θ , кПа	σ_{pz} , кПа
1	0,112	0,11	0,112	0,111	0,208	29,1	28,6	29,1	27
2	0,107	0,105	0,107	0,106	0,198	27,9	27,3	27,8	25,7
3	0,102	0,1	0,102	0,101	0,188	26,5	26	26,6	24,4
4	0,098	0,095	0,097	0,096	0,178	25,3	24,7	25,2	23,1
5	0,094	0,09	0,092	0,092	0,168	24	23,4	23,9	21,9
6	0,094	0,09	0,092	0,092	0,168	24	23,4	23,9	21,9
7	0,098	0,095	0,097	0,096	0,178	25,3	24,7	25,2	23,1
8	0,102	0,1	0,102	0,101	0,188	26,5	26	26,6	24,4
9	0,107	0,105	0,107	0,106	0,198	27,9	27,3	27,8	25,7
10	0,112	0,11	0,112	0,111	0,208	29,1	28,6	29,1	27

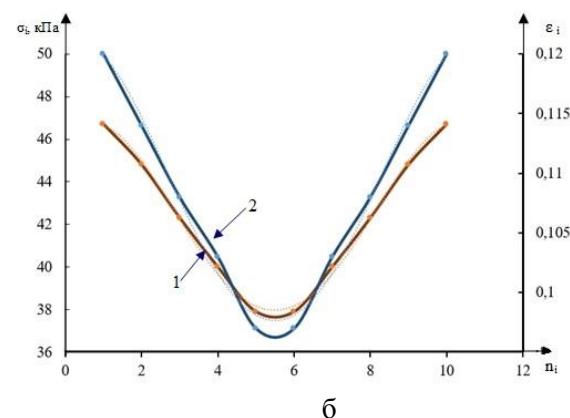
Как следовало ожидать, с увеличением компонент радиальной и угловой деформаций (ε_θ , ε_ρ) каждого слоя возрастает диссипативная работа подложки (рис. 7). При наличии отверстий в УДП эта разница существенная. В частности, $A_{\text{дис}}$ средних слоев УДП с отверстием и без него отличаются в 1,5–2 раза, а верхних и нижних слоев – не более чем на 15–20% (рис. 7, кривые 1 и 2). Это означает, что при наличии отверстия в УДП работа, затраченная на упругопластическую деформацию рабочего слоя испытуемого образца 3 (см. рис. 1), будет также в 1,5–2 раза меньше, чем при

использовании резиновой упругодиссипативной подложки без отверстия, что подтверждают экспериментальные результаты.

На рис. 8 показано влияние характеристик УДП и цикла ударно-абразивных испытаний горячештампованной стали П40Х (без термообработки) на интенсивность износа (потери массы) образцов. Как и следовало ожидать, при использовании УДП с отверстием потери массы при установившемся режиме ударно-абразивного испытания снижаются с 0,04 до 0,008 г по сравнению с результатами испытания без УДП.



а



б

Рис. 6. Интенсивность напряжений (1) и деформаций (2) наружного представительного элемента n_i УДП без отверстия при статической осадке: а – экспериментальные данные; б – данные моделирования в ANSYS
Fig. 6. The intensity of stresses (1) and deformations (2) of the external representative element n_i of the elastic-dissipative substrate without a hole during static precipitation: а is experimental data; б is data modeled in ANSYS

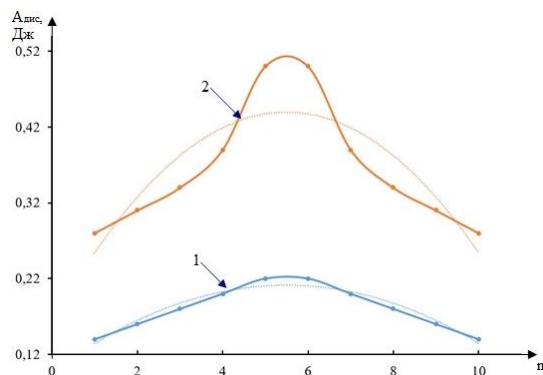


Рис. 7. Зависимость работы деформации УДП каждого слоя УДП: 1 – без отверстия; 2 – с отверстием

Fig. 7. Dependence of the deformation behavior of the elastic-dissipative substrate of every elastic-dissipative substrate layer:
1 is without a hole, 2 is with a hole

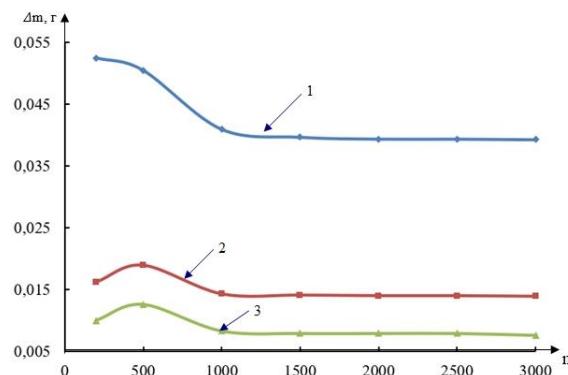


Рис. 8. Влияние характеристик УДП на интенсивность износа горячештампованной стали П40Х:
1 – без УДП; 2 – УДП без отверстия;
3 – УДП с отверстием

Fig. 8. Influence of elastic-dissipative substrate characteristics on the wear rate of hot-stamped steel P40Kh: 1 is without the elastic-dissipative substrate; 2 is the elastic-dissipative substrate without a hole; 3 is the elastic-dissipative substrate with a hole

Было также исследовано влияние химического состава порошков, абразива и особенности разрушения стали П40Х в зоне деформации при ударно-абразивном испытании. На первом этапе износ материала образцов возрастает пропорционально энергии удара в результате внедрения твердых абразивных частиц в частицы порошка и в межчастичные границы (рис. 9, а), трещины при этом появляются и развиваются в большей степени по границам частиц порошка железа. На втором этапе происходит замедление интенсивности износа из-за упрочнения в металле в зоне удара. Кроме этого, с увеличением количества ударов практически вся поверхность зоны деформации испытуемых образцов покрывается вдавленными в материал частицами железа с абразивными включениями (рис. 9, б), соответственно, снижается интенсив-

ность износа поверхности образцов с увеличением времени испытания (см. рис. 8).

Было выявлено, что характер износа зависит также от состава абразивного порошка. В частности, частицы оксидов кремния и алюминия меньше разрушаются при ударе и больше вдавливаются в материал образца (см. рис. 9, а), что активирует процесс разрушения поверхности, а другие примеси (например, карбонаты кальция и магния) сами разрушаются при ударе, их микрочастицы заполняют микропоры и другие кристаллические дефекты частиц и покрывают более равномерно поверхность испытания образцов (см. рис. 9, б). Этим можно объяснить также снижение интенсивности износа образца с увеличением количества ударов на стадии установившегося износа.

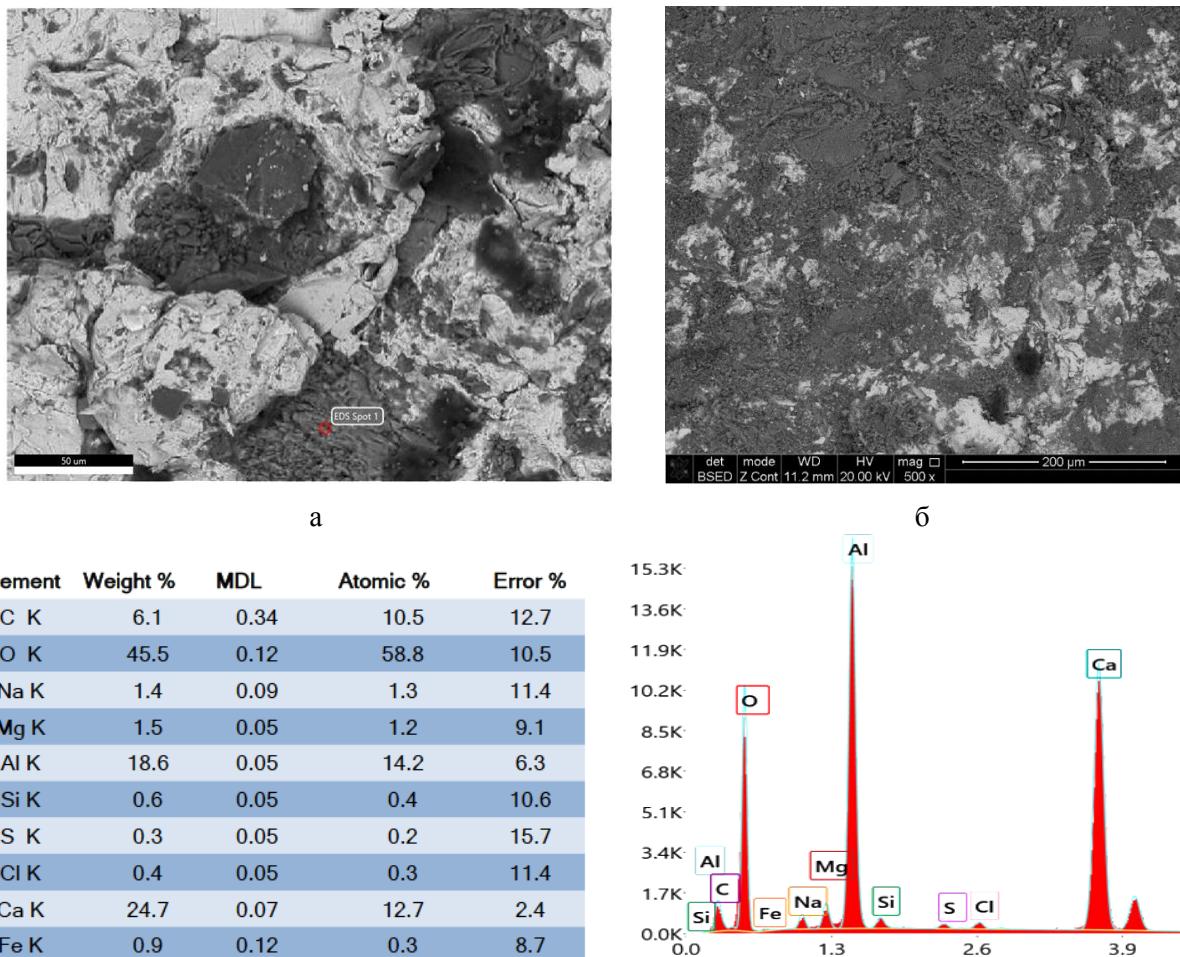


Рис. 9. Микроструктура поверхности стали П40Х на стадии интенсивного износа (а), в установившемся режиме износа (б) и распределение компонентов в абразивных частицах (в, г)
Fig. 9. The surface microstructure of steel P40Kh at the stage of intensive wear (a), in the steady-state wear mode (b) and the distribution of components in abrasive particles (в, г)

Заключение

Разработан метод определения напряженно-деформированного состояния резиновой упругодиссипативной подложки и показано влияние интенсивности напряжений и деформаций на работу диссипации при испытании конструкционных сталей на ударно-абразивную износостойкость.

Установлено, что при ударно-абразивном испытании конструкционной стали П40Х, полученной горячей штамповкой пористых спеченных заготовок, с использованием резиновой УДП величина поглощенной энергии зависит не только от физико-механических свойств УДП, но и от ее геометрических параметров.

Экспериментально показано, что при одинаковой высоте резиновой УДП с отверстием работа диссипации, соответственно, ударно-абразивная износостойкость испытуемого материала в 1,5–2 раза больше, чем при использовании УДП без отверстия.

Показано влияние химического состава абразивных частиц на механизм разрушения поверхности порошковых сталей на начальной стадии испытания и в режиме установившегося износа. Выявлен механизм разрушения поверхности порошковых образцов при ударно-абразивном износе.

Список литературы

1. Трение, изнашивание и смазка: справочник / под ред. И.В. Крагельского, В.В. Алисина. М.: Машиностроение, 1978. Кн.1. 400 с.
2. Виноградов В.Н., Сорокин Г.М. Износостойкость сталей и сплавов: учеб. пособие для вузов. М.: Нефть и газ, 1994. 417 с.
3. Виноградов В.Н., Сорокин Г.М., Колокольников М.Г. Абразивное изнашивание. М.: Машиностроение, 1990. 222 с.
4. Абдукова Р.Я., Багаутдинов Н.Я. Анализ причин отказов клапанов буровых насосов // Эксплуатация нефтяных и газовых месторождений и подготовка нефти. 2012. № 4. С. 66–70.
5. Гасанов Б.Г., Сиротин П.В. Порошковые материалы для деталей, работающих в условиях ударно-абразивного изнашивания // Металлург. 2011. № 3. С. 61–64.
6. Гасанов Б.Г., Бабец А.В., Баев С.С. Влияние химического состава на жаростойкость и ударную износостойкость материалов на основе распыленных порошков высококромистой стали // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т19. №4. С. 45–55. DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-2-79-89

7. Сиротин П.В., Гасанов Б.Г., Исмаилов М.А. Оценка возможности повышения ударно-абразивной износостойкости композиционных материалов за счет оптимизации их упругодиссипативных свойств // Актуальные проблемы порошкового материаловедения: материалы международной научно-технической конференции. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2018. Т. 1. С. 287–295.
8. Гун Г.Я. Теоретические основы обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1980. 456 с.
9. Аркулис Г.Э., Дорогобид В.Г. Теория пластичности. М.: Металлургия, 1987. 352 с.
10. Громов Н.П. Теория обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1978. 360 с.
11. Промышленная технология горячего прессования порошковых изделий / Ю.Г. Дорофеев, Б.Г. Гасанов, В.Ю. Дорофеев, В.Н. Мищенко, В.И. Мирошников. М.: Металлургия, 1990. 206 с.
12. Пат. 2434219 Российская Федерация, МПК G01N 3/56. Установка для испытания на ударно-абразивное и ударно-гидроабразивное изнашивание конструкционных и специальных материалов / Б.Г. Гасанов, П.В. Сиротин, А.Д. Ефимов; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова». №2009146684/28; заявл. 15.12.2009; опубл. 20.06.2011.
13. Пат. 2725530 Российская Федерация, МПК G01N 3/08. Стенд для статических испытаний композиционных многослойных материалов (Варианты) / П.В. Сиротин, М.А. Исмаилов; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова». №2019132563; заявл. 14.10.2019; опубл. 02.07.2020.
14. Бруяка В.А., Фокин В.Г., Кураева Я.В. Инженерный анализ в ANSYS Workbench: учеб. пособие. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2013. 149 с.: ил.

References

1. Kragelsky I.V., Alisin V.V. *Trenie, iznashivanie i smazka: Spravochnik* [Friction, wear and lubrication: Handbook]. Moscow: Mechanical engineering, 1978, book 1, 400 p. (In Russ.)
2. Vinogradov V.N., Sorokin G.M. *Iznosostoykost staley i splavov: ucheb. posobie dlya vuzov* [Wear resistance of steels and alloys: textbook for universities]. Moscow: Oil and Gas, 1994, 417 p. (In Russ.)
3. Vinogradov V.N., Sorokin G.M., Kolokolnikov M.G. *Abrazivnoe iznashivanie* [Abrasive wear]. Moscow: Mechanical engineering, 1990, 222 p. (In Russ.)
4. Abdyukova R.Ya., Bagautdinov N.Ya. Analysis of the causes of drilling pump valve failures. *Ekspluatatsiya neftyanykh i gazovykh mestorozhdeniy i podgotovka nefti*

[Exploitation of oil and gas fields and oil preparation], 2012, no. 4, pp. 66–70. (In Russ.)

5. Gasanov B.G., Sirotin P.V. Powder materials for parts operating under shock-abrasive wear. *Metallurg* [Metallurgist], 2011, no. 3, pp. 61–64. (In Russ.)

6. Gasanov B.G., Babets A.V., Baev S.S. Influence of a chemical composition on heat resistance and impact wear resistance of materials based on sprayed 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. DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-2-79-89

7. Sirotin P.V., Gasanov B.G., Ismailov M.A. Evaluation of the possibility of increasing impact-abrasive wear resistance of composite materials by optimizing their elastic-dissipative properties. *Aktualnye problemy poroshkovogo materialovedeniya: materialy mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii* [Current issues of powder materials science: proceedings of the international scientific and technical conference]. Perm: Publishing house of Perm National Research Polytechnic University], 2018, vol. 1, pp. 287–295. (In Russ.)

8. Gun G.Ya. *Teoreticheskie osnovy obrabotki metallov davleniem* [Theory of metal forming]. Moscow: Metallurgy, 1980, 456 p. (In Russ.)

9. Arkulis G.E., Dorogobid V.G. *Teoriya plastichnosti* [Theory of plasticity]. Moscow: Metallurgy, 1987, 352 p. (In Russ.)

10. Gromov N.P. *Teoriya obrabotki metallov davleniem* [Theory of metal forming]. Moscow: Metallurgy, 1978, 360 p. (In Russ.)

11. Dorofeev Yu.G., Gasanov B.G., Dorofeev V.Yu., Mishchenko V.N., Miroshnikov V.I. *Promyshlennaya tekhnologiya goryachego pressovaniya poroshkovykh izdeliy* [Industrial technology of hot pressing of powder products]. Moscow: Metallurgy, 1990, 206 p. (In Russ.)

12. Gasanov B.G., Sirotin P.V., Efimov A.D. *Ustanovka dlya ispytaniya na udarno-abrazivnoe i udarno-gidroabrazivnoe iznashивание конструкционных и специальных материалов* [Installation for testing for impact-abrasive and impact-hydroabrasive wear of structural and special materials]. Patent RU, no. 2434219, 2011.

13. Sirotin P.V., Ismailov M.A. *Stend dlya staticheskikh ispytaniy kompozitsionnykh mnogosloynykh materialov (Varianty)* [Stand for static testing of composite multi-layer materials (Options)]. Patent RU, no. 2725530, 2020.

14. Bruyaka V.A., Fokin V.G., Kuraeva Ya.V. *Inzhenerny analiz v ANSYS Workbench: ucheb. posobie* [Engineering analysis in ANSYS Workbench: textbook]. Samara: Samara State Technical University, 2013, 149 p. (In Russ.)

Поступила 11.04.2022; принята к публикации 25.04.2022; опубликована 28.06.2022
Submitted 11/04/2022; revised 25/04/2022; published 28/06/2022

Сиротин Павел Владимирович – кандидат технических наук, доцент,
Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова,
Новочеркасск, Россия. Email: spv_61@mail.ru

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

Исмаилов Маркиз Азизович – старший преподаватель,
Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова,
Новочеркасск, Россия. Email: al_myalim@mail.ru. ORCID 0000-0003-1588-7444

Дробязко Никита Александрович – магистр,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия.
Email: nikitoideys@mail.ru

Pavel V. Sirotin – PhD (Eng.), Associate Professor,
Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia.
Email: spv_61@mail.ru

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

Markiz A. Ismailov – Senior Lecturer,
Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia.
Email: al_myalim@mail.ru. ORCID 0000-0003-1588-7444

Nikita A. Drobyazko – master's degree,
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia.
Email: nikitoideys@mail.ru

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.793.3:621.762
DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-2-73-81



ИССЛЕДОВАНИЕ АДГЕЗИИ АНТИФРИКЦИОННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ДВУХСЛОЙНЫХ КОРРОЗИОННО-СТОЙКИХ НИКЕЛЬ-ФОСФОРНЫХ ПОКРЫТИЙ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ MoS₂

Щербаков И.Н.¹, Гасанов Б.Г.²

¹Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия

²Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ), Новочеркасск, Россия

Аннотация. Актуальность работы. Обоснована целесообразность создания двухслойных композиционных антифрикционных модифицированных никель-фосфорных покрытий, полученных методом химического осаждения на образцы из конструкционных улучшаемых сталей. **Используемые методы.** В качестве модификатора выбран дисульфид молибдена, который можно вводить в матрицу покрытия как первого, так и второго слоя. Приведены технологические особенности осаждения никель-фосфорных покрытий, модифицированного MoS₂, на изделия из порошковых сталей П40 и П40Х и предложены схемы возможного распределения модификатора в покрытии. Для испытания адгезии никель-фосфорных покрытий использовали методы, которые применяют для антифрикционных покрытий на изделиях, изготовленных из сталей и сплавов, толщиной не более 3 мм. **Новизна.** Показаны кинетические особенности формирования структуры никель-фосфорных покрытий, модифицированных дисульфидом молибдена, и эффективность нанесения на них химическим осаждением второго слоя на основе фосфата алюминия и хрома. Установлено, что в раствор для химического осаждения необходимо вводить модификатор через 2–3 минуты после начала никелирования с целью повышения адгезии с основой. **Результаты.** Приведены результаты экспериментальных исследований для оценки адгезии никель-фосфорных покрытий, модифицированных MoS₂. Показана эффективность применения предложенного способа нанесения двухслойных композиционных покрытий на изделия из улучшаемых спеченных и горячештампованных порошковых сталей. **Практическая значимость.** На основе результатов экспериментальных исследований предложены технологические варианты получения композиционных покрытий с различным расположением модификатора, позволяющие повысить функциональные свойства конструкционных порошковых сталей, широко применяемых в машиностроении для изготовления деталей различной конфигурации.

Ключевые слова: композиционное покрытие, порошковая сталь, адгезия, модификатор, связующее, никель-фосфор, дисульфид молибдена, коррозионная стойкость, коэффициент трения.

© Щербаков И.Н., Гасанов Б.Г., 2022

Для цитирования

Щербаков И.Н., Гасанов Б.Г. Исследование адгезии антифрикционных композиционных двухслойных коррозионно-стойких никель-фосфорных покрытий, модифицированных MoS₂ // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №2. С. 73–81. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-2-73-81>



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

RESEARCH ON THE ADHESION OF ANTIFRICTION COMPOSITE DOUBLE-LAYER CORROSION-RESISTANT NICKEL-PHOSPHOROUS COATINGS MODIFIED WITH MoS_2

Shcherbakov I.N.¹, Gasanov B.G.²

¹Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

²South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia

Abstract. Relevance. The paper provides the rationale for creating double-layer composite antifriction modified nickel-phosphorus coatings produced by a chemical deposition on the samples from structural, heat-treatable steels. **Methods Applied.** Molybdenum disulfide was chosen as a modifier, which can be introduced into the coating matrix of both the first and second layers. The paper describes technological features of the deposition of MoS_2 -modified nickel-phosphorus coatings on products made of P40 and P40Kh powder steels, and proposes schemes for a possible distribution of the modifier in the coating. To test the adhesion of nickel-phosphorus coatings, the authors used the methods applied for anti-friction coatings on products made of steels and alloys with a thickness of 3 mm or less. **Originality.** The paper shows the kinetic features of shaping the structure of nickel-phosphorus coatings modified with molybdenum disulfide and efficiency of applying a second layer based on aluminum and chromium phosphate onto them by chemical deposition. It has been established that the modifier should be introduced into the solution for chemical deposition 2–3 minutes after the start of nickel plating in order to increase adhesion to the base. **Results.** The experimental studies are presented to evaluate the adhesion of nickel-phosphorus coatings modified with MoS_2 . The paper shows efficiency of the proposed method of applying double-layer composite coatings on products made of heat-treatable sintered and hot-stamped powder steels. **Practical Relevance.** Based on the experimental studies, the authors proposed technological options to produce composite coatings with different positions of the modifier, improving the functional properties of structural powder steels, widely used in mechanical engineering for manufacturing parts of various configurations.

Keywords: composite coating, powder steel, adhesion, modifier, binder, nickel-phosphorus, molybdenum disulfide, corrosion resistance, friction coefficient.

For citation

Shcherbakov I.N., Gasanov B.G. Research on the Adhesion of Antifriction Composite Double-Layer Corrosion-Resistant Nickel-Phosphorous Coatings Modified with MoS_2 . *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 2, pp. 73–81. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-2-73-81>

Введение

Эксплуатационная надежность узлов трения зависит от химического состава и структуры материалов подвижных сопряжений, характеристик используемых смазочных материалов, условий работы машин и многих других факторов [1–3]. Поэтому существует большое количество технологических методов повышения износостойкости сталей, сплавов и композиционных материалов, применяемых для изготовления деталей узлов трения и уплотнения [4–6]. Перспективным направлением развития трибоматериалов является создание композиционных материалов на стальной подложке с никель-фосфорным покрытием (НФП), у которого матрицей является химически восстановленное соединение никеля и фосфора, а в качестве модификаторов применяют твердофазные частицы

различной химической природы [5–8]. Экспериментальные результаты исследования химически восстановленных НФН, проведенные авторами работ [9–15], показали, что большинство получаемых покрытий обладают относительно высоким коэффициентом трения, недостаточной коррозионной стойкостью и сравнительно небольшой адгезией с подложкой.

Несмотря на то, что исследованию технологии нанесения НФП уделяется большое внимание, мало работ посвящено созданию композитов с учетом прогнозируемых структурных состояний матрицы и модификаторов НФП, в том числе и при трении. Недостаточно изучены кинетические особенности фазовых превращений при трении, механизм перестройки структуры поверхностного слоя, модифицированного НФП. Кроме этого для химически восстановленных композиционных НФП необходимо проводить

всесторонние теоретические и практические исследования для оценки их адгезионной прочности при использовании в качестве подложки конструкционных порошковых сталей.

Целью работы является исследование кинетики структурообразования никель-фосфорных покрытий, модифицированных дисульфидом молибдена, при различных способах их нанесения на улучшаемые порошковые стали, широко применяемые для производства деталей машин сложной конфигурации.

Материалы и методы исследований

Поскольку конструкционные и инструментальные стали, полученные методами порошковой металлургии, отличаются относительно низкой стоимостью изготовления из них деталей различной конфигурации и возможностью варьирования химическим составом и физико-механическими свойствами, то для нанесения НФП использовали спеченные и горячештампованные порошковые углеродистые и легированные хромом улучшаемые конструкционные стали П40, П40Х (ГОСТ 28378-89) и из листовой стали 40Х. Пористость спеченных в диссоциированном аммиаке (1120°C, 2 ч) сталей из порошка ПЖРВ 2.200.28 варьировали в пределах 15–20%, а у полученных горячей штамповкой пористых заготовок она не превышала 2–3%.

Технология нанесения композиционного химически восстановленного покрытия включает следующие операции: подготовка поверхности детали к нанесению покрытия; приготовление рабочего раствора; нанесение покрытия на изделие; термическую обработку; контроль качества.

Состав раствора для получения химически осажденных покрытий, г/л: никель хлористый – 20–22, натрий уксусно-кислый – 10–15, гипофосфит натрия – 21–25, тиомочевина – 0,02, дисульфид молибдена – 5–6. Раствор готовили по следующей последовательности. В стеклянную емкость с нагретой до 50°C дистиллированной водой вводили расчетное количество соли никеля, добавок и модификатора. При температуре раствора 80°C добавляли необходимое количество гипофосфита натрия. Покрытие осаждали при температуре 90–92°C в течение 1 ч. В процессе нанесения НФП раствор перемешивали в магнитной мешалке со скоростью 30 об/мин. Толщина покрытия на образцах составляла 20–25 мкм. Термическую обработку (ТО) образцов с НФП проводили в лабораторной печи (SNOL,

производитель АВ UMEGA-GROUP) в интервале 350–450°C в течение одного часа. Первоначальный контроль качества НФП проводили визуально. Покрытия с вздутиями, порами, скоплениями конгломератов и с непокрытыми участками отбраковывались. Толщины НФП измеряли на приборе Константа К6 с преобразователем ИД0/90, погрешность измерения не превышала ± 1 мкм.

Адгезию первого слоя композиционных покрытий оценивали путем выборочных испытаний контрольных образцов в соответствии с ГОСТ 9.302-88. Для этого пластинки с НФП изгибали с помощью плоскогубцев под углом 90° в одну сторону, затем в другую до излома. Для оценки адгезии другую часть образцов с двухслойным покрытием испытывали на растяжение на разрывной машине ТМЭ-10 при скорости нагружения 2 мм/мин. Дополнительно адгезию второго слоя проверяли методом нанесения сетки царапин по ГОСТ 15140 – 78 по трехбалльной системе.

Пористость покрытий определяли согласно ГОСТ 9.302-88 методом погружения образцов в раствор, содержащий 3 г/л $K_3[Fe(CN)_6]$ и 10 г/л NaCl на 5 мин, после чего подсчитывали количество пор, проявляющихся в виде окрашенных точек на поверхности образца. Среднее число пор вычисляли по формуле $N_{cp}=N_{общ}/S$, где $N_{общ}$ – общее число пор на контролируемой поверхности, S – площадь контролируемой поверхности, cm^2 .

Ускоренные коррозионные испытания проводили согласно ГОСТ 9.308-85 в 3%-м растворе NaCl при pH 3 в течение 510 ч. Испытаниям подвергались термообработанные образцы. Коррозионную стойкость оценивали по изменению массы путем взвешивания высушенных и очищенных от продуктов коррозии образцов на аналитических весах «ВЛР-200».

Триботехнические свойства определяли на торцевой машине трения, позволяющей при одновременном вращении со скоростью скольжения 0,048 м/с развивать удельные нагрузки на поверхность исследуемого материала до 300 МПа.

Результаты исследований и их обсуждение

Исследования показали, что во всех способах нанесения покрытия после осаждения имеют аморфную структуру и относительно легко отслаиваются при испытании на изгиб и растяжение. Предполагаемый характер распределения НФП, осажденных на пластинки из стали 40Х, схематично показан на рис. 1. При осаждении

НФП с добавкой в исходный раствор MoS_2 он достаточно равномерно распределяется в покрытии (рис. 1, б), имеет сравнительно низкую адгезионную прочность до термической обработки

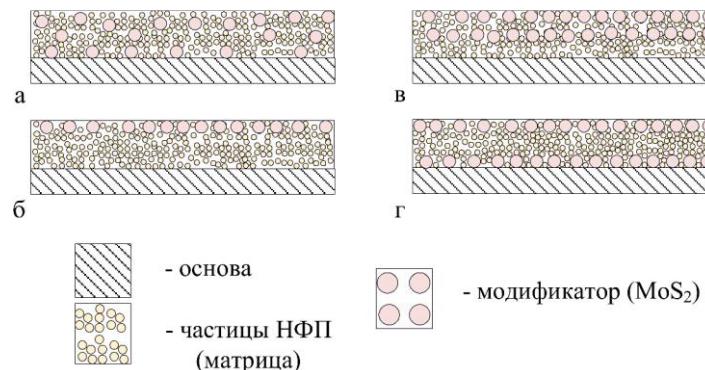


Рис. 1. Схемы формирования НФП + MoS_2 : а – после осаждения в растворе, содержащем MoS_2 ; б – после осаждения в двух растворах – без MoS_2 в течение 55 мин и в дальнейшем с MoS_2 в течение 5 мин; в – то же в течение 5 и 55 мин; г – после осаждения в начале и в конце в растворе с MoS_2 по 5 мин, а в растворе без MoS_2 50 мин

Fig. 1. Formation of Ni-P coatings modified with MoS_2 : a is after deposition in a solution containing MoS_2 ; б is after deposition in two solutions: without MoS_2 for 55 min and further with MoS_2 for 5 min; в is the same for 5 and 55 minutes; г is after deposition at the beginning and at the end in a solution with MoS_2 for 5 min, and in a solution without MoS_2 for 50 min

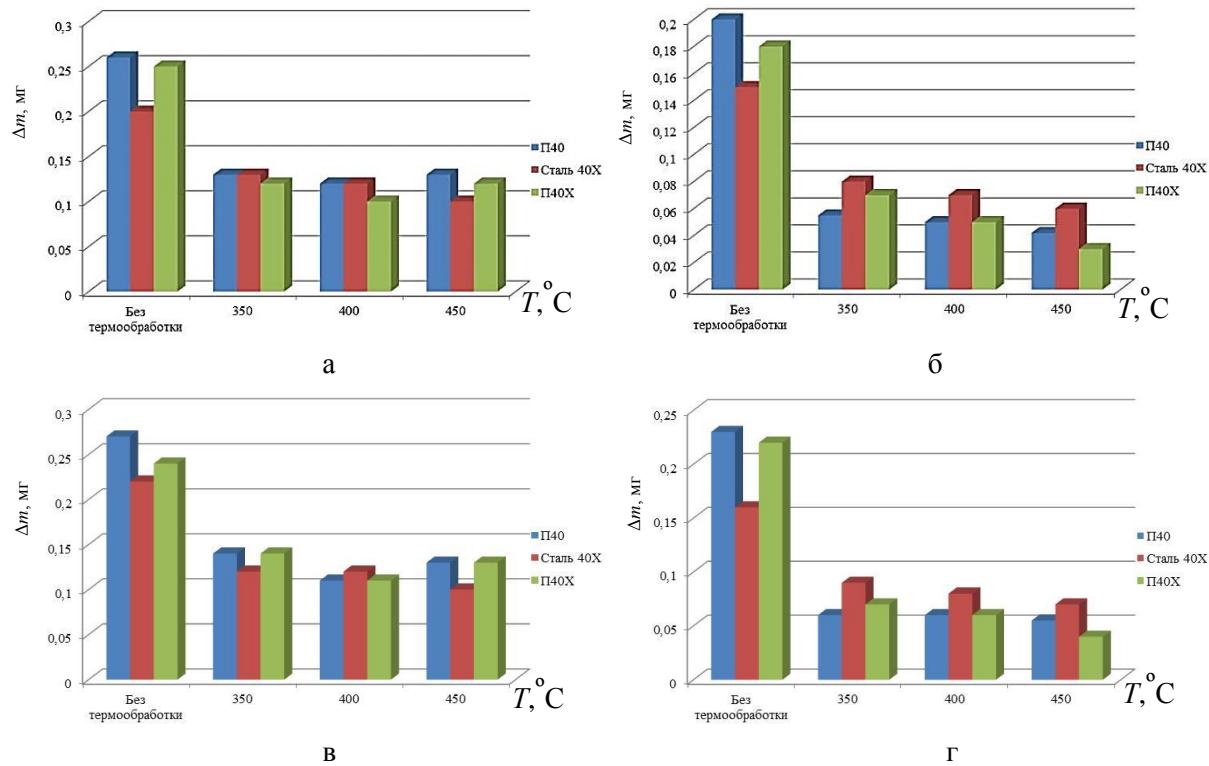


Рис. 2. Изменение массы образцов с НФП+ MoS_2 после испытания на разрывной машине образцов, полученных до и после термообработки: а – после осаждения в растворе, содержащем MoS_2 ; б – после осаждения в двух растворах – без MoS_2 в течение 55 мин и в дальнейшем с MoS_2 в течение 5 мин; в – то же в течение 5 и 55 мин; г – после осаждения в начале и в конце в растворе с MoS_2 по 5 мин, а в растворе без MoS_2 50 мин

Fig. 2. Change in the mass of the samples with Ni-P coatings modified with MoS_2 after tensile testing of the samples produced before heat treatment and after it: a is after deposition in a solution containing MoS_2 ; б is after deposition in two solutions: without MoS_2 for 55 min and further with MoS_2 for 5 min; в is the same for 5 and 55 minutes; г is after deposition at the beginning and at the end in a solution with MoS_2 for 5 min, and in a solution without MoS_2 for 50 min

Таблица 1. Результаты макроскопического анализа НФП до и после термообработки после изгиба образцов на 90°
Table 1. Macroscopic analysis of Ni-P coatings before and after heat treatment after bending the samples at 90°

Вид покрытия	Термообработка	Подложка	Состояние покрытия
НФП+MoS ₂ , (см. рис. 1, а)	Без ТО	П40, П40Х, сталь 40Х	Трешины, следы отслаивания
	400°C		Сетка мелких трещин
НФП+MoS ₂ , (см. рис. 1, б)	Без ТО	П40, П40Х, сталь 40Х	Отслаивание
	400°C		Не растрескивается
НФП+MoS ₂ , (см. рис. 1, в)	Без ТО	П40, П40Х, сталь 40Х	Следы отслаивания
	400°C		Макротрещины не обнаружены
НФП+MoS ₂ , (см. рис. 1, г)	Без ТО	П40, П40Х, сталь 40Х	Трешины, следы отслаивания
	400°C		Сетка мелких трещин

При осаждении MoS₂ на поверхность первоначально нанесенного слоя НФП, как это показано схематично на **рис. 1, в**, потери массы при испытании на растяжение заметно меньше до и после термообработки (**рис. 2, г**), по сравнению с образцами с никель-фосфорным покрытием без модификатора. В этом случае на месте изгиба образцов до и после термообработки макротрещины отсутствуют (см. **табл. 1**). В случае добавления дисульфида молибдена в раствор для дополнительного нанесения НФП, содержащего MoS₂, не удалось заметно повысить адгезию такого покрытия на поверхности порошковых сталей.

Из результатов испытания образцов с НФП, модифицированных MoS₂, приведенных на **рис. 2**, видно, что определенное влияние на адгезию НФП к поверхности порошковых сталей оказывает характер распределения MoS₂ в покрытии, способ его осаждения и температура термической обработки. Потеря массы у образцов, покрытие которых модифицировано дисульфидом молибдена по всему объему, несколько больше, чем у образцов, у которых MoS₂ содержится только в наружном слое (см. **рис. 2, а и б**). С увеличением температуры ТО с 350 до 450°C адгезионная прочность покрытия на образцах из сталей П40 и П40Х заметно возрастает в случае, когда MoS₂ содержится только в поверхностном слое НФП. Снижение адгезии НФП с поверхностью подложки при модифицировании MoS₂, по-видимому, можно объяснить блокировкой взаимной диффузии никеля и железа на межслойной границе дисульфидом молибдена при ТО.

Экспериментальные исследования показали, что изменение массы термообработанных образцов после испытания на разрывной машине в среднем на 100–120% меньше, чем у образцов НФП+MoS₂ без термообработки (см. **рис. 2**).

Наилучшие результаты по адгезии показали НФП+MoS₂, нанесенные на образцы из спечен-

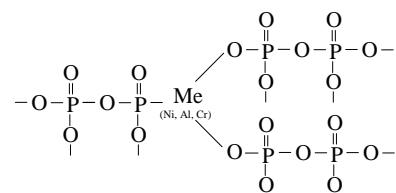
ных сталей П40 и П40Х с остаточной пористостью 15–17%. Это связано с тем, что спеченные в защитной среде образцы обладают более развитой поверхностью. Поэтому при ТО образцов с НФП преобладающую роль играет поверхностная гетеродиффузия и когезия покрытий с открытыми порами, соответственно, адгезионная прочность НФП с поверхностью пористых сталей существенно выше, чем у образцов, полученных горячей штамповкой и из проката стали 40Х.

Известно, что для повышения коррозионной стойкости, исключения появления оксидов никеля при термообработке и уменьшения пористости НФП целесообразно покрыть НФП слоем фосфата алюминия и хрома [16].

Общая формула фосфатного связующего для второго слоя Al₂O₃·Cr₂O₃·yP₂O₅·nH₂O при мольном соотношении можно показать в следующем виде:

$$\frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{Cr}_2\text{O}_3} = 2,76 \text{ и } \frac{\text{P}_2\text{O}_5}{\text{Cr}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3} = 2,46.$$

Ниже схематично показан принцип формирования химической связи первого и второго слоев композиционного НФП. Второй слой с фосфатной неорганической структурой, полученный за счет межмолекулярного выделения воды при нагреве образцов с покрытием, заполняет микрорельеф первого слоя НФП+MoS₂. Схема образования устойчивой фосфатной неорганической структуры:



После термообработки образцов с двухслойным покрытием формируется слоистая структура, которая схематично показана на **рис. 3**.

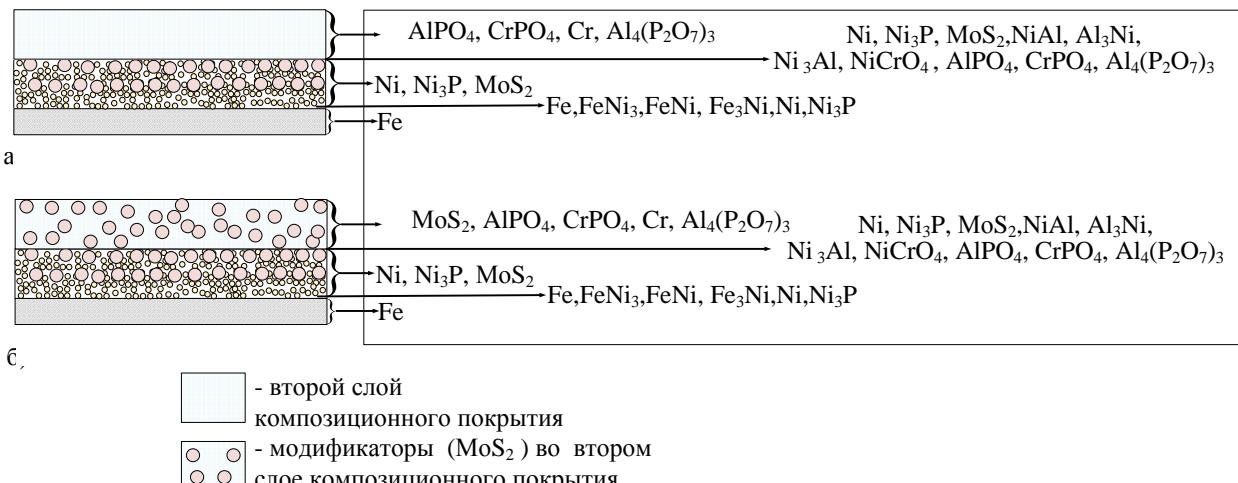


Рис. 3. Предполагаемый фазовый состав двухслойных покрытий после термообработки ($T=400^{\circ}\text{C}$):
а – НФП+MoS₂+Φ; б – НФП+MoS₂+(Φ+MoS₂)

Fig. 3. Estimated phase composition of double-layer coatings after heat treatment ($T=400^{\circ}\text{C}$):
a is Ni-P coatings modified with MoS₂+F; b is Ni-P coatings modified with MoS₂+(F+MoS₂)

Нанесение второго слоя на НФП+MoS₂ и дополнительная термообработка полученного двухслойного покрытия позволяет создать на поверхности покрытия пленки оксида алюминия, так как при температуре 400–500°C на границе НФП+MoS₂ со вторым слоем образуют алюминиды [16]. Данные фазы обладают высокой твердостью и прочностью и должны повысить износостойкость НФП+MoS₂.

Кроме этого при ТО возможен процесс насыщения поверхности НФП+MoS₂ хромом, с образованием фазы NiCrO₄. Хромат никеля является хорошим ингибитором коррозии и оказывает пассивирующее действие на подложку [17]. Исследования показали, что на поверхности НФП+MoS₂ появляются микрослои устойчивого неорганического фосфатного дисульфида молибдена с полимерной матрицей.

В табл. 2 представлены результаты исследования на разрывной машине ТМЭ-10 адгезии двухслойных НФП+MoS₂+Φ и НФП+MoS₂+(Φ+MoS₂) после ТО при 400–410°C в течение 40–45 мин. Толщина второго слоя покрытия составляла 10–12 мкм.

Масса отслоившегося покрытия НФП+MoS₂+Φ и НФП+MoS₂+(Φ+MoS₂) у образцов с подложкой из горячештампованной стали П40Х и листовой стали 40Х практически одинакова, но масса отслоившихся покрытий меньше на образцах из спеченных порошковых сталей П40 и П40Х с остаточной пористостью 15–17%.

Результаты измерения адгезии второго слоя по методу параллельных надрезов и визуальной

оценке состояния покрытия по трехбалльной системе показал, что все исследуемые покрытия (НФП+MoS₂+Φ и НФП+MoS₂+(Φ+MoS₂)) на подложках из спеченных сталей П40, П40Х и катанной 40Х соответствуют баллу - 2₁.

Таблица 2. Результаты исследований адгезии, проводимых на разрывной машине ТМЭ-10

Table 2. Studies on adhesion carried out on tensile testing machine TME-10

Материал подложки	Вид покрытия	Потеря массы Δm , мг
П40Х	НФП+MoS ₂ +Φ	11
	НФП+MoS ₂ +(Φ+MoS ₂)	18
Сталь 40Х	НФП+MoS ₂ +Φ	13
	НФП+MoS ₂ +(Φ+MoS ₂)	22
П40	НФП+MoS ₂ +Φ	12
	НФП+MoS ₂ +(Φ+MoS ₂)	2

Защитные свойства покрытий определяются как собственной химической стойкостью осаждаемого покрытия, так и особенностями его строения, а именно наличием трещин, пор, других дефектов, нарушающих сплошность покрытия.

В связи с этим были проведены исследования по определению пористости НФП различного состава. Для этого бумагу накладывали таким образом, чтобы между поверхностью детали и бумагой не оставалось пузырьков воздуха. После снятия бумагу (через пять минут) с отпечатками пор в виде точек или пятен промывали струей дистиллированной воды и просушивали на чистом стекле. Подсчет числа пор производился следующим образом: на высушеннную фильтро-

вальную бумагу с отпечатками пор накладывали стекло, на котором нанесена сетка с квадратами, равными 1 см². Число пор подсчитывали в каждом квадрате и определяли среднее значение. В **табл. 3** указаны результаты подсчета числа пор на поверхности НФП.

Таблица 3. Результаты подсчета числа пор НФП
Table 3. Calculated number of pores of Ni-P coatings

Материал подложки	Вид покрытия	Количество пор, шт.
П40Х	НФП+MoS ₂ +Ф	0,5-1,2
	НФП+MoS ₂ +(Ф+MoS ₂)	
Сталь 40Х	НФП+MoS ₂ +Ф	0,9-1,3
	НФП+MoS ₂ +(Ф+MoS ₂)	
П40	НФП+MoS ₂ +Ф	0,2-1,1
	НФП+MoS ₂ +(Ф+MoS ₂)	
	НФП+MoS ₂ +Ф	
П40Х, сталь 40Х, П40	НФП	5-7

Как видно из данных, приведенных в **табл. 3**, НФП+MoS₂+Ф и НФП+MoS₂+(Ф+MoS₂) имеют в среднем не более 1,3 поры, что предопределяет низкую пористость поверхностей антифрикционных композиционных двухслойных НФП, модифицированных MoS₂.

Оценка коррозионной стойкости по потере массы показала, что двухслойные покрытия НФП+MoS₂+(Ф+MoS₂) в три раза эффективнее по отношению к НФП и в 1,5 раза по отношению к НФП+MoS₂+Ф. Было установлено, что материал подложки не влияет на коррозионную стойкость покрытий. Нанесение второго слоя на НФП+MoS₂ и дополнительной термообработки полученного двухслойного покрытия позволяет также снизить коэффициент трения, особенно в режиме сухого трения (**табл. 4**).

Таблица 4. Результаты измерения коэффициента трения
Table 4. Friction coefficient measurement results

Материал подложки	Вид покрытия	Коэффициент трения
П40Х, П40, Сталь 40Х	НФП+MoS ₂ +Ф	0,12
	НФП+MoS ₂ +(Ф+MoS ₂)	0,08

Композиционные двухслойные НФП+MoS₂+Ф и НФП+MoS₂+(Ф+MoS₂), наносимые на поверхности порошковых сталей, обладают более повышенными адгезионными, коррозионными и антифрикционными свойствами, по сравнению с покрытиями, получаемыми по традиционной технологии осаждения НФП.

Заключение

Проведённые исследования показали, что на адгезию никель-фосфорных покрытий влияет материал подложки и способ его осаждения. Обосновано, что адгезия покрытий зависит в основном от природы поверхности, способа введения модификатора в раствор для химического осаждения и химического состава покрытий. Нанесение второго слоя на НФП способствует повышению его коррозионной стойкости и триботехнических свойств.

Потеря массы у образцов, покрытие которых модифицирован дисульфидом молибдена по всему объему, значительно больше, чем у образцов, у которых MoS₂ содержится только в наружном слое. С увеличением температуры термической обработки с 350 до 450°C адгезионная прочность покрытия на образцах из спеченных сталей П40 и П40Х заметно возрастает в случае, когда MoS₂ содержится только в поверхностном слое НФП, что объясняется блокированной взаимной диффузии никеля и железа на межслойной границе дисульфидом молибдена.

Выявлено, что в случае нанесения второго слоя на НФП+MoS₂ и после ТО полученного двухслойного покрытия на поверхности изделий на границе НФП+MoS₂ со вторым слоем формируются пленки алюминидов и создаются условия насыщения поверхности НФП+MoS₂ хромом с образованием фазы NiCrO₄, который является хорошим ингибитором коррозии и оказывает пассивирующее действие на подложку и повышает коррозионную стойкость и триботехнические свойства модифицированных MoS₂ НФП, нанесенных на изделия из порошковых конструкционных сталей.

Список литературы

- Хопин П.Н., Шишкун С.В. Трибология: учебник для вузов. М.: Изд-во Юрайт, 2021. 236 с.
- Фролов К.В. Методы совершенствования машин и современные проблемы машиноведения. М.: Машиностроение, 1984. 224 с.
- Композиционные материалы: справочник / Л.Р. Вишняков, Т.В. Грудина, В.Х. Кадыров [и др.]; под ред. Д.М. Карпиноса. Киев: Наукова думка, 1985. 592 с.
- Иванов Д.А., Ситников А.И., Шляпин С.Д. Композиционные материалы: учеб. пособие для вузов ; под ред. А.А. Ильина. Москва: Изд-во Юрайт, 2021. 253 с.
- Получениеnanoструктурных топокомпозитных покрытий на основе каскадного перекрестного эффекта / Гринберг П.Б., Коротаев Д.Н., Орлов П.В., Вер-

шинин Г.А, Тарасов Е.Е., Иванова Е.В. // Динамика систем, механизмов и машин. 2018. Т. 6, №2. С. 171–177.

6. Кинетика формирования диэлектрического покрытия на порошки железа для получения композиционных магнитно-мягких материалов / Гасанов Б.Г., Тамадаев В.Г., Богачев В.О., Махмудова Е.Р. // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2019. №4. С. 44–54. DOI: dx.doi.org/ 10.17073/1997-308X-2019-4-44-54.

7. Shcherbakov I.N. Basic concept of tribocrystalochemistry of composition antifriction coatings ICMTMTE 2020. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 971 (2020), 032021, IOP Publishing. DOI:10.1088/1757-899X/971/3/032021.

8. Ivanov V.V., Popov S.I., Selemeneva E.M., Babazhanov N.T. Study of technological characteristics of the process of formation of vibration mechanochemical oxide coating // XV International scientific-technical conference «Dynamics of technical systems» (DTS-2019): AIP Conference Proceedings, 2019. Vol. 2188, pp. 020015, doi.org/10.1063/1.5138389 (Rostov-on-Don, Russia, 11–13 September 2019).

9. Korotaev D.N., Tarasov E.E., Poleschenko K.N., Eremin E.N., Ivanova E.V. Formation of wear resistant nanostructural topocomposite coatings on metal materials by ionic-plasma processing // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1050(1). 012037. DOI: 10.1088/1742-6596/1050/1/012037.

10. Gennady I. Shulga, Alex O. Kolesnichenko, Paul V. Sirotin, Ilya Yu. Lebedyn'skyi, Eugene V. Skrynnikov and Maxim A. Vasilyev 01028. Published online: 07 November 2018. DOI: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201822601028>

11. Shcherbakov I.N. Basic concept of tribocrystalochemistry of composition antifriction coatings ICMTMTE 2020. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 971 (2020) 032021, IOP Publishing. DOI:10.1088/1757-899X/971/3/032021

12. Shcherbakov I.N. Composite antifriction coating modified with copper complex and fluoropolymer. Dynamics of Technical Systems (DTS 2020) IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 1029 (2021), 012028, IOP Publishing. DOI:10.1088/1757-899X/1029/1/012028

13. Костецкий Б.И., Натансон М.Э., Бершадский Л.И. Механохимические процессы при граничном трении. М.: Наука, 1972. 170 с.

14. Сайфулин Р.С. Композиционные покрытия и материалы. М.: Химия, 1977. 272 с.

15. Пат. 24555391 Российская Федерация, МПК C23C 28/00, C23C 18/36. Способ получения композиционного антифрикционного покрытия на изделии из стали / Трофимов Г.Е., Щербаков И.Н., Шевченко М.Ю., Логинов В.Т., Дерлугян П.Д., Дерлугян Ф.П.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие «Особое конструкторско-технологическое бюро "ОРИОН"».

№2011100572/02; заявл. 11.01.2011; опубл. 10.07.2012, Бюл. № 19.

16. Синельникова В.С., Подергин В.А., Речкин В.Н. Алюминиды. Киев: Наукова думка, 1965. 242 с.

17. Глинка Н.Л. Общая химия. М.: КноРус, 2019. 360 с.

References

1. Khopin P.N., Shishkin S.V. *Tribologiya: uchebnik dlya vuzov* [Tribology: textbook for universities]. Moscow: Yurayt Publishing House, 2021, 236 p. (In Russ.)
2. Frolov K.V. *Metody sovershenstvovaniya mashin i sovremennoye problemy mashinovedeniya* [Methods for improving machines and modern problems of mechanical engineering]. Moscow: Mechanical Engineering, 1984, 224 p. (In Russ.)
3. Vishnyakov L.R., Grudina T.V., Kadyrov V.Kh. et al. Ed. by Karpinos D.M. *Kompozitsionnye materialy: spravochnik* [Composite materials: reference book]. Kyiv: Naukova dumka, 1985, 592 p. (In Russ.)
4. Ivanov D.A., Sitnikov A.I., Shlyapin S.D. Ed. by Ilina A.A. *Kompozitsionnye materialy: ucheb. posobie dlya vuzov* [Composite materials: study guide for universities]. Moscow: Yurayt Publishing House, 2021, 253 p. (In Russ.)
5. Grinberg P.B., Korotaev D.N., Orlov P.V., Vershinin G.A., Tarasov E.E., Ivanova E.V. Producing nanostructured topocomposite coatings by cascade cross effect. *Dinamika sistem, mehanizmov i mashin* [Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines], 2018, vol. 6, no. 2, pp. 171–177. (In Russ.)
6. Gasanov B.G., Tamadaev V.G., Bogachev V.O., Makhmudova E.R. Kinetics of the dielectric coating formation on iron powders to produce soft magnetic composite materials. *Izvestiya vuzov. Poroshkovaya metallurgiya i funktsionalnye pokrytiya* [Proceedings of Universities. Powder Metallurgy and Functional Coatings], 2019, no. 4, pp. 44–54. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2019-4-44-54
7. Shcherbakov I.N. Basic concept of tribocrystalochemistry of composition antifriction coatings. ICMTMTE 2020. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 971 (2020), 032021, IOP Publishing. DOI:10.1088/1757-899X/971/3/032021)
8. Ivanov V.V., Popov S.I., Selemeneva E.M., Babazhanov N.T. Study of technological characteristics of the process of formation of vibration mechanochemical oxide coating. The 15th International Scientific and Technical Conference “Dynamics of Technical Systems” (DTS-2019): AIP Conference Proceedings, vol. 2188, pp. 020015, 2019. doi.org/10.1063/1.5138389 (Rostov-on-Don, Russia, 11–13 September 2019).
9. Korotaev D.N., Tarasov E.E., Poleschenko K.N., Eremin E.N., Ivanova E.V. Formation of wear resistant nanostructural topocomposite coatings on metal materials by ionic-plasma processing. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1050(1), 012037. DOI: 10.1088/1742-6596/1050/1/012037

10. Shulga G.I., Kolesnichenko A.O., Sirotin P.V., Lebedinsky I.Yu., Skrynnikov E.V., Vasilyev M.A. Optimization of technology for production of products of deep drawing sheet steels with the use of lubricants in universal software system ANSYS Workbench. Published online on 07 November 2018. DOI: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201822601028>.
11. Shcherbakov I.N. Basic concept of tribocrystalochemistry of composition antifriction coatings. ICMTMTE 2020. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 971 (2020), 032021, IOP Publishing. DOI:10.1088/1757-899X/971/3/032021
12. Shcherbakov I.N. Composite antifriction coating modified with copper complex and fluoropolymer. Dynamics of Technical Systems (DTS 2020), IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 1029 (2021), 012028, IOP Publishing. DOI:10.1088/1757-899X/1029/1/012028
13. Kostetsky B.I., Natanson M.E., Bershadsky L.I. *Mekhanokhimicheskie protsessy pri granichnom trenii* [Mechanochemical processes with boundary friction]. Moscow: Science, 1972, 170 p. (In Russ.)
14. Sayfulin R.S. *Kompozitionnye pokrytiya i materialy* [Composite coatings and materials]. Moscow: Chemistry, 1977, 272 p. (In Russ.)
15. Trofimov G.E., Shcherbakov I.N., Shevchenko M.Yu., Loginov V.T., Derlugyan P.D., Derlugyan F.P. *Sposob polucheniya kompozitsionnogo antifrictionnogo pokrytiya na izdelii iz stali* [A method of producing a composite anti-friction coating on a steel product]. Patent RU, no. 24555391, 2012.
16. Sinelnikova V.S., Podergin V.A., Rechkin V.N. *Alyuminidy* [Aluminides]. Kyiv: Naukova dumka, 1965. 242 p. (In Russ.)
17. Glinka N.L. *Obshchaya khimiya* [General chemistry]. Moscow: KnoRus, 2019, 360 p. (In Russ.)

Поступила 04.02.2022; принята к публикации 29.03.2022; опубликована 28.06.2022
Submitted 04/02/2022; revised 29/03/2022; published 28/06/2022

Щербаков Игорь Николаевич – кандидат технических наук, доцент,
Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия.
Email: bdd-don@mail.ru. ORCID 0000-0002-3129-078X

Гасанов Бадрудин Гасанович – доктор технических наук, профессор,
Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ), Новочеркасск, Россия.
Email: gasanov.bg@gmail.com

Igor N. Shcherbakov – PhD (Eng.), Associate Professor,
Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia.
Email: bdd-don@mail.ru. ORCID 0000-0002-3129-078X

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

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ
MATERIALS SCIENCE AND HEAT TREATMENT OF METALS

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

УДК 621.785.532

DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-2-82-90



ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СПОСОБЫ РЕАЛИЗАЦИИ ЛОКАЛЬНОГО ИОННОГО АЗОТИРОВАНИЯ СТАЛЕЙ

Хусаинов Ю.Г.

Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия

Аннотация. В работе предложены и исследованы три перспективных способа реализации локального ионного азотирования сталей широкого класса 16Х3НВФМБ-Ш, 38ХМЮА, Р6М5, 12Х18Н10Т и 13Х11Н2В2МФ-Ш, позволяющие формировать на обрабатываемой поверхности за один вакуумный цикл диффузионные слои, различные по толщине и механическим свойствам. Первый способ основан на создании плазмы повышенной плотности на участках деталей с помощью эффекта полого катода. Второй способ предполагает создание высококоионизированной плазмы тлеющего разряда с помощью скрещенных электрических и магнитных полей на локальных участках деталей. Увеличение толщины диффузионного слоя на локальных участках при ионном азотировании связано с увеличением градиента концентрации насыщающего элемента в полости, образуемой полым катодом или скрещенными электрическими и магнитными полями. Третий способ реализуется путем измельчения структуры материала методами пластической деформации перед процессом азотирования на участках деталей, подверженных интенсивному износу. В результате измельчения структуры на локальных участках деталей машин и механизмов интенсифицируются диффузионные процессы и образуются износостойкие упрочненные слои. В статье исследованы микроструктуры сталей после локального ионного азотирования предложенными способами, а также приведены результаты замеров микротвердости упрочненного слоя на различных обрабатываемых участках. Установлено, что при ионном азотировании с полым катодом или в скрещенных электрических и магнитных полях с помощью плазмы тлеющего разряда повышенной плотности на локальном участке детали формируется диффузионный слой в 2–2,5 раза больше, чем при классическом ионном азотировании. При ионном азотировании деталей с предварительным измельчением структуры материала методами пластической деформации перед процессом диффузионного насыщения на отдельных участках детали формируются диффузионные слои, толщиной в ~2 раза превышающие соответствующий показатель, получаемый при азотировании деталей с неизмененной структурой. Исследуемые способы позволяют обрабатывать высоконагруженные детали машин и механизмов, работающие в условиях локального износа.

Ключевые слова: локальное ионное азотирование, тлеющий разряд, эффект полого катода, электрические скрещенные и магнитные поля, сталь, структура, микротвердость, упрочненный слой.

© Хусаинов Ю.Г., 2022

Для цитирования

Хусаинов Ю.Г. Перспективные способы реализации локального ионного азотирования сталей // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №2. С. 82–90. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-2-82-90>



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

PROMISING METHODS FOR LOCAL ION NITRIDING OF STEELS

Khusainov Yu.G.

Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia

Abstract. The paper describes studies on three proposed promising methods for local ion nitriding of steels of a wide class: 16Kh3NVFMB-Sh, 38KhMYuA, R6M5, 12Kh18N10T and 13Kh11N2V2MF-Sh, to create diffusion layers with different thickness and mechanical properties on the treated surface in one vacuum cycle. The first method is based on creating high-density plasma on sections of parts, using the effect of a hollow cathode. The second method proposes the creation of highly ionized glow discharge plasma, using crossed electric and magnetic fields on the local sections of parts. Increase in diffusion layer thickness in local areas during ion nitriding is attributed to an increase in the concentration gradient of a saturating element in the chamber formed by a hollow cathode or crossed electric and magnetic fields. The third method is implemented by refining a material structure by plastic deformation methods before the nitriding process on the areas of high-wear parts. As a result of such structure refinement, local areas of machine parts and mechanisms show intensified diffusion processes and formed wear-resistant hardened layers. The paper presents research on microstructures of steels after local ion nitriding with the proposed methods, and microhardness measurements of the hardened layer on the various treated areas. It has been found that during ion nitriding with a hollow cathode or in crossed electric and magnetic fields, using high-density glow discharge plasma, the local area of the part shows the formation of a diffusion layer, which is 2–2.5 times larger than during classical ion nitriding. Ion nitriding of parts with a preliminary refinement of the material structure with plastic deformation methods before the diffusion saturation process contributes to forming in individual sections of the part diffusion layers, which are ~ 2 times thicker than the relevant indicator, achieved during nitriding of parts with an unchanged structure. The methods under study will provide for processing heavy-loaded parts of machines and mechanisms, operating under local wear conditions.

Keywords: local ion nitriding, glow discharge, hollow cathode effect, crossed electric and magnetic fields, steel, structure, microhardness, hardened layer.

For citation

Khusainov Yu.G. Promising Methods for Local Ion Nitriding of Steels. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 2, pp. 82–90. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-2-82-90>

Введение

Известно, что подавляющая часть разрушений деталей машин, работающих в условиях трения и циклических нагрузок, начинается с поверхности материала вследствие образования на ней питтингов и микроскопических трещин [1]. Повысить надежность и долговечность таких деталей позволяют методы поверхностного упрочнения, в частности ионное азотирование. Публикации последних лет свидетельствуют, что азотирование в плазме тлеющего разряда является одним из наиболее эффективных методов модифицирования поверхности, который все шире применяется в промышленно развитых странах. Как показывает практика, ионное азотирование применяется для деталей машиностроения, основной причиной разрушения которых является износ поверхности материала [2].

Ионное азотирование имеет ряд преимуществ перед традиционными методами, такими как газовое азотирование, азотирование в жид-

ких средах и др.: возможность получения диффузионного слоя с заданным фазовым составом и высоким классом чистоты поверхности, обработка пассивирующихся материалов без дополнительной депассивирующей обработки, а также экономичность и экологичность процесса [3].

Зачастую при эксплуатации деталей машин и механизмов интенсивному износу подвергаются только отдельные высоконагруженные участки, к примеру контактная поверхность зубьев шестерен и зубчатых колес, место посадки под подшипник на валу и др. [4]. В этих случаях более целесообразно упрочнить лишь рабочую поверхность детали.

Таким образом, проблема локального азотирования на современном этапе развития машиностроения является весьма актуальной. В данной работе предложены три способа локального упрочнения наиболее подверженных износу участков деталей за счет формирования на обрабатываемой поверхности за один вакуумный цикл диффузионных слоев, различных по тол-

щине и механическим свойствам. Также это позволит снизить себестоимость технологической операции азотирования вследствие сокращения длительности процесса обработки и уменьшения энергозатрат.

Материалы и методы исследования

Исследования проводились на модернизированной многофункциональной установке для проведения процессов термической и химико-термической обработки в вакууме ЭЛУ-5М. Локальному ионному азотированию с полым катодом подвергались образцы из сталей мартенситного 16Х3НВФМБ-Ш и перлитного 38ХМЮА классов, предварительно термообработанные (закалка и высокий отпуск при 600°C), применяемые для изготовления высоконагруженных зубчатых колес, шестерней, валов. В процессе локального ионного азотирования с полым катодом часть образца располагалась под технологическим экраном-сеткой (рис. 1). В полости, образуемой между экраном и деталью, проявлялся эффект полого катода в виде интенсивного свечения [5]. В течение всего процесса азотирования давление составляло $P = 60$ Па, температура поверхности обрабатываемых образцов не превышала $T \approx 550^{\circ}\text{C}$. Обработка проводилась в течение $t = 12$ ч.

Локальному ионному азотированию в скрещенных электрических и магнитных полях подвергались образцы из стали мартенситного класса Р6М5, предварительно термообработанные (закалка и однократный отпуск при 560°C), применяемые для изготовления штамповочного инструмента и оснастки [6].

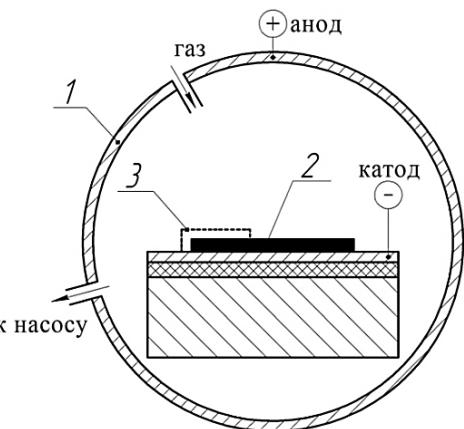


Рис. 1. Принципиальная схема проведения эксперимента локального ионного азотирования с полым катодом: 1 – вакуумная камера; 2 – образец; 3 – технологический экран для создания эффекта полого катода

Fig. 1. Schematic diagram of the local ion nitriding experiment with a hollow cathode: 1 is a vacuum chamber; 2 is a sample; 3 is a technological screen to create the hollow cathode effect

В процессе локальной обработки образцы были расположены на определенном расстоянии от магнитной системы №1 – 0 мм, №2 – 12 мм, №3 – 20 мм и №4 – 60 мм (рис. 2).

Локальному ионному азотированию с предварительно измельченной структурой (рис. 3) подвергались образцы из сталей 13Х11Н2В2МФ-Ш и 12Х18Н10Т [7]. В результате измельчения структуры на локальных участках деталей машин и механизмов интенсифицируются диффузионные процессы и образуются износостойкие упрочненные слои [8].

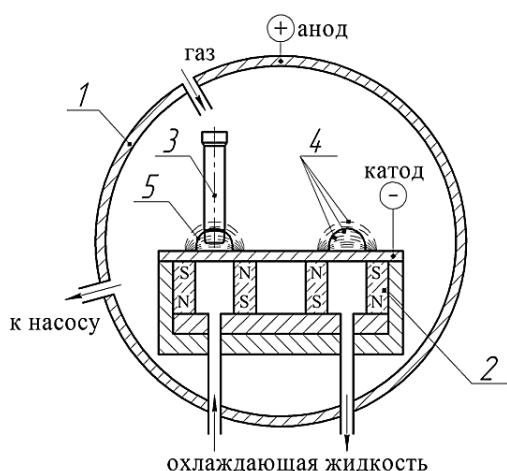
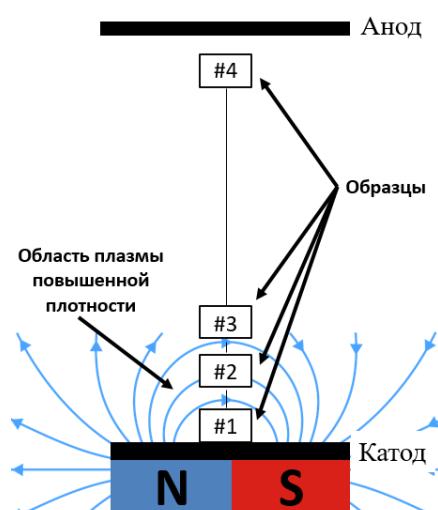


Рис. 2. Принципиальная схема проведения экспериментов локального ионного азотирования в скрещенных электрических и магнитных полях: 1 – вакуумная камера; 2 – магнитная система; 3 – деталь; 4 – силовые линии магнитного поля; 5 – область плазмы повышенной плотности

Fig. 2. Schematic diagram of the local ion nitriding experiments in crossed electric and magnetic fields: 1 is a vacuum chamber; 2 is a magnetic system; 3 is a part; 4 are magnetic field lines; 5 is a high-density plasma region



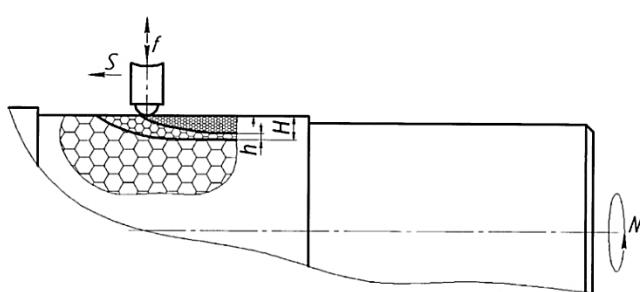


Рис. 3. Принципиальная схема создания измельченной структуры на поверхности материала перед процессом ионного азотирования

Fig. 3. Schematic diagram of forming a refinement structure on the surface of the material before the ion nitriding process

Исследование микроструктуры упрочненного слоя проводились с помощью оптического микроскопа Zeiss AxioTech 25HD. Для выявления структуры азотированного слоя образцы химически травили 5%-м HNO_3 и 95%-м $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$. Замеры микротвердости поверхности выполнялись на микротвердомере Struers Duramin-1/-2.

Полученные результаты и их обсуждение

На рис. 4 показаны фотографии микроструктуры образцов из сталей 16Х3НВФМБ-Ш и 38ХМЮА после локального ионного азотирования в тлеющем разряде с полым катодом. Локальное азотирование проводили при $T = 550^\circ\text{C}$, $P = 60$ Па, $U = 500$ В, $t = 12$ ч, $h = 5$ мм.

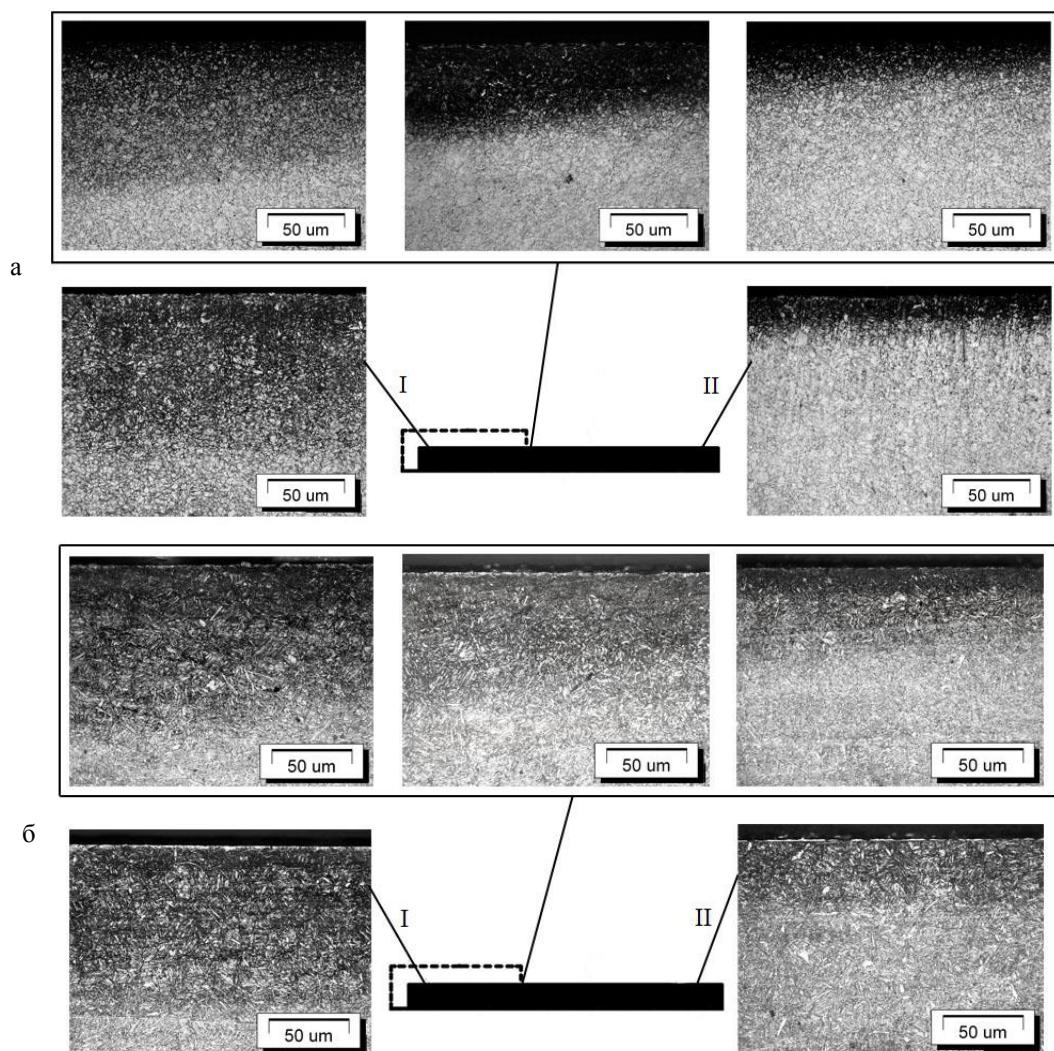


Рис. 4. Микроструктура сталей 16Х3НВФМБ-Ш (а) и 38ХМЮА (б) после локального ионного азотирования с полым катодом при $T=550^\circ\text{C}$, $P=60$ Па, $U=500$ В, $t=12$ ч, $h=5$ мм: I – азотирование с экраном; II – азотирование без экрана

Fig. 4. Microstructure of steels 16Kh3NvFMB-Sh (a) and 38KhMYuA (b) after local ion nitriding with a hollow cathode at $T=550^\circ\text{C}$, $P=60$ Pa, $U=500$ V, $t=12$ h, $h=5$ mm: I is nitriding with a screen; II is nitriding without a screen

Исследование микроструктур образцов из сталей 16Х3НВФМБ-Ш и 38ХМЮА после локального ионного азотирования в тлеющем разряде с полым катодом показало наличие двух темных диффузионных зон различной толщины: I – находившаяся под технологическим экраном; II – вне технологического экрана.

Из рис. 4 видно, что для конструкционных сталей 16Х3НВФМБ-Ш и 38ХМЮА на участках ионного азотирования в тлеющем разряде с полым катодом толщина темного сильно травящегося слоя в 2–2,5 раза больше по сравнению с участками ионного азотирования, находившимися вне технологического экрана при температуре поверхности 550°C и длительности процесса 12 ч. Такое увеличение толщины диффузионного слоя на участках ионного азотирования с полым катодом связано с увеличением градиента концентрации насыщающего элемента в полости, образуемой технологическим экраном-сеткой и катодом.

Максимальный размер переходной зоны для сталей 16Х3НВФМБ-Ш и 38ХМЮА достигал 3 мм. Переход между двумя зонами плавный, о чем свидетельствует постепенное изменение толщины темной диффузионной зоны.

Анализ структуры локально азотированных участков с полым катодом показывает наличие

темной диффузионной зоны, размер которой меняется в зависимости от технологических параметров тлеющего разряда. Диффузионная зона представляет собой α -фазу – азотистый феррит с ОЦК-решеткой, период решетки меняется в зависимости от содержания азота [9]. Переход от азотированного слоя к нижележащим слоям плавный, что является одним из основных требований к микроструктуре стали [10].

Измерения микротвердости на поперечных шлифах азотированных образцов из конструкционных сталей 16Х3НВФМБ-Ш и 38ХМЮА позволили оценить глубину диффузионного слоя при локальном ионном азотировании в тлеющем разряде с полым катодом. На рис. 5, 6 приведены зависимости распределения микротвердости по глубине диффузионного слоя для сталей 16Х3НВФМБ-Ш и 38ХМЮА на участках I и II при длительности обработки $t=12$ ч.

Анализ зависимостей распределения микротвердости для сталей 16Х3НВФМБ-Ш и 38ХМЮА показывает, что на участке ионного азотирования с технологическим экраном толщина диффузионного слоя в 2–2,5 раза больше по сравнению с участком азотированного без экрана при температуре поверхности $T=550$ °C и длительности обработки $t=12$ ч.

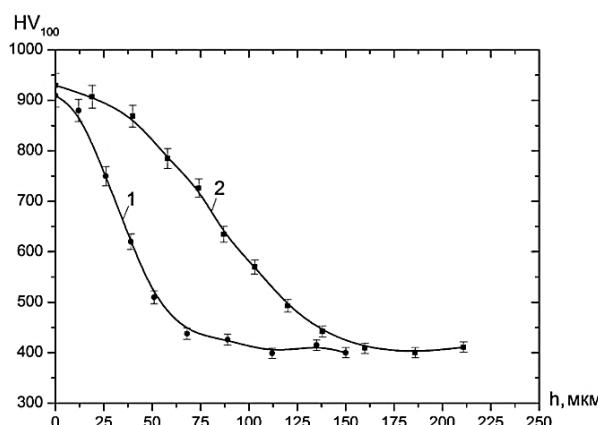


Рис. 5. Зависимости распределения микротвердости по толщине диффузионного слоя при локальном ионном азотировании в тлеющем разряде с полым катодом для стали 16Х3НВФМБ-Ш при $T=550$ °C, $P=60$ Па, $U=500$ В, $t=12$ ч: 1 – азотирование без экрана; 2 – азотирование с экраном

Fig. 5. Dependences of the distribution of microhardness over thickness of the diffusion layer during local ion nitriding in a glow discharge with a hollow cathode for steel 16Kh3NVFMB-Sh at $T=550$ °C, $P=60$ Pa, $U=500$ V, $t=12$ h: 1 is nitriding without a screen; 2 is nitriding with a screen

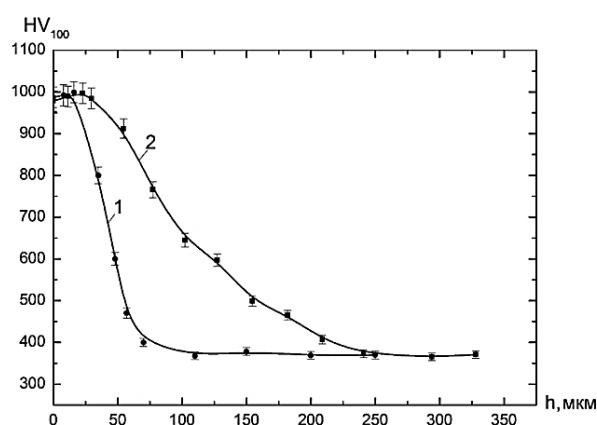


Рис. 6. Зависимости распределения микротвердости по толщине диффузионного слоя при локальном ионном азотировании в тлеющем разряде с полым катодом для стали 38ХМЮА при $T=550$ °C, $P=60$ Па, $U=500$ В, $t=12$ ч: 1 – азотирование без экрана; 2 – азотирование с экраном

Fig. 6. Dependences of the distribution of microhardness over the thickness of the diffusion layer during local ion nitriding in a glow discharge with a hollow cathode for steel 38KhMYuA at $T=550$ °C, $P=60$ Pa, $U=500$ V, $t=12$ h: 1 is nitriding without a screen; 2 is nitriding with a screen

Так, для стали 16Х3НВФМБ-Ш толщина упрочненного слоя на участках ионного азотирования с полым катодом составляет 140 мкм, а для стали 38ХМЮА – 240 мкм.

Структура стали Р6М5 после локального ионного азотирования в скрещенных электрических и магнитных полях представлена на **рис. 7**. На микроструктуре образцов наблюдается темная диффузионная зона, представляющая собой α -фазу – азотистый феррит с ОЦК-решеткой, причем с увеличением расстояния расположения образца от магнита глубина азотированного слоя уменьшается [2]. Переход от азотированного слоя к основе (матрице) материала плавный, что является одним из основных требований к микроструктуре азотированной стали [10].

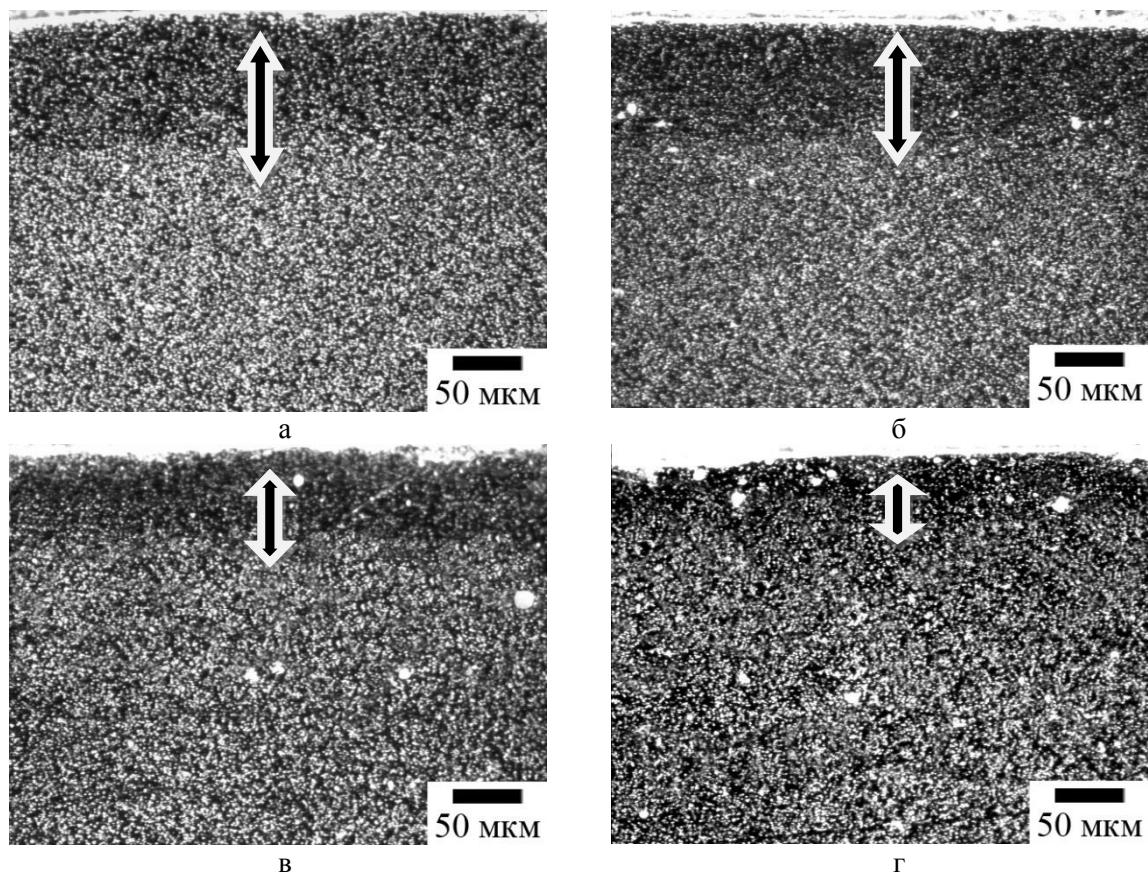


Рис. 7. Микроструктура стали Р6М5 после локального ионного азотирования в скрещенных электрических и магнитных полях: а – 0 мм; б – 12 мм; в – 20 мм; г – 60 мм

Fig. 7. Microstructure of R6M5 steel after local ion nitriding in crossed electric and magnetic fields: a is 0 mm; b is 12 mm; c is 20 mm; d is 60 mm

Таблица. Механические свойства образцов из стали Р6М5 после локального ионного азотирования в скрещенных электрических и магнитных полях

Table. Mechanical properties of R6M5 steel specimens after local ion nitriding in crossed electric and magnetic fields

Расстояние от магнитной системы, мм	0	12	20	60
Микротвердость азотированного слоя, HV	1076,9±10	747,6±10	746,9±10	709,5±10
Глубина азотированного слоя, мкм	100±5	70±5	50±5	40±5

Структура стали 12Х18Н10Т после локального ионного азотирования представлена на рис. 8.

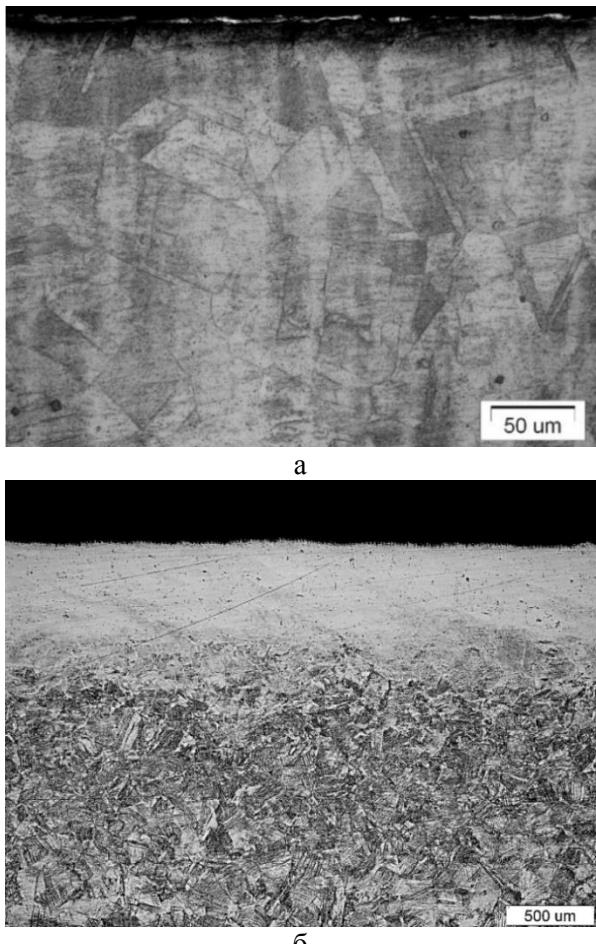


Рис. 8. Микроструктура стали 12Х18Н10Т после локального ионного азотирования:
а – исходное термообработанное состояние;
б – после поверхностного измельчения зеренной структуры материала

Fig. 8. Microstructure of steel 12Kh18N10T after local ion nitriding: a is an initial heat-treated state; b is after surface refinement of the grain structure of the material

Сталь 12Х18Н10Т из-за высокого содержания хрома считается трудноазотируемой сталью. При этом для сохранения коррозионно-стойких свойств рекомендуется проводить обработку при температуре ниже 470°C. С целью интенсификации диффузионных процессов при таких низких температурах образцы были подвергнуты поверхностному измельчению зеренной структуры материала (см. рис. 8).

Для определения глубины упрочненного слоя были получены распределения микротвердости в поперечном сечении азотированных образцов (рис. 9). Анализ показал, что на всех образцах,

прошедших азотирование, с увеличением расстояния от поверхности значение твердости постепенно снижается, что вызвано уменьшением концентрации растворенного азота в γ -фазе для стали 12Х18Н10Т [2]. При этом распределение твердости по глубине диффузионного слоя на образцах, прошедших поверхностное измельчение структуры, имеет более плавный характер. Размер упрочненной зоны образца после поверхностной обработки в ~2 раза больше, чем образца в исходном термообработанном состоянии.

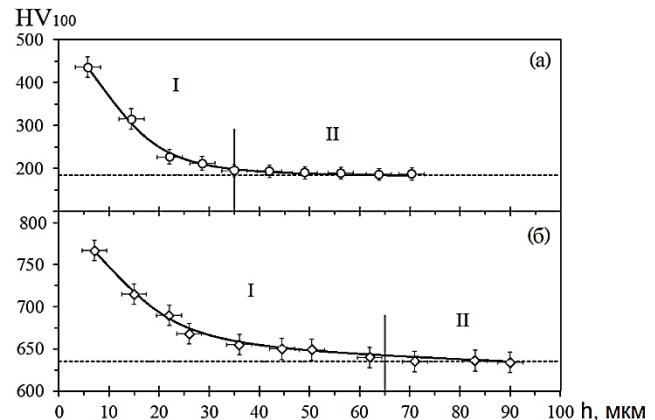


Рис. 9. Распределения микротвердости по глубине азотированных образцов из стали 12Х18Н10Т:
а – исходное термообработанное состояние;
б – после поверхностного измельчения зеренной структуры материала;
I – упрочненная зона, II – сердцевина

Fig. 9. Depth distributions of microhardness specimens of steel 12Kh18N10T: a is an initial heat-treated state; b is after surface refinement of the grain structure of the material; I is a hardened zone; II is a core

Заключение

Таким образом, впервые предложены и исследованы следующие перспективные способы локального ионного азотирования, позволяющие формировать на обрабатываемой поверхности за один вакуумный цикл диффузионные слои, различные по толщине и механическим свойствам:

1. Способ локального ионного азотирования с полым катодом, позволяющий формировать с помощью плазмы тлеющего разряда повышенной плотности на участке детали диффузионный слой в 2–2,5 раза больше, чем при классическом ионном азотировании.

2. Способ локального ионного азотирования в скрещенных электрических и магнитных полях, позволяющий получать на отдельных участках детали диффузионный слой в 2–2,5 раза больше, чем при классическом ионном азотировании.

3. Способ локального ионного азотирования с предварительным измельчением структуры материала методами пластической деформации перед процессом азотирования на участках деталей, подверженных интенсивному износу. Способ позволяет получать упрочненные слои на отдельных участках детали, толщиной в ~2 раза превышающие соответствующий показатель, получаемый при ионном азотировании деталей с неизмененной структурой.

Список литературы

- Герасимов С.А., Куксенова Л.И., Лаптева В.Г. Структура и износостойкость азотированных конструкционных сталей и сплавов: монография. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. 518 с.
- Ионная химико-термическая обработка сплавов / Б.Н. Арзамасов, А.Г. Братухин, Ю.С. Елисеев, Т.А. Панайоти. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. 400 с.
- Берлин Е.В., Коваль Н.Н., Сейдман Л.А. Плазменная химико-термическая обработка поверхности стальных деталей. М.: Техносфера, 2012. 464 с.
- Повышение ресурса работы зубчатых передач на основе выбора технологий упрочнения рабочих поверхностей зубьев / Л.И. Куксенова, С.А. Поляков, М.С. Алексеева, С.В. Рубцов // Вестник научно-технического развития. 2019. №5. С. 11–22.
- Пат. № 2534906 RU, МПК7 C23C8/36. Способ локальной обработки материала с эффектом полого катода при ионном азотировании / В.В. Будилов, К.Н. Рамазанов, Ю.Г. Хусаинов, И.С. Рамазанов, И.В. Золотов; патентообладатель ФГБОУ ВПО «УГАТУ». №2013117842; заявл. 17.04.2013; опубл. 10.12.2014, Бюл. №34 с.: ил.
- Пат. №2640703 RU, МПК7 C23C8/36. Способ локальной обработки стального изделия при ионном азотировании в магнитном поле / В.В. Будилов, К.Н. Рамазанов, Ю.Г. Хусаинов, Р.С. Есипов, И.В. Золотов, Р.Д. Агзамов; патентообладатель ФГБОУ ВПО «УГАТУ». №2016110289; заявл. 21.03.16; опубл. 11.01.2018; Бюл. №2 с.: ил.
- Пат. №2664106 RU, МПК7 C23C8/36. Способ низкотемпературного ионного азотирования стальных деталей / В.В. Будилов, К.Н. Рамазанов, Ю.Г. Хусаинов, Р.Д. Агзамов, Р.С. Есипов, А.Ф. Тагиров; патентообладатель ФГБОУ ВПО «УГАТУ». №2017100450; заявл. 09.01.17; опубл. 10.07.2018; Бюл. № 19 с.: ил.
- Структура и свойства ультрамелкозернистых сталей с ионно-плазменными покрытиями / Р.К. Исламгалиев, К.Н. Рамазанов, М.В. Караваева и др. М.: Изд-во «Инновационное машиностроение», 2017. 225 с.
- Будилов В.В., Агзамов Р.Д., Рамазанов К.Н. Исследование и разработка методов химико-термической обработки на основе структурно фазового модифи- цирования поверхности деталей сильноточными разрядами в вакууме // Металловедение и термическая обработка металлов. 2007. №7. С. 33–36.
- Будилов В.В., Рамазанов К.Н., Вафин Р.К. Влияние скрещенных электрических и магнитных полей на ионное азотирование в тлеющем разряде // Физика и химия обработки материалов. 2011. №6. С. 40–42.

References

- Gerasimov S.A., Kuksenova L.I., Lapteva V.G. *Struktura i iznosostoykost' azotirovannykh konstruktsionnykh staley i splavov: monografiya* [Structure and wear resistance of nitrided structural steels and alloys: monograph]. Moscow: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2012, 518 p. (In Russ.)
- Arzamasov B.N., Bratukhin A.G., Eliseev Yu.S., Panayoti T.A. *Ionnaya khimiko-termicheskaya obrabotka splavov* [Ion chemical-thermal treatment of alloys]. Moscow: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 1999, 400 p. (In Russ.)
- Berlin E.V., Koval N.N., Seidman L.A. *Plazmennaya khimiko-termicheskaya obrabotka poverkhnosti stalnykh detalei* [Plasma chemical-thermal treatment of the surface of steel parts]. Moscow: Tekhnosfera, 2012, 464 p. (In Russ.)
- Kuksenova L.I., Polyakov S.A., Alekseeva M.S., Rubtsov S.V. Increasing the service life of gears based on the choice of technologies for strengthening the working surfaces of the teeth. *Vestnik nauchno-tehnicheskogo razvitiya* [Bulletin of Scientific and Technical Development], 2019, no. 5, pp. 11–22. (In Russ.)
- Budilov V.V., Ramazanov K.N., Khusainov Yu.G., Ramazanov I.S., Zolotov I.V. *Sposob lokalnoy obrabotki materiala s effektom pologo katoda pri ionnom azotirovaniyu* [The method of local processing of the material with the hollow cathode effect during ion nitriding]. Patent RU, no. 2534906, 2014.
- Budilov V.V., Ramazanov K.N., Khusainov Yu.G., Esipov R.S., Zolotov I.V., Agzamov R.D. *Sposob lokalnoy obrabotki stalnogo izdelya pri ionnom azotirovaniyu v magnitnom pole* [The method of local processing of a steel product during ion nitriding in a magnetic field]. Patent No. 2640703, 2018.
- Budilov V.V., Ramazanov K.N., Khusainov Yu.G., Agzamov R.D., Esipov R.S., Tagirov A.F. *Sposob nizkotemperaturnogo ionnogo azotirovaniya stalnykh detalei* [The method of low-temperature ion nitriding of steel parts]. Patent No. 2664106 RU, 2018.
- Islamgaliev R.K., Ramazanov K.N., Karavaeva M.V. et al. *Struktura i svoystva ultramelkozernistykh staley s ionno-plazmennymi pokrytiyami* [Structure and properties of ultrafine-grained steels with ion-plasma coatings]. Moscow: Innovative Mechanical Engineering Publishing House, 2017, 225 p. (In Russ.)
- Budilov V.V., Agzamov R.D., Ramazanov K.N. Research and development of methods of chemical-thermal

treatment based on structural phase modification of the surface of parts by high-current discharges in vacuum. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metal Science and Heat Treatment of Metals], 2007, no. 7, pp. 33–36. (In Russ.)

10. Budilov V.V., Ramazanov K.N., Vafin R.K. Influence of crossed electric and magnetic fields on ion nitriding in a glow discharge. *Fizika i khimiya obrabotki materialov* [Physics and Chemistry of Materials Processing], 2011, no. 6, pp. 40–42. (In Russ.)

Поступила 11.05.2022; принята к публикации 25.05.2022; опубликована 28.06.2022
Submitted 11/05/2022; revised 25/05/2022; published 28/06/2022

Хусаинов Юлдаш Гамирович – кандидат технических наук,
директор института авиационных технологий и материалов,
Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия.
Email: uldash990@mail.ru. ORCID 0000-0002-0423-8257

Yuldash G. Khusainov – PhD (Eng.), Director of the Institute of Aviation Technologies and Materials,
Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia.
Email: uldash990@mail.ru. ORCID 0000-0002-0423-8257

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

УДК 621.77.04

DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-2-91-97



ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ УСКОРЕННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ НА СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ И СВОЙСТВА РУЛОННОГО ПРОКАТА

Полецков П.П., Алексеев Д.Ю., Кузнецова А.С., Гулин А.Е., Емалеева Д.Г.

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

Аннотация. Постановка задачи. В статье обоснована актуальность исследования влияния режимов ускоренного охлаждения на структурообразование и свойства стали. **Цель работы.** Исследование влияния температуры завершения ускоренного охлаждения на микроструктуру и свойства рулонного проката из низколегированной стали. **Используемые методы.** В условиях лабораторного комплекса ООО «Инжениринговый центр Термодемограф-МГТУ» выполнены физическое моделирование и исследование процессов выплавки и термомеханической обработки стали химической композиции $(0,05\text{--}0,15)\text{C} - (0,10\text{--}0,50)\text{Si} - (0,7\text{--}1,65)\text{Mn}$, дополнительно легированной Cr, Ni, Cu и Mo. Реализованы 6 режимов термомеханической обработки лабораторных образцов, отличающихся температурами конца ускоренного охлаждения в диапазоне $450\text{--}650^\circ\text{C}$. Испытания на растяжение выполнялись на универсальной испытательной машине AG-AC 300 фирмы Shimadzu, а также ZWICK серии Z2000 фирмы GmbH&Co. Металлографический анализ проводили на оптическом микроскопе Meiji Techno с использованием системы компьютерного анализа изображений Thixomet PRO. Исследование микроструктуры методом растровой электронной микроскопии выполнено с применением сканирующего электронного микроскопа JEOL JSM-6490LV. **Результаты.** Показано, что при реализации относительно высоких температур конца ускоренного охлаждения (650°C) формируется структура, состоящая из глобулярного бейнита со второй фазой феррита различной морфологии. Такая структура обеспечивает достижение наиболее низких значений предела текучести стали. Температуры в диапазоне $550\text{--}600^\circ\text{C}$ являются наиболее рациональными температурами конца ускоренного охлаждения, обеспечивающими формирование зерен игольчатого бейнита и повышение прочностных при сохранении пластических характеристик стали. Снижение температуры конца ускоренного охлаждения до 450°C может сопровождаться формированием участков с мартенситной составляющей, обладающей повышенной твердостью. Это обуславливает дальнейший рост прочности с одновременным снижением показателей пластичности лабораторных образцов проката.

Ключевые слова: сталь, рулонный прокат, контролируемая прокатка, ускоренное охлаждение, микроструктура, механические свойства.

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства, выполняемого с участием высшего учебного заведения (Соглашение № 075-11-2021-063 от 25.06.2021 г.). В работе принимал участие аспирант группы МТа-21-2 ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» Адищев П.Г.

© Полецков П.П., Алексеев Д.Ю., Кузнецова А.С., Гулин А.Е., Емалеева Д.Г., 2022

Для цитирования

Исследование влияния режимов ускоренного охлаждения на структурообразование и свойства рулонного проката / Полецков П.П., Алексеев Д.Ю., Кузнецова А.С., Гулин А.Е., Емалеева Д.Г. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №2. С. 91–97. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-2-91-97>



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 ACCELERATED COOLING MODES ON THE STRUCTURE FORMATION AND PROPERTIES OF COILS

Poletskov P.P., Alekseev D.Yu., Kuznetsova A.S., Gulin A.E., Emaleeva D.G.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The paper substantiates the relevance of studying the influence of accelerated cooling modes on the structure formation and properties of steel. **Objective.** Study on the influence of end temperature of accelerated cooling on the microstructure and properties of low-alloy steel coils. **Methods Applied.** The laboratory complex LLC Engineering Center Termodeform-NMSTU was used to carry out the physical modeling and study on the processes of melting and thermomechanical treatment of steel of a chemical composition (0.05–0.15)C – (0.10–0.50)Si – (0.7–1.65)Mn, alloyed with Cr, Ni, Cu and Mo. The authors applied 6 modes of thermomechanical treatment of the laboratory samples, differing in the end temperatures of accelerated cooling in the range of 450–650°C. Tensile tests were carried out, applying a universal testing machine, AG-AC 300 by Shimadzu, as well as ZWICK Z2000 series by Zwick GmbH & Co. A complex of metallographic studies was performed using a Meiji Techno optical microscope, using a Thixomet PRO computer image analysis system. The microstructure was studied by scanning electron microscopy, using JEOL JSM-6490LV. **Results.** It is shown that relatively high temperatures at the end of accelerated cooling (650°C) contribute to forming a structure, consisting of globular bainite with a second phase of ferrite of different morphology. Such a structure ensures the lowest yield strength of steel. Temperatures in the range of 550–600°C are optimal for the end of accelerated cooling, ensuring the formation of grains of acicular bainite and an increase in strength, while maintaining the plastic characteristics of steel. A decrease in the temperature at the end of accelerated cooling to 450°C may be accompanied by the formation of areas with a martensitic component, showing increased hardness. This causes a further increase in strength with a simultaneous decrease in plasticity of the laboratory samples of rolled products.

Keywords: steel, coils, controlled rolling, accelerated cooling, microstructure, mechanical properties.

The research was carried out at Nosov Magnitogorsk State Technical University and funded by the Ministry of Education and Science of Russia as part of running an integrated project, aimed at developing high-tech production, together with a higher educational institution (Agreement No. 075-11-2021-063 dated June 25, 2021). Adishchev P.G., a postgraduate student of group MTa-21-2 of NMSTU, took part in the research.

For citation

Poletskov P.P., Alekseev D.Yu., Kuznetsova A.S., Gulin A.E., Emaleeva D.G. Study on the Influence of Accelerated Cooling Modes on the Structure Formation and Properties of Coils. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 2, pp. 91–97. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-2-91-97>

Введение

В настоящее время при производстве рулонной стали широко используется процесс контролируемой прокатки с ускоренным охлаждением. Рассматриваемый процесс предусматривает ограничение роста зерна при нагреве сляба, измельчение рекристаллизованного зерна аустенита, создание и сохранение повышенной плотности потенциальных мест зарождения новой фазы в нерекристаллизованном аустените, обеспечение переохлаждения аустенита в ходе ускоренного охлаждения для повышения скорости образования элементов новой фазы и формирования

дисперсных продуктов по сдвиговому механизму превращения [1].

При этом одной из ключевых технологических операций процесса является последеформационное ускоренное охлаждение (УО) раската. Металловедческой основой применения ускоренного охлаждения является управление процессом превращения аустенита после завершения деформации. В зависимости от параметров прокатки, охлаждения и химического состава низколегированной стали в результате УО возможны несколько вариантов изменения структуры [2]:

- измельчение зерна феррита и устранение полосчатости;

- изменение количества, типа и расположения второй структурной составляющей;
- изменение типа матрицы (от ферритной к структурам промежуточного типа).

Основными параметрами, определяющими особенности структурообразования и формирования свойств стали в процессе ускоренного охлаждения, являются:

- температуры начала ($T_{\text{н.о.}}$) и конца ($T_{\text{к.о.}}$) охлаждения;
- скорость охлаждения.

Изменение указанных параметров позволяет в широком диапазоне управлять структурой и свойствами готового проката [2–5]. В связи с этим целью работы является исследование влияния температуры конца ускоренного охлаждения на микроструктуру и свойства рулонного проката из низколегированной стали.

Теория, материалы и методы исследования

В качестве материала для исследований использовались лабораторные образцы проката из стали химической композиции (0,05–0,15)C – (0,10–0,50)Si – (0,7–1,65)Mn, дополнительно легированной Cr, Ni, Cu и Mo. Образцы проката изготавливались в условиях лабораторного комплекса ООО «Инженеринговый центр Термодеформ-МГТУ» (г. Магнитогорск) на основе физического моделирования процессов выплавки и термомеханической обработки стали [6–10].

Температура нагрева металла под прокатку составляла $(1200 \pm 10)^\circ\text{C}$. Температура окончания процесса деформации составляла $\text{Ar}_3 + (30–50)^\circ\text{C}$. Ускоренное охлаждение раскатов осуществлялось из двухфазной ($\gamma - \alpha$)-области при температуре на 30–50°C ниже критической точки Ar_3 /с. В качестве охлаждающей среды использовалась вода. Температура конца ускоренного охлаждения $T_{\text{к.о.}}$ варьировалась в диапазоне от 450 до 650°C . При достижении заданных значений $T_{\text{к.о.}}$ образцы охлаждались на воздухе до комнатной температуры. Исследуемые режимы схематично изображены на рис. 1. Исследование механических свойств лабораторных образцов проводилось по стандартным методикам в лаборатории физико-механических и металлографических испытаний ПАО «Магнитогорский металлургический

комбинат», а также ЦКП «НИИ Наносталей» при ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Испытания на растяжение выполнялись на универсальной испытательной машине ZWICK серии Z2000 фирмы GmbH&Co, а также AG-AC 300 фирмы Shimadzu.

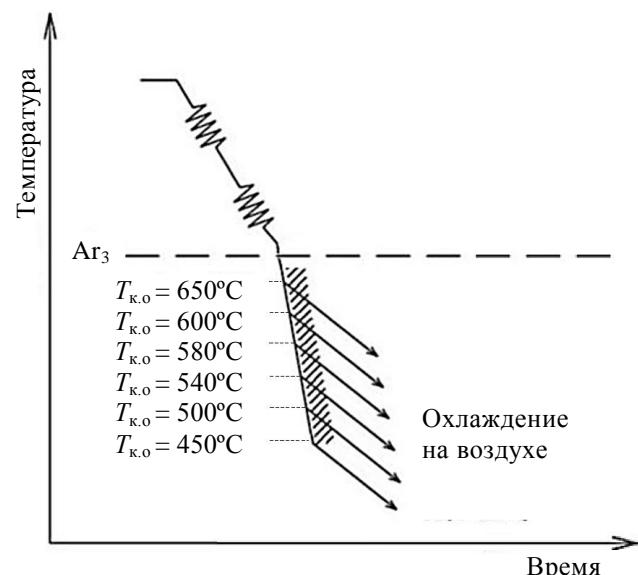


Рис. 1. Исследуемые режимы процесса контролируемой прокатки с ускоренным охлаждением

Fig. 1. Controlled rolling with accelerated cooling modes under study

Металлографические исследования выполнены в ЦКП «НИИ Наносталей». Для выявления микроструктуры поверхность шлифов подвергали травлению в реактиве состава HNO_3 (65–68 мас.%) и HCl (32–35 мас.%), взятых в соотношении 1:3 по объёму. Металлографический анализ проводили на оптическом микроскопе Meiji Techno с использованием системы компьютерного анализа изображений Thixomet PRO [11].

Измерение твердости по Роквеллу HRB проводилось по ГОСТ 9013-59 [12] с использованием наконечника в виде алмазного конуса типа НК под действием усилия $F=882,6$ Н (90 кгс).

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты исследования влияния температуры конца ускоренного охлаждения на механические свойства лабораторных образцов проката показаны на рис. 2.

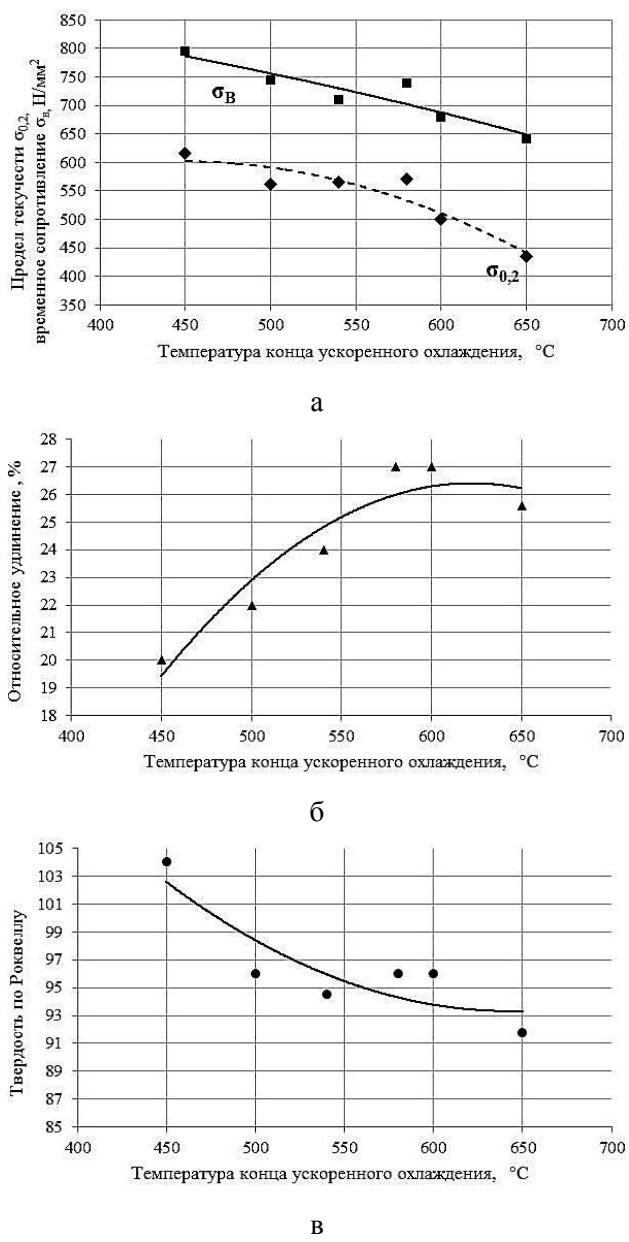


Рис. 2. Влияние температуры конца ускоренного охлаждения на прочностные свойства (а), относительное удлинение (б) и твердость (в) стали

Fig. 2. Influence of the temperature at the end of accelerated cooling on the strength properties (a), elongation (b) and hardness (v) of steel

Как следует из **рис. 2**, при снижении температуры конца ускоренного охлаждения с 650 до 450°C наблюдается рост прочностных характеристик стали: значения временного сопротивления увеличиваются на 150 Н/мм², значения предела текучести – на 180 Н/мм² (**рис. 2, а**). Вместе

с тем с понижением температуры конца ускоренного охлаждения увеличиваются значения твердости HRB (**рис. 2, б**). Повышение прочностных свойств сопровождается снижением пластичности стали: в исследуемом диапазоне температур конца ускоренного охлаждения значения относительного удлинения образцов снижаются до 19% (**рис. 2, в**).

На **рис. 3** представлены результаты металлографических исследований поученных образцов. Установлено, что после окончания ускоренного охлаждения при температуре 650°C микроструктура стали состоит из существенной доли глобулярного бейнита (70%), игольчатого феррита (20%) и незначительной доли полигонального феррита (10%). Дальнейшее снижение температуры до 540–580°C обеспечивает формирование наряду с глобулярным бейнитом (55%) бейнита игольчатого ($\approx 30\%$) с сохранением небольшой доли квазиполигонального феррита ($\approx 15\%$). Окончание охлаждения при 500°C обеспечивает формирование более низкотемпературной составляющей реечного бейнита (100%) и, как следствие, снижение пластических характеристик стали. При температуре 450°C наблюдается выделение высокоуглеродистой составляющей в виде мартенсита ($\approx 20\%$) наряду с реечным бейнитом ($\approx 80\%$).

Таким образом, при реализации относительно высоких температур конца ускоренного охлаждения (650°C) формируется структура, состоящая из глобулярного бейнита со второй фазой феррита различной морфологии. Такая структура обеспечивает достижение наиболее низких значений предела текучести стали. Температуры 550–600°C являются наиболее рациональными температурами конца ускоренного охлаждения, обеспечивающими формирование зерен игольчатого бейнита и повышение прочностных при сохранении пластических характеристик стали. Снижение температуры конца ускоренного охлаждения до 450°C может сопровождаться формированием участков с мартенситной составляющей, обладающей повышенной твердостью. Это обуславливает дальнейший рост прочности с одновременным снижением показателей пластичности лабораторных образцов проката.

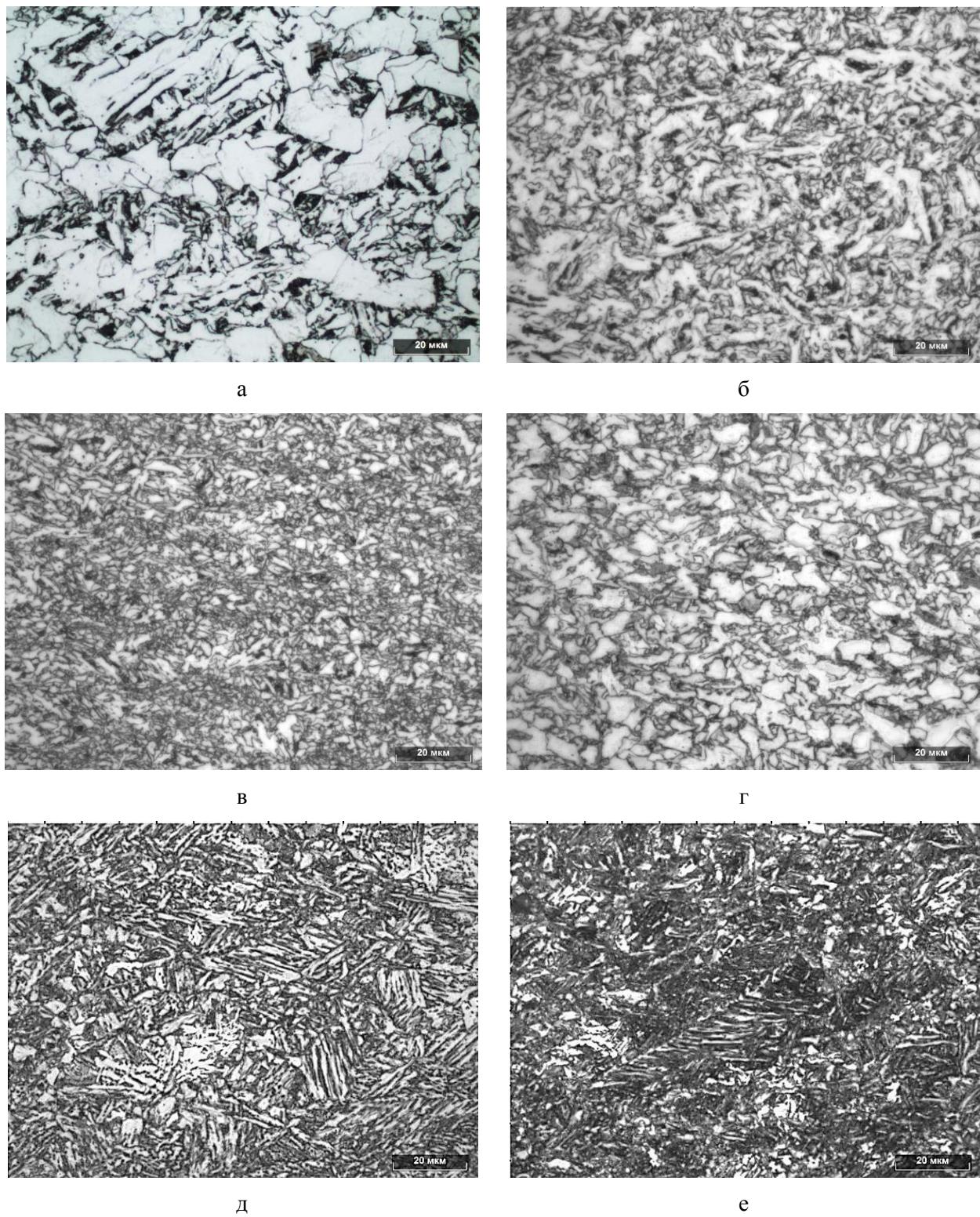


Рис. 3. Влияние температуры конца ускоренного охлаждения на микроструктуру лабораторных образцов ($\times 1000$): а – $T_{к.о} = 650^{\circ}\text{C}$; б – $T_{к.о} = 600^{\circ}\text{C}$; в – $T_{к.о} = 580^{\circ}\text{C}$; г – $T_{к.о} = 540^{\circ}\text{C}$; д – $T_{к.о} = 500^{\circ}\text{C}$; е – $T_{к.о} = 450^{\circ}\text{C}$

Fig. 3. Influence of the temperature at the end of accelerated cooling on microstructure of the laboratory samples ($\times 1000$): a is $T_{к.о} = 650^{\circ}\text{C}$; б is $T_{к.о} = 600^{\circ}\text{C}$; в is $T_{к.о} = 580^{\circ}\text{C}$; г is $T_{к.о} = 540^{\circ}\text{C}$; д is $T_{к.о} = 500^{\circ}\text{C}$; е is $T_{к.о} = 450^{\circ}\text{C}$

Заключение

В ходе исследования установлены следующие основные особенности влияния температуры конца ускоренного охлаждения на микроструктуру и свойства рулонного проката из низколегированной стали:

- завершение ускоренного охлаждения при высоких температурах (650°C) ведет к формированию ферритобейнитной микроструктуры с наиболее низкими прочностными свойствами образцов ($\sigma_{0,2} = 434 \text{ Н/мм}^2$, $\sigma_b = 642 \text{ Н/мм}^2$);

- при понижении температуры до 580°C прочностные свойства стали увеличиваются ($\sigma_{0,2} = 570 \text{ Н/мм}^2$, $\sigma_b = 740 \text{ Н/мм}^2$) с одновременным увеличением значений относительного удлинения стали до 27 %. Микроструктура стали состоит из зерен игольчатого и глобулярного бейнита с небольшой долей квазиполигонального феррита;

- дальнейшее снижение температуры конца ускоренного охлаждения до 450°C сопровождается формированием мартенситных участков с повышенной твердостью и дальнейшим ростом прочностных свойств стали. Однако относительное удлинение стали резко снижается до 19%.

Полученные данные служат научным заделом при проектировании прогрессивных технологий изготовления многофункциональных материалов с требуемым комплексом эксплуатационных характеристик.

Список литературы

1. Настич С.Ю. Разработка технологии термомеханической обработки полосового и листового проката из низколегированной стали на основе управления формированием ферритно-бейнитной структуры: дис. ... д-ра техн. наук. М., 2013. 399 с.
2. Эфрон Л.И. Металловедение в «большой» металлургии. Трубные стали. М.: Металлургиздат, 2012. 696 с.
3. Исследование влияния режимов контролируемой прокатки трубной стали на структурное состояние горячедеформированного аустенита / П.П. Полецков, М.С. Гущина, Д.Ю. Алексеев, Д.Г. Емалеева, А.С. Кузнецова, О.А. Никитенко // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т. 16. № 3. С. 67–77.
4. Берштейн М.Л., Займовский В.А., Капуткина Л.М. Термомеханическая обработка стали. М.: Металлургия, 1983. 480 с.
5. Pickering F.B. High-strength, low-alloy steels – a decade of progress // Proc. Intern. sympos. high-strength, low-alloy steels Microalloying'75. N.Y.: Union Carbide Corp., 1977, pp. 9–31.

6. Физическое моделирование процессов производства горячекатаного листа с уникальным комплексом свойств / Салганик В.М., Денисов С.В., Полецков П.П., Стеканов П.А., Бережная Г.А., Алексеев Д.Ю. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. №3 (47). С. 37–39.
7. Научно-производственный комплекс «Термодеформ» для создания новых технологий / В.М. Салганик, П.П. Полецков, М.О. Артамонова, С.В. Денисов, Д.Н. Чикишев // Сталь. 2014. № 4. С. 104–107.
8. Лабораторный комплекс для моделирования технологических процессов толстолистовой прокатки / В.М. Салганик, П.П. Полецков, Д.Н. Чикишев, С.В. Денисов, П.А. Стеканов // Металлург. 2014. №10. С. 81–84.
9. Development of heat treatment modes for novel structural sparingly alloyed high-strength steel for arctic and far north applications. Poletskov P.P., Nikitenko O.A., Kuznetsova A.S., Alekseev D.Y. Metal Science and Heat Treatment. 2021. T. 63. №3–4. Pp. 171–177.
10. The study of influence of heat treatment procedures on structure and properties of the new high-strength steel with increased cold resistance / Poletskov P.P., Kuznetsova A.S., Nikitenko O.A., Alekseev D.Yu. // CIS Iron and Steel Review. 2020. T. 20. Pp. 50–54.
11. Koptseva N.V., Chukin M.V., Nikitenko O.A. Use of the Thixomet Pro software for quantitative analysis of the ultrafine-grain structure of low-and medium-carbon steels subjected to equal channel angular pressing. Metal science and heat treatment. 2012. Vol. 54. No. 7–8. P. 387–392.
12. ГОСТ 9013-59. Металлы. Методы измерения твердости по Роквеллу. М.: Изд-во стандартов, 2001. 10 с.

References

1. Nastich S.Yu. Razrabotka tekhnologii termomekhanicheskoy obrabotki polosovogo i listovogo prokata iz nizkolegirovannoy stali na osnove upravleniya formirovaniem ferritno-beynitnoy struktury: dis. d-ra tekhn. nauk [Development of a thermomechanical treatment technology for low-alloy steel strip and sheet products by controlling the formation of a ferrite-bainite structure: Doctoral thesis]. Moscow, 2013. 399 p.
2. Efron L.I. Metallovedenie v «bolshoy» metallurgii. Trubnye stali [Metal science in "big" metallurgy. Pipe steels]. Moscow: Metallurgizdat, 2012, 696 p. (In Russ.)
3. Poletskov P.P., Gushchina M.S., Alekseev D.Yu., Emaleeva D.G., Kuznetsova A.S., Nikitenko O.A. Understanding the effect of controlled rolling regimes for pipe steel on the structural condition of hot-deformed austenite. Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova [Westnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2018, vol. 16, no. 3, pp. 67–77. (In Russ.)
4. Bershtein M.L., Zaimovsky V.A., Kaputkina L.M. Termomekhanicheskaya obrabotka stali [Thermome-

chanical treatment of steel]. Moscow: Metallurgiya, 1983, 480 p. (In Russ.)

5. Pickering F.B. High-strength, low-alloy steels – a decade of progress. Microalloying 75: proceedings of an international symposium on high-strength, low-alloy steels. N.Y.: Union Carbide Corp, 1977, pp. 9–31.
6. Salganik V.M., Denisov S.V., Poletskov P.P., Stekanov P.A., Berezhnaya G.A., Alekseev D.Yu. Physical modeling of production processes of hot-rolled plates with a unique set of properties. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2014, no. 3 (47), pp. 37–39. (In Russ.)
7. Salganik V.M., Poletskov P.P., Artamonova M.O., Denisov S.V., Chikishev D.N. Termodeform Research and Production Complex for developing new technologies. *Stal* [Steel], 2014, no. 4, pp. 104–107. (In Russ.)
8. Salganik V.M., Poletskov P.P., Chikishev D.N., Denisov S.V., Stekanov P.A. Laboratory complex for modeling technological processes of plate rolling. *Metallurg* [Metallurgist], 2014, no. 10, pp. 81–84. (In Russ.)
9. Poletskov P.P., Nikitenko O.A., Kuznetsova A.S., Alekseev D.Yu. Development of heat treatment modes for novel structural sparingly alloyed high-strength steel for Arctic and Far North applications. *Metal Science and Heat Treatment*, 2021, vol. 63, no. 3–4, pp. 171–177.
10. Poletskov P.P., Kuznetsova A.S., Nikitenko O.A., Alekseev D.Yu. The study of influence of heat treatment procedures on structure and properties of the new high-strength steel with increased cold resistance. *CIS Iron and Steel Review*, 2020, vol. 20, pp. 50–54.
11. Koptseva N.V., Chukin M.V., Nikitenko O.A. Use of the Thixomet Pro software for quantitative analysis of the ultrafine-grain structure of low-and medium-carbon steels subjected to equal channel angular pressing. *Metal Science and Heat Treatment*, 2012, vol. 54, no. 7–8, pp. 387–392.
12. State standard GOST 9013-59. Metals. Methods for measuring Rockwell hardness. Moscow: Standards Publishing House, 2001, 10 p. (In Russ.)

Поступила 28.03.2022; принята к публикации 11.04.2022; опубликована 28.06.2022
Submitted 28/03/2022; revised 11/04/2022; published 28/06/2022

Полецков Павел Петрович – доктор технических наук, директор инженерного центра, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: pavel_poletskov@mail.ru. ORCID 0000-0001-9209-7759

Алексеев Даниил Юрьевич – инженер-исследователь, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: d.u.alekseev@mail.ru

Кузнецова Алла Сергеевна – младший научный сотрудник, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: allakuznetsova.mgtu@mail.ru

Гулин Александр Евгеньевич – кандидат технических наук, младший научный сотрудник, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: a.gulin@mgtu.ru. ORCID 0000-0002-7722-4112

Емалеева Динара Гумаровна – кандидат технических наук, младший научный сотрудник, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: emaleevadg@mail.ru. ORCID 0000-0002-2217-180X

Pavel P. Poletskov – DSc (Eng.), Director of the Engineering Center, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: pavel_poletskov@mail.ru. ORCID 0000-0001-9209-7759

Daniil Yu. Alekseev – research engineer, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: d.u.alekseev@mail.ru

Alla S. Kuznetsova – junior researcher, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: allakuznetsova.mgtu@mail.ru

Aleksandr E. Gulin – PhD (Eng.), junior researcher, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: a.gulin@mgtu.ru. ORCID 0000-0002-7722-4112

Dinara G. Emaleeva – PhD (Eng.), junior researcher, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: emaleevadg@mail.ru. ORCID 0000-0002-2217-180X

НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

NANOMATERIALS AND NANOTECHNOLOGIES

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

УДК 620.186

DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-2-98-106



ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫХ И МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ ПОВЕРХНОСТИ ТОПОКОМПОЗИТА НА ОСНОВЕ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА ПРИ ИОННО-ПЛАЗМЕННОМ И ЛАЗЕРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Теплоухов А.А.¹, Полещенко К.Н.², Несов С.Н.¹, Семенюк Н.А.¹, Серопян Г.М.³, Сычев С.А.³,
Ласица А.М.¹, Чуранкин В.Г.¹

¹Омский государственный технический университет, Омск, Россия

²Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, Омск, Россия

³Омский государственный университет имени Ф.М. Достоевского, Омск, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Усовершенствование современной техники выдвигает новые и более высокие требования к физико-механическим свойствам полимерных композиционных материалов, широко применяемых в узлах трибосопряжения. Это обуславливает актуальность задачи создания новых полимерных топокомпозитов триботехнического назначения с высокими физико-механическими и триботехническими свойствами. Однако получение металлизированных покрытий на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ) требует изучения физических явлений и процессов, сопровождающих то или иное энергетическое воздействие на полимерный материал. Основной задачей является исследование особенностей структурно-фазовых изменений поверхностного и приповерхностного слоев, а также изучение особенностей эволюции морфологии и состава наноструктурированного топокомпозита на основе ПТФЭ при ионно-плазменном и лазерном воздействиях. **Используемые методы.** Для решения данной задачи применяется поверхностная модификация полимерной матрицы молибденом методом магнетронного распыления с последующим лазерным воздействием. **Новизна.** Впервые исследованы структурно-фазовые и морфологические аспекты при формировании топокомпозитов на основе ПТФЭ при различных условиях лазерного воздействия. Установлено, что в результате лазерного воздействия на пленку молибдена наблюдается изменение соотношения концентраций элементного состава поверхности, что приводит к уменьшению отношения атомарных концентраций молибдена к кислороду. Анализ химического состава пленки молибдена показал наличие металлического молибдена, а также наличие оксида молибдена (II) и оксида молибдена (III). Выявлено, что при увеличении плотности энергии лазерного воздействия растет доля высшего оксида молибдена MoO_3 на поверхности. **Результат.** Проведены исследования эволюции морфологии поверхности и изменения структурно-фазового состояния приповерхностных слоев. Установлены эффекты лазерного воздействия, связанные с образованием частиц кристаллического строения. **Практическая значимость.** Наличие оксидов молибдена в составе покрытия является положительным фактором, способствующим повышению антифрикционных свойств и работоспособности металлополимерной трибосистемы.

Ключевые слова: политетрафторэтилен, морфология, структурно-фазовое состояние, наноструктурные топокомпозиты, ионно-плазменное напыление, лазерная имплантация.

© Теплоухов А.А., Полещенко К.Н., Несов С.Н., Семенюк Н.А., Серопян Г.М., Сычев С.А., Ласица А.М., Чуранкин В.Г., 2022

Для цитирования

Особенности структурно-фазовых и морфологических изменений поверхности топокомпозита на основе политетрафторэтилена при ионно-плазменном и лазерном воздействии / Теплоухов А.А., Полещенко К.Н., Несов С.Н., Семенюк Н.А., Серопян Г.М., Сычев С.А., Ласица А.М., Чуранкин В.Г. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №2. С. 98–106. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-2-98-106>



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

FEATURES OF STRUCTURAL PHASE AND MORPHOLOGICAL CHANGES OF THE SURFACE OF PTFE-BASED TOPOCOMPOSITES EXPOSED TO ION-PLASMA AND LASER IMPACT

Teploukhov A.A.¹, Poleshchenko K.N.², Nesov S.N.¹, Semenyuk N.A.¹, Seropyan G.M.³, Sychev S.A.³, Lasitsa A.M.¹, Churankin V.G.¹

¹Omsk State Technical University, Omsk, Russia

²Siberian State Automobile and Highway University, Omsk, Russia

³Dostoevsky Omsk State University, Omsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The development of modern technologies sets new and higher requirements for physical and mechanical properties of polymer composite materials that are widely used in the nodes of tribosystems. This determines relevance of the task of creating new tribotechnical polymer topocomposites with high physical, mechanical and tribotechnical properties. However, the production of metallized coatings on the surface of polytetrafluoroethylene requires the study of physical phenomena and processes, accompanying the energy effect on the polymer material. The main aim is to study the features of structural phase transformations of the surface and near-surface layers, as well as the evolution of morphology and the composition of nanostructured PTFE-based topocomposites under ion-plasma and laser treatment. **Methods Applied.** To solve this problem, a molybdenum layer was deposited on the polymer surface by magnetron sputtering followed by laser treatment. **Originality.** Structural phase and morphological aspects were originally studied in the formation of topocomposites based on polytetrafluoroethylene under various conditions of laser exposure. It is established that laser exposure on the molybdenum film results in a change in the ratio of concentrations of the surface elemental composition, entailing a lower ratio of the number of molybdenum and oxygen atoms. The analysis of the chemical composition of the molybdenum film showed the presence of metallic molybdenum, molybdenum (II) oxide and molybdenum (III) oxide. It has been found that with an increase in the energy density of laser radiation, the fraction of higher molybdenum oxide MoO_3 on the surface increases. **Result.** The evolution of surface morphology and changes in the structural phase state of near-surface layers were studied. The effects of laser exposure associated with the formation of crystalline particles were established. **Practical Relevance.** The formation of molybdenum oxides in the coating composition is a positive factor that improves the antifriction properties and working capacity of the metal-polymer tribosystems.

Keywords: polytetrafluoroethylene, morphology, structural phase state, nanostructured topocomposites, ion-plasma sputtering, laser implantation.

For citation

Teploukhov A.A., Poleshchenko K.N., Nesov S.N., Semenyuk N.A., Seropyan G.M., Sychev S.A., Lasitsa A.M., Churankin V.G. Features of Structural Phase and Morphological Changes of the Surface of PTFE-Based Topocomposites Exposed to Ion-Plasma and Laser Impact. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 2, pp. 98–106. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-2-98-106>

Введение

Актуальность работы обусловлена созданием новых материалов для конструктивных элементов трибосистем, испытывающих трение и воздействие экстремальных температур, в частности многофункциональных нанокомпозитов на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ). Проведённый анализ перспективных разработок в области создания новых полимерных композиционных материалов (ПКМ) на основе политетрафторэтилена показал, что основные усилия исследователей и разработчиков направлены на решение задач повышения их износостойкости

путём объемной модификации [1, 2]. Авторами работы [3] показано, что использование модификаторов позволяет не только улучшить физико-химические свойства ПКМ, но и повысить долговечность трибосопряжений.

В то же время возможности совершенствования ПТФЭ в направлении решения задач инженерии поверхности мало изучены. Как показывает анализ полученных данных, работы в этом направлении ведутся весьма успешно [4-8]. Для указанных задач используются, в основном, методы поверхностного ионно-лучевого и электронно-лучевого модифицирования, приводящие к тем или иным структур-

но-фазовым изменениям приповерхностных слоёв ПТФЭ [4, 6].

При этом, как показывают результаты работы [9], многообещающим является конструирование на основе ПТФЭ нанокомпозитных и градиентных материалов, а также наноструктурных топокомпозитов, в том числе с использованием ионно-плазменных покрытий. Ионно-плазменное напыление молибдена на поверхность ПТФЭ и дальнейшее формирование оксидных фаз молибдена позволит улучшить антифрикционные свойства металлополимерной трибопары [10]. Вместе с тем следует отметить, что получение металлизированных покрытий на ПТФЭ является нетривиальной технологической задачей, требующей изучения физических явлений и процессов, сопровождающих то или иное энергетическое воздействие на полимерный материал.

Целью работы является исследование особенностей структурно-фазовых изменений поверхностного и приповерхностного слоёв, а также изучение особенностей эволюции морфологии и состава наноструктурированного топокомпозита на основе ПТФЭ при ионно-плазменном и лазерном воздействиях.

Методы и материалы

Исследуемые образцы были получены из высокомолекулярного порошка ПТФЭ по методике, описанной в работе [5]. На поверхность ПТФЭ методом магнетронного напыления в среде аргона наносилась пленка молибдена на установке ADVAVAS VSM200. Перед магнетронным напылением методом лазерной абляции на поверхности образцов из ПТФЭ формировались наноразмерные кластеры Cu. После лазерной абляции дополнительно проводилась активация поверхности ПТФЭ ионами аргона в течение 10 мин. Далее наносилось молибденовое покрытие в среде аргона. Время формирования покрытия составляло 120 мин. Температура подложки составляла 50°C. Затем на образцы ПТФЭ с покрытием с помощью твердотельного импульсного лазера с частотой 0,282 ГГц, длительностью импульса 16 нс осуществлялось лазерное воздействие, плотность энергии которого изменялась дискретно в диапазоне $Q = 0,18\text{--}0,72 \text{ Дж/см}^2$. Указанная последовательность обработки проводилась, с одной стороны, для обеспечения улучшения взаимодействия покрытия с основой, с другой – для изучения возможностей инициирования процессов морфологических изменений

покрытия, и возможностей изменения химического состава за счёт формирования новых фаз.

В результате были получены пять образцов (табл. 1).

Таблица 1. Исследуемые образцы

Table 1. Test samples

Номер образца	Образец	$Q, \text{Дж/см}^2$
1		-
2	ПТФЭ–100 мас. % + лазерная	0,18
3	абляция + Mo (пленка) + лазерное	0,36
4	воздействие	0,54
5		0,72

Для определения элементного состава и изучения влияния модификаторов на структуру поверхностного слоя модифицированной полимерной матрицы ПТФЭ использовался метод рентгеноспектрального анализа при помощи сканирующего электронного микроскопа JEOL JCM-5700 при ускоряющем напряжении 20 кВ, ток пучка – 1,0 нА.

Анализ структурно-фазового состояния поверхности образцов проводился с использованием метода рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) с использованием установки Surface Science Center (Riber). Спектры РФЭС измерялись в условиях сверхвысокого вакуума ($\sim 10^{-9}$ Торр). Мощность источника составляла 240 Вт. Разрешение по энергии при регистрации спектров остевых линий составляло $\sim 0,2$ эВ, обзорных спектров $\sim 1,2$ эВ. Оценочная глубина сканирования образцов методом РФЭС составила 1–5 нм. Исследовались как исходная поверхность образцов, так и их поверхность после ионного травления. Ионное травление поверхности проводилось при энергии ионов аргона 3 кэВ, глубина травления составила порядка 10 нм.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 приведено электронно-микроскопическое изображение поверхности покрытия, нанесённого на ПТФЭ. Видно, что после нанесения пленки молибдена на поверхность ПТФЭ структура модифицированной поверхности характеризуется наличием разупорядоченно-ориентированных полос. Кроме того, на поверхности наблюдаются трещины и складки, что согласуется с результатами работы [4].



Рис. 1. Электронно-микроскопическое изображение поверхности образца №1
Fig. 1. Electron microscopic image of the surface of sample No. 1

В табл. 2 приведены данные о химическом составе образца №1 после нанесения покрытия, полученные методом растровой электронной микроскопии.

Таблица 2. Состав поверхностного слоя образца №1
Table 2. Composition of the surface layer of sample No. 1

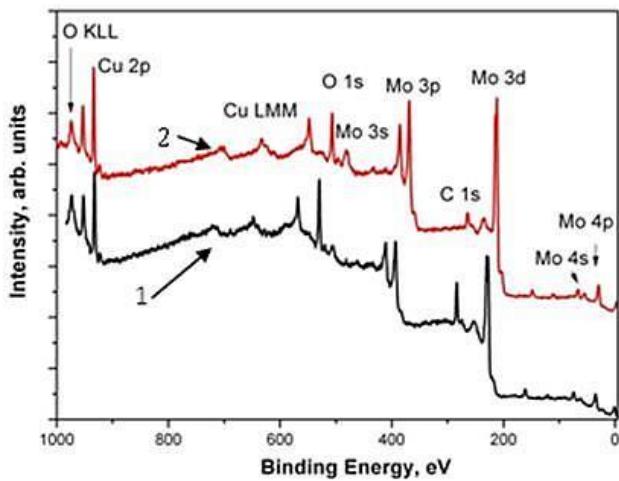
Концентрация, ат. %			[Mo]/[O]
[Mo]	[O]	[C]	
49,1	28,1	22,8	1,75

По данным табл. 2 видно, что после магнетронного напыления в поверхностном слое присутствуют Mo, O и C. Отношение молибдена к кислороду составляет 1,75.

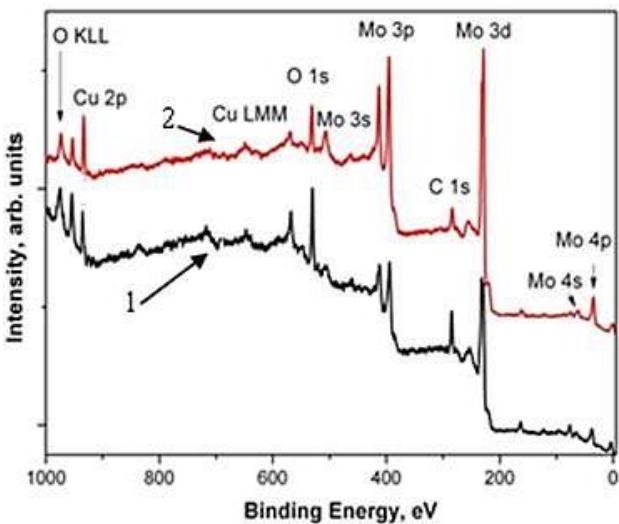
На рис. 2 представлены обзорные РФЭС-спектры для образцов №2 и 3 как исходных поверхностей, так и поверхностей образцов после ионного травления. В спектрах присутствуют линии молибдена, меди, кислорода и углерода. Появление меди на поверхности может быть обусловлено сегрегационными явлениями, проходящими вследствие лазерного воздействия.

Из обзорных спектров видно, что после ионного травления снижается интенсивность линий углерода и кислорода, а интенсивность линий молибдена, напротив, увеличивается. Это указывает на то, что углерод на поверхности присутствует в виде поверхностных загрязнений и его содержание снижается при увеличении расстояния от поверхности. Снижение количества кислорода после ионного травления указывает также на присутствие естественного оксида молиб-

дена на поверхности. Однако даже после травления линия кислорода достаточно интенсивна. Это указывает на то, что даже в объеме образца молибден присутствует не только в металлическом состоянии, но и в виде оксида. Появление меди на поверхности после лазерного воздействия может быть обусловлено сегрегационными явлениями.



а



б

Рис. 2. Обзорный РФЭС-спектр: а – для образца №2; б – для образца №3; 1 – исходная поверхность; 2 – поверхность после ионного травления
Fig. 2. Overview XPS spectrum: a is for sample No. 2; b is for sample No. 3; 1 is an original surface; 2 is a surface after ion etching

В табл. 3 представлены результаты рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии поверхности образцов. При сравнении данных можно увидеть, что состав поверхностей образцов №2 и 3 достаточно близок. Как для образца №2, так и для образца №3 после ионного травления наблюдается

увеличение в составе поверхностного слоя концентрации молибдена и меди, при этом концентрации углерода и кислорода уменьшаются. Однако в образце №2 наблюдается более высокое содержание кислорода по сравнению с образцом №3.

Таблица 3. Химический состав поверхностного слоя, ат.% данных РФЭС

Table 3. Chemical composition of the surface layer, at.% according to XPES

Номер образца	Исследуемая поверхность	Концентрация, ат.%			
		[Mo]	[Cu]	[C]	[O]
2	Исходная поверхность	31,5	6,7	32,9	28,9
	Поверхность после травления	46,2	9,4	19,5	24,9
3	Исходная поверхность	32,7	6,3	34,3	26,7
	Поверхность после травления	48,4	9,8	19,3	22,5

Для более детального анализа были использованы спектры линии молибдена 3d (рис. 3). Максимум линии Mo 3d5/2 расположен на энергии связи ~ 228 эВ, что соответствует металлическому молибдену. Однако в спектре, измеренном до травления, присутствует высокоэнергетический компонент на энергии связи ~ 235 эВ, наличие которого указывает на присутствие оксида MoO_3 . После ионного травления данного компонента не наблюдается (линия 2 на рис. 3, а). Наличие кислорода в обзорном спектре образца после травления (см. рис. 2) указывает на наличие оксида молибдена, поэтому было проведено разложение спектра молибдена после травления (рис. 3, б) [9].

Проведенное исследование показывает, что в спектре кроме компонентов, отвечающих металлическому молибдену 228,1–228,3 эВ [11], присутствуют также компоненты оксида молибдена. Положение их максимумов свидетельствует, что это оксид MoO_2 [9]. Интенсивность компонентов пропорциональна их концентрации. Соответственно, в объеме преобладает металлический молибден, на долю окисленных атомов молибдена приходится не более 15%.

Сравнение РФЭС-спектров Mo 3d (см. рис. 3) показывает, что химическое состояние молибдена в образце №2 также аналогично состоянию молибдена в образце №3. То есть на поверхности присутствует оксид MoO_3 , а после ионного травления присутствует металлический молибден и некоторая доля молибдена в составе низших оксидов MoO_2 .

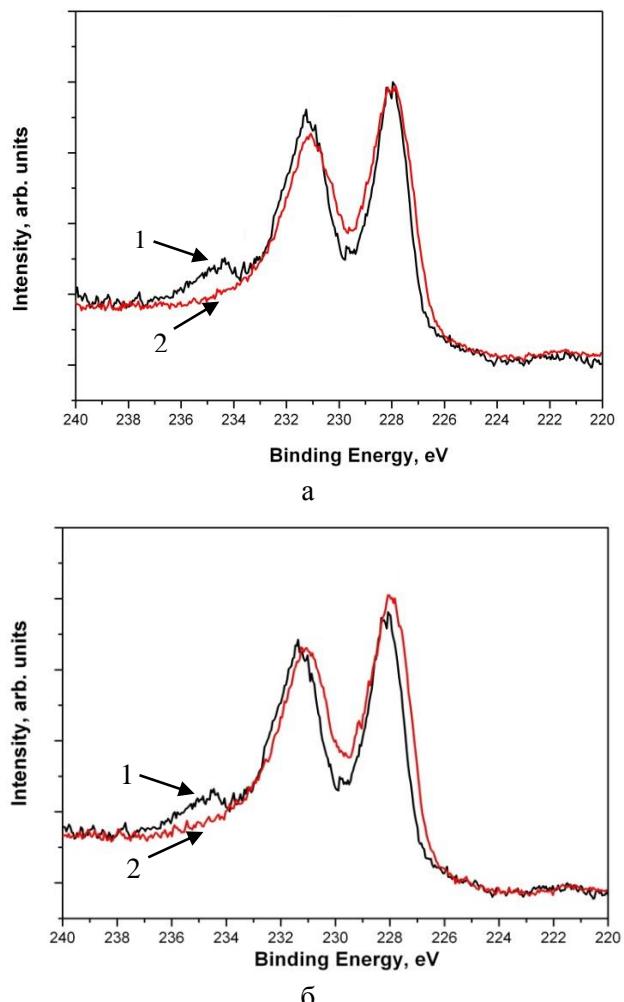


Рис. 3. РФЭС-спектры Mo 3d-образца №2:
а – для образца №2; б – для образца №3;
1 – исходная поверхность; 2 – поверхность после ионного травления

Fig. 3. XPES spectra of Mo of 3d sample No. 2:
a is for sample No. 2; b is for sample No. 3;
1 is an original surface; 2 is a surface after ion etching

На рис. 4 представлены микрофотографии образцов №2 и 3, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа. Из рисунка видно, что лазерное воздействие приводит к формированию на поверхности пленки молибдена плотноупакованных элементов размером порядка от 1 до 3 мкм, которые можно идентифицировать как участки с отдельными частицами оксида молибдена или их агломератами.

На рис. 5 представлены обзорные РФЭС-спектры образца №5. В спектре присутствуют линии молибдена, меди, кислорода, углерода. По составу и химическому состоянию образец №4 практически идентичен образцу №5.

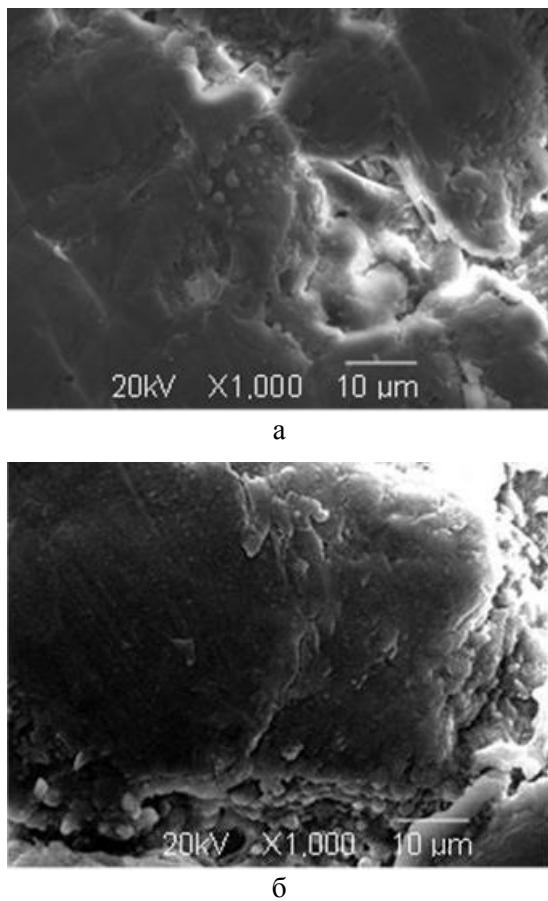


Рис. 4. Микрофотографии образцов:
а – №2; б – №3

Fig. 4. Micrographs of samples:
a is No. 2; b is No. 3

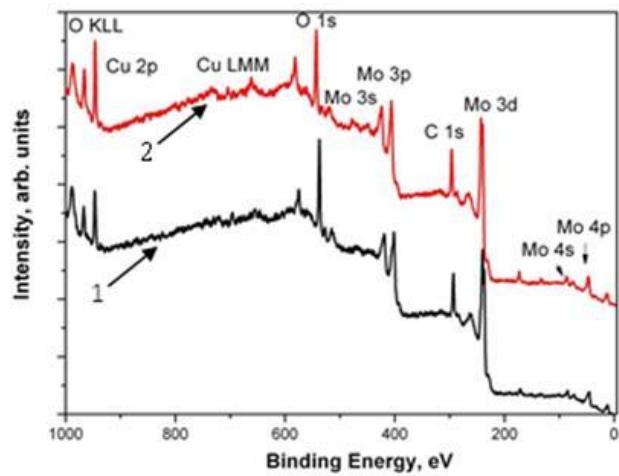


Рис. 5. Обзорные РФЭС-спектры образца № 5:
1 – исходная поверхность; 2 – поверхность
после ионного травления

Fig. 5. Overview XPS spectra of sample No. 5: 1 is an original surface; 2 is a surface after ion etching

В табл. 4 представлены результаты количественного анализа поверхности образца №4.

Таблица 4. Химический состав поверхностного слоя,
ат.% данным РФЭС

Table 4. Chemical composition of the surface layer,
at.% according to XPS

Номер образца	Исследуемая поверхность	Концентрация, ат.%			
		[Mo]	[Cu]	[C]	[O]
4	Исходная поверхность	30,6	4,4	34,1	30,9
	Поверхность после травления	32,3	6,2	34,9	26,6
5	Исходная поверхность	30,0	4,6	33,7	31,7
	Поверхность после травления	32,0	6,3	34,2	27,5

Как видно, для данных образцов не наблюдается значительного изменения состава после ионного травления. Однако по сравнению с образцами №2 и 3 наблюдается уменьшение концентраций молибдена и меди как в приповерхностном слое исходных образцов, так и после ионного травления. Наряду с этим наблюдается рост концентраций углерода и кислорода. Исходя из вышесказанного, можно предположить, что увеличение плотности энергии лазерного воздействия до значений 0,54 и 0,72 Дж/см², приводящее к формированию оксидов молибдена на поверхности, происходит вследствие процессов атомного перемешивания.

На рис. 6 представлены спектры линии молибдена 3d, измеренные на исходной поверхности образца №5, а также после ионного травления.

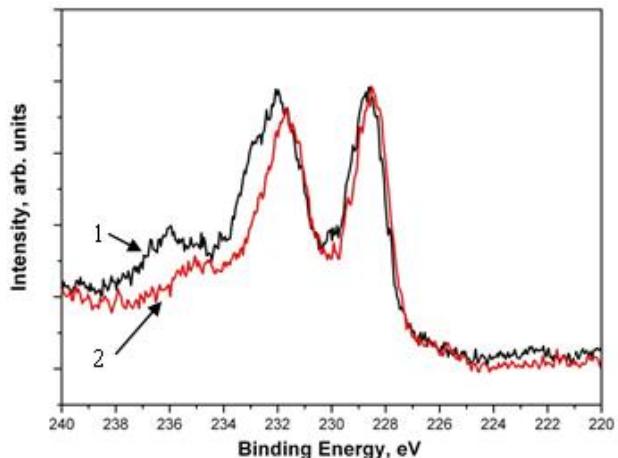


Рис. 6. РФЭС-спектры Mo 3d-образца №5:

1 – исходная поверхность;
2 – поверхность после ионного травления

Fig. 6. XPS spectra of Mo of 3d sample No. 5:
1 is an original surface;
2 is a surface after ion etching

Из **рис. 6** видно, что наблюдается увеличение количества высшего оксида молибдена MoO_3 , что соответствует значениям энергии в диапазоне 232,5–233,5 эВ и согласуется с данными, приведенными в работе [11]. При сравнении спектров образца №5 (см. **рис. 5**) с образцами №2 (см. **рис. 3, а**) и №3 (см. **рис. 3, б**) видно, что доля высшего оксида для образца №5 заметно выше.

На **рис. 7** представлены микрофотографии образцов №4 и 5, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа.

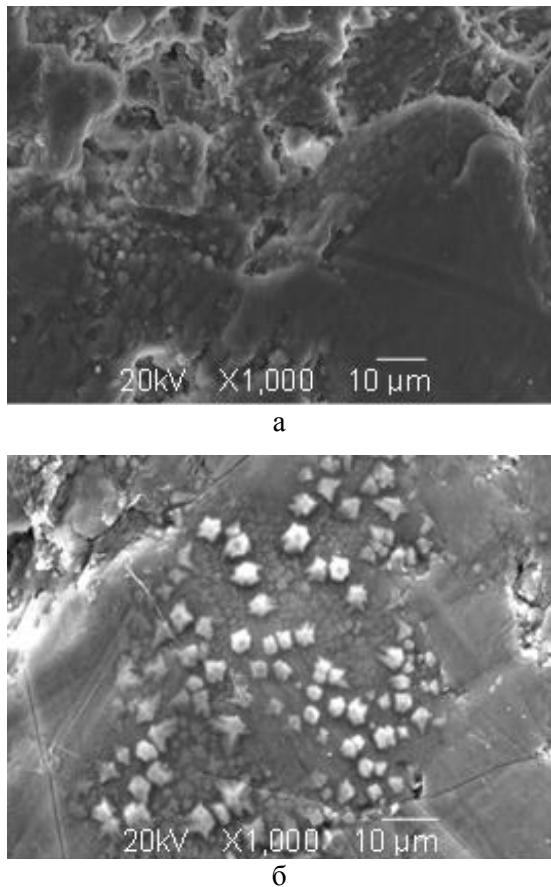


Рис. 7. Микрофотографии образцов: а – образец №4; б – образец №5

Fig. 7. Micrographs of samples: a is sample No. 4; b is sample No. 5

Полученные данные показывают, что поверхность образца №5 характеризуется специфической морфологией, отличающейся наличием мелкокристаллических частиц оксида молибдена, а также присутствием элементов меди, углерода и кислорода. Аналогичный результат был получен и для образца №4. С увеличением плотности энергии лазерного воздействия до 0,72 Дж/см² наблюдается рост частиц оксида молибдена MoO_3 кристаллического строения до размеров 7–8 мкм.

Заключение

В результате проведённых исследований установлен ряд структурных, фазовых и морфологических изменений:

1. Установлено, что при поверхностной модификации поверхности ПТФЭ молибденом структура поверхности образца характеризуется наличием разупорядоченно-ориентированных полос, а также складок и трещин. Отношение атомарных концентраций молибдена к кислороду составляет 1,75.

2. В результате лазерного воздействия на пленку молибдена наблюдается изменение соотношения концентраций элементного состава поверхности, что приводит к уменьшению отношения атомарных концентраций молибдена к кислороду. Анализ химического состава пленки молибдена показал наличие металлического молибдена, а также его оксидов MoO_2 и MoO_3 .

3. Данные РФЭС позволяют говорить об окислении молибдена в приповерхностном слое и возможной диффузии свободного углерода с поверхности в приповерхностную область при лазерном воздействии.

4. Выявлено, что лазерное воздействие также приводит к появлению частиц оксида молибдена (III) кристаллического строения, а с увеличением плотности энергии лазерного воздействия с 0,18 до 0,72 Дж/см² наблюдается рост данных частиц на 60%.

Список литературы

- Новый наноматериал: металлоксодержащий политетрафторэтилен / М.С. Коробов, Г.Ю. Юрков, А.В. Козинкин и др. // Неорганические материалы. 2004. Т. 40, № 1. С. 31–40.
- Механохимические методы получения композитных материалов металл-керамика-политетрафторэтилен / О.И. Ломовский, А.А. Политов, Д.В. Дудина и др. // Химия в интересах устойчивого развития. 2004. №12. С. 619–626.
- Машков Ю.К., Кропотин О.В., Чемисенко О.В. Разработка и исследование полимерного нанокомпозита для металлополимерных узлов трения // Омский научный вестник. 2014. Т. 133 (3). С. 64–66.
- Лапуть О.А., Курзина И.А., Пухова И.В. Модификация поверхности поливинилового спирта и политетрафторэтилена методом ионной имплантации // Материалы и технологии новых поколений в современном материаловедении: сборник трудов международной конференции, 9–11 июня 2016 г. Томск: Изд-во ТПУ, 2016. С. 250–256.
- Исследование структурообразования в политетрафторэтилене, наполненном алюминием, после

взрывного прессования / Н.А. Адаменко, А.В. Казуров, Д.В. Савин и др. // Материаловедение. 2021. №4. С. 26–32.

6. Пухова И.В. Модификация поверхности ПТФЭ ионно-лучевым воздействием // Сборник докладов XIV Международной школы-семинара «Эволюция дефектных структур в конденсированных средах» (ЭДС – 2016) 12–17 сентября 2016 г. Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2016. С.141.

7. Effects of ion- and electron-beam treatment on surface physicochemical properties of polytetrafluoroethylene / I.V. Vasenina [et. al] // Surface and coatings technology. 2018. V. 334. Pp. 134–141.

8. Особенности структурообразования наноразмерных покрытий политетрафторэтилена при осаждении из газовой фазы / А.А. Рогачев, А.П. Лучников, М.А. Ярмоленко и др. // Наноматериалы и наноструктуры - XXI век. 2015. №1. С. 29–40.

9. Получение слоисто-армированного нанокомпозита на основе политетрафторэтилена методами лазерной абляции и ионно-плазменного модифицирования / Машков Ю.К., Полещенко К.Н., Еремин Е.Н. и др.// Упрочняющие технологии и покрытия. 2020. Т. 16, №12(192). С. 531–538.

10. Бондарев А.В., Кирюханцев-Корнеев Ф.В., Штанский Д.В. Твердые износостойкие покрытия TiAlSiCN/MoSeC с низким коэффициентом трения при комнатной и повышенных температурах // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2013. № 4. С. 60–67.

11. Oshikawa K., Nagai M., Omi S. Characterization of Molybdenum Carbides for Methane Reforming by TPR, XRD, and XPS // J. Phys. Chem. B. 2001. Vol. 105. Pp. 9124–9131.

References

1. Korobov M.S., Yurkov G.Yu., Kozinkin A.V. et al. A novel nanomaterial: metal-containing polytetrafluoroethylene. *Neorganicheskie materialy* [Inorganic Materials], 2004, no. 40(1), pp. 31–40. (In Russ.)
2. Lomovsky O.I., Politov A.A., Dudina D.V. et al. Mechanochemical methods for producing metal-ceramics-polytetrafluoroethylene composite materials. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya* [Chemistry for Sustainable Development], 2004, no. 12, pp. 619–626. (In Russ.)
3. Mashkov Yu.K., Kropotin O.V., Chemisenko O.V. Development and research of a polymer nanocomposite for metal polymer friction units. *Omsky nauchny vestnik* [Omsk Scientific Bulletin], 2014, vol. 133 (3), pp. 64–66. (In Russ.)
4. Laput O.A., Kurzina I.A., Pukhova I.V. Modification of the surface of polyvinyl alcohol and polytetrafluoroethylene by ion implantation. *Materialy i tekhnologii novykh pokoleniy v sovremenном materialovedenii: sbornik trudov mezhunarodnoy konferentsii*. [Materials and technologies of new generations in modern materials science: Proceedings of the International Conference, June 9–11, 2016]. Tomsk: Publishing House of Tomsk Polytechnic University], 2016, pp. 250–256. (In Russ.)
5. Adamenko N.A., Kazurov A.V., Savin D.V. et al. Research on the structure formation in polytetrafluoroethylene filled with aluminum after explosive pressing. *Materialovedenie* [Materials Science], 2021, no 4, pp. 26–32. (In Russ.)
6. Pukhova I.V. Modification of the PTFE surface by ion-beam exposure. *Sbornik dokladov XIV Mezhunarodnoy shkoly-seminara «Evolutsiya defektnykh struktur v kondensirovannykh sredakh» (EDS – 2016)* [Collection of reports of the 14th International School-Seminar "Evolution of defective structures in condensed media" (EDS–2016), September 12–17, 2016. Barnaul: Publishing House of Altai State Technical University], 2016, p. 141. (In Russ.)
7. Vasenina I.V. et. al Effects of ion- and electron-beam treatment on surface physicochemical properties of polytetrafluoroethylene. *Surface and Coatings Technology*, 2018, vol. 334, pp. 134–141.
8. Rogachev A.A., Luchnikov A.P., Yarmolenko M.A. et al. Features of the structure formation of nanoscale polytetrafluoroethylene coatings during deposition from the gas phase. *Nanomaterialy i nanostruktury - XXI vek* [Nanomaterials and Nanostructures – the 21st Century], 2015, no. 1, pp. 29–40. (In Russ.)
9. Mashkov Yu.K., Poleshchenko K.N., Eremin E.N. et al. Producing a layered reinforced polytetrafluoroethylene-based nanocomposite by laser ablation and ion-plasma modification. *Uprchnyayushchie tekhnologii i pokrytiya* [Hardening Technologies and Coatings], 2020, vol. 16, no. 12(192), pp. 531–538. (In Russ.)
10. Bondarev A.V., Kiryukhantsev-Korneev F.V., Shtansky D.V. Solid wear-resistant coatings TiAlSiCN/MoSeC with a low coefficient of friction at room and elevated temperatures. *Izvestiya vuzov. Poroshkovaya metallurgiya i funktsionalnye pokrytiya* [Universities' Proceedings. Powder Metallurgy and Functional Coatings], 2013, no. 4, pp. 60–67. (In Russ.)
11. Oshikawa K., Nagai M., Omi S. Characterization of molybdenum carbides for methane reforming by TPR, XRD, and XPS. *J. Phys. Chem. B*, 2001, vol. 105, pp. 9124–9131.

Поступила 04.04.2022; принята к публикации 18.04.2022; опубликована 28.06.2022
Submitted 04/04/2022; revised 18/04/2022; published 28/06/2022

Теплоухов Андрей Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, главный энергетик, Омский государственный технический университет, Омск, Россия.
Email: a.a.lektor@mail.ru. ORCID 0000-0002-5649-2871

Полещенко Константин Николаевич – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник научно-исследовательского отдела, Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), Омск, Россия.
Email: k_poleschenko@mail.ru. ORCID 0000-0002-8623-4777

Несов Сергей Николаевич – кандидат физико-математических наук, доцент, Омский государственный технический университет, Омск, Россия.
Email: nesov55@mail.ru. ORCID 0000-0003-0421-3356

Семенюк Наталья Андреевна – кандидат технических наук, доцент, Омский государственный технический университет, Омск, Россия.
Email: sem-natal@mail.ru. ORCID 0000-0003-0103-7684

Серопян Геннадий Михайлович – кандидат физико-математических наук, доцент, Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, Омск, Россия.
Email: ser_gm@mail.ru. ORCID 0000-0001-8626-2893

Сычев Сергей Александрович – кандидат физико-математических наук, доцент, Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, Омск, Россия.
Email: sychev226@mail.ru. ORCID 0000-0003-3849-8927

Ласица Александр Михайлович – кандидат технических наук, доцент, Омский государственный технический университет, Омск, Россия.
Email: lasitsa@mail.ru. ORCID 0000-0002-7187-6400

Чуранкин Вячеслав Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент, Омский государственный технический университет, Омск, Россия.
Email: vgchurankin@omgtu.ru. ORCID 0000-0002-6031-1340

Andrey A. Teploukhov – PhD (Eng.), Associate Professor, Chief Power Engineer, Omsk State Technical University, Omsk, Russia.
Email: a.a.lektor@mail.ru. ORCID 0000-0002-5649-2871

Konstantin N. Poleschenko – DrSc (Eng.), Professor, Chief Researcher of the Research Department, Siberian State Automobile and Highway University, Omsk, Russia.
Email: k_poleschenko@mail.ru. ORCID 0000-0002-8623-4777

Sergey N. Nesov – PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor, Omsk State Technical University, Omsk, Russia.
Email: nesov55@mail.ru. ORCID 0000-0003-0421-3356

Natalya A. Semenyuk – PhD (Eng.), Associate Professor, Omsk State Technical University, Omsk, Russia.
Email: sem-natal@mail.ru. ORCID 0000-0003-0103-7684

Gennady M. Seropyan – PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor, Dostoevsky Omsk State University, Omsk, Russia.
Email: ser_gm@mail.ru. ORCID 0000-0001-8626-2893

Sergey A. Sychev – PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor, Dostoevsky Omsk State University, Omsk, Russia.
Email: sychev226@mail.ru. ORCID 0000-0003-3849-8927

Aleksandr M. Lasitsa – PhD (Eng.), Associate Professor, Omsk State Technical University, Omsk, Russia.
Email: lasitsa@mail.ru. ORCID 0000-0002-7187-6400

Vyacheslav G. Churankin – PhD (Eng.), Associate Professor, Omsk State Technical University, Omsk, Russia.
Email: vgchurankin@omgtu.ru. ORCID 0000-0002-6031-1340



СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОСЛОЙНОГО ФОРМИРОВАНИЯ НАНОСТРУКТУРНЫХ ТОПОКОМПОЗИТОВ МЕТОДАМИ ИОННО-ВАКУУМНОЙ ОБРАБОТКИ НА ОСНОВЕ СТРУКТУРНО-ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО ПОДХОДА

Коротаев Д.Н.¹, Тарасов Е.Е.², Полещенко К.Н.³, Теплоухов А.А.⁴, Семенюк Н.А.⁴, Орлов П.В.³, Чуранкин В.Г.⁴, Ласица А.М.⁴

¹Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе, Москва, Россия

²Федеральный научно-производственный центр «Прогресс», Омск, Россия

³Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, Омск, Россия

⁴Омский государственный технический университет, Омск, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Актуальность работы обусловлена необходимостью управления процессами структурной модификации поверхностных и приповерхностных слоёв при формировании наноструктурных топокомпозитов на основе термодинамического подхода. Основная проблема заключается в необходимости разработки теории, позволяющей целенаправленно влиять на процессы послойной ионно-вакуумной модифицирующей обработки при создании наноструктурных топокомпозитов. **Используемые методы.** Теоретическую основу исследования составили положения развивающегося авторами структурно-термодинамического подхода к анализу плазменных процессов. Экспериментальные результаты получены методами как ионно-плазменной, ионно-лучевой обработки, так и при ионном ассистировании в условиях каскадного перекрёстного эффекта. Для нанесения промежуточного оксидированного слоя применялись методики химического модифицирования поверхности: оксидирования и пассивации. Для исследования морфологии и адгезионных свойств систем «покрытие-интерфейс-основа» применялись методы электронной, зондовой микроскопии, а также скретч-тестирования образцов. **Новизна.** Разработана структурно-термодинамическая модель, раскрывающая природу эффектов модификации в системе «покрытие-интерфейс-основа» на микро-, субмикро- и наноструктурном уровнях под воздействием ионно-плазменных потоков. Установлена связь между термодинамическими параметрами и технологическими режимами ионно-вакуумной обработки, раскрывающая возможности управления процессами структурной модификации поверхностных и приповерхностных слоёв. Обнаружено формирование квазиволновых мультимодальных наноразмерных структур. **Результат.** На основе термодинамического анализа структурной модификации установлено, что формирование градиентного строения топокомпозитов определяется активационными структурными процессами и управляет плотностью энергетического потока и реакцией материала на него, а диссипативными – интенсивностью энергомассопереноса в модифицируемой поверхности материала. Определяющей характеристикой формирования типа структурно-фазовых состояний и их протяжённостью (глубиной) в системе «покрытие-интерфейс-основа» является энергетический дисбаланс между активационными процессами, определяемыми интенсивностью ионно-вакуумного воздействия и диссипативными явлениями структурной релаксации материала основы. **Практическая значимость.** Результаты структурно-термодинамического анализа процессов модификации позволяют целенаправленно формировать различные типы градиентных топокомпозитов с заданной структурой и составом покрытий, интерфейса и приповерхностных слоёв материала основы.

Ключевые слова: структурно-термодинамический подход, эффекты модификации, ионно-плазменная обработка, система «покрытие-интерфейс-основа», градиентные топокомпозиты, интенсивность ионно-вакуумного воздействия.

© Коротаев Д.Н., Тарасов Е.Е., Полещенко К.Н., Теплоухов А.А., Семенюк Н.А., Орлов П.В., Чуранкин В.Г., Ласица А.М., 2022

Для цитирования

Совершенствование технологии послойного формирования наноструктурных топокомпозитов методами ионно-вакуумной обработки на основе структурно-термодинамического подхода / Коротаев Д.Н., Тарасов Е.Е., Полещенко К.Н., Теплоухов А.А., Семенюк Н.А., Орлов П.В., Чуранкин В.Г., Ласица А.М. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №2. С. 107–119. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-2-107-119>



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

IMPROVING THE TECHNOLOGY OF THE LAYER-BY-LAYER FORMATION OF NANOSTRUCTURED TOPOCOMPOSITES BY ION-VACUUM TREATMENT METHODS BASED ON A STRUCTURAL-THERMODYNAMIC APPROACH

Korotaev D.N.¹, Tarasov E.E.², Poleshchenko K.N.³, Teploukhov A.A.⁴, Semenyuk N.A.⁴, Orlov P.V.³, Churakin V.G.⁴, Lasitsa A.M.⁴

¹Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia

²Progress Federal Research and Production Center, Omsk, Russia

³Siberian State Automobile and Highway University, Omsk, Russia

⁴Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The paper is relevant because it presents the development of a thermodynamic approach to managing the processes of the structural modification of surface and near-surface layers during the formation of nanostructured topocomposites. The main problem is the need for developing theoretical approaches applied to get a target control over the layer-by-layer ion-vacuum modifying processing, when creating nanostructured topocomposites. **Methods Applied.** The ideas of the structural-thermodynamic approach developed by the authors to the analysis of plasma processes are a theoretical basis of the study. Experimental results were obtained using methods of ion-plasma and ion-beam processing, as well as ion assistance with cascade cross effect. To apply an intermediate oxidized layer, the authors used such surface chemical modification methods as oxidation and passivation. We also used the methods of electron microscopy, probe microscopy, and scratch testing of the samples to study the morphology and adhesive properties of the coating-interface-base systems. **Originality.** We have developed a structural thermodynamic model that reveals the nature of modification effects in the coating-interface-base system at the micro-, submicro- and nanostructural levels caused by ion-plasma flows. The connection between thermodynamic parameters and technological modes of ion-vacuum treatment has been established to control the processes of the structural modification of surface and near-surface layers. The formation of quasi-wave multimodal nanostructures was detected. **Result.** The thermodynamic analysis of the structural modification showed that the formation of the gradient structure of topocomposites was determined by activation structural processes and controlled by the density of the energy flow and the reaction of the material to it, and dissipative ones by the intensity of energy and mass transfer in the modified surface of the material. The defining characteristic of forming the type of structural-phase states and their extent (depth) in the coating-interface-base system is energy imbalance between activation processes determined by a degree of ion-vacuum effect and dissipative phenomena of structural relaxation of the base material. **Practical Relevance.** The results of the structural and thermodynamic analysis of modification processes allow us to purposefully form various types of gradient topocomposites with a given structure and composition of coatings, interface and near-surface layers of the base material.

Keywords: structural-thermodynamic approach, modification effects, ion-plasma treatment, coating-interface-base system, gradient topocomposites, degree of ion-vacuum effect.

For citation

Korotaev D.N., Tarasov E.E., Poleshchenko K.N., Teploukhov A.A., Semenyuk N.A., Orlov P.V., Churakin V.G., Lasitsa A.M. Improving the Technology of the Layer-by-Layer Formation of Nanostructured Topocomposites by Ion-Vacuum Treatment Methods Based on a Structural-Thermodynamic Approach. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 2, pp. 107–119. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-2-107-119>

Введение

Возрастающие требования к ресурсу и надёжности технических систем, агрегатов, рабочих органов строительных, дорожных машин, обрабатывающему инструменту актуализируют проблематику работ, связанных с фундаментальными и прикладными исследованиями в об-

ласти разработки и получения функционально-градиентных материалов (ФГМ) [1–5]. Это обусловлено новыми возможностями решения технологических задач повышения комплекса эксплуатационных свойств изделий за счёт конструирования и получения градиентного строения поверхностных слоёв без изменения характеристик объёма материала.

Для создания ФГМ применяются различные методы высокоэнергетического воздействия, в том числе в различных комбинациях с технологиями термической обработки. Формирование ФГМ осуществляется на основе различных монолитных и порошковых материалов, в том числе титановых, алюминиевых сплавов, высоко прочных сталей, а также керамики и металлокерамических твёрдых сплавов.

Особый интерес представляет создание ФГМ повышенной износостойкости на основе слоистых, многослойных, мультислойных сверхтвёрдых и ультратвёрдых композиционных систем, в том числе наноразмерных, с использованием методов электронно-ионно-плазменных технологий [6–17].

Несмотря на достигнутые успехи в конструировании указанных материалов, остаются проблемы технологического характера, обеспечивающие решение задач эксплуатационного поведения изделий из ФГМ в условиях определяющего влияния адгезионно-усталостных и окислительных процессов. При этом главной проблемой снижения показателей их надёжности и ресурса остаётся негативное влияние внутренних напряжений в зонах концентраторов напряжений, расположенных, главным образом, в области интерфейса системы «покрытие-интерфейс-основа». Во многом это связано с используемыми технологическими решениями подготовки поверхности основы перед нанесением покрытий, не исключающими в полной мере формирование дефектного слоя и его хаотического микрорельефа, что приводит к образованию концентраторов напряжений и растягивающим остаточным напряжениям в области интерфейса. Указанные причины определяются не всегда контролируемыми условиями теплового и механического воздействия, сопровождающего технологические операции подготовки поверхности перед нанесением покрытий, как, например, при предварительном шлифовании. В этом случае исключить наличие микроприжогов поверхности весьма проблематично.

Альтернативной заменой шлифовальных и полировальных технологических операций для подготовки поверхности основы является использование операции прецизионной ионно-плазменной обработки в сочетании с ионным ассирированием и нанесением ионно-вакуумных покрытий в едином цикле.

Указанный подход используется при создании нового типа функционально-градиентных

материалов – наноструктурных топокомпозитов (НСТК), хорошо зарекомендовавших себя в различных условиях эксплуатации [3, 4, 18]. Градиентный характер НСТК позволяет в значительной степени нивелировать влияние концентраторов напряжений вследствие их структурно-морфологических особенностей. Это обусловлено тем, что наноструктурные топокомпозиты создаются по типу многослойной композиции, сочетающей чередующиеся пластичные, дисперсно-армированные слои покрытий и поверхностный слой, содержащий конденсированную и кластерную фазы. Организованная по типу многофазной композиции с градиентным строением, уменьшающимся размером частиц покрытий в направлении поверхности и созданием верхнего слоя с пониженной сдвиговой устойчивостью, архитектура НСТК позволяет существенно повышать вязкость их разрушения, в том числе в условиях циклических воздействий при резании и фреттинг-изнашивании [19].

Кроме того, дополнительные возможности совершенствования технологии получения НСТК на стадии предварительной обработки перед нанесением покрытий открывают использование каскадного перекрёстного эффекта [20] как в направлении исследования процессов микро- и наноструктурных эффектов модификации граничных областей в системе «покрытие-интерфейс-основа», так и непосредственно в направлении исследования структурно-морфологических особенностей самого интерфейса. При этом реализация указанных возможностей требует разработки теоретических подходов, позволяющих целенаправленно управлять процессами послойной ионно-вакуумной модифицирующей обработки при создании наноструктурных топокомпозитов.

Целью настоящей работы является совершенствование технологии послойного формирования НСТК методами ионно-вакуумной обработки на основе структурно-термодинамического подхода и исследования процессов структурной активации поверхности.

Методы и материалы исследования

В основу данного исследования положена идея управления процессами послойной модификации в условиях каскадного перекрёстного эффекта, реализуемого на модернизированной установке ННВ с использованием двух источников газоразрядной плазмы на основе дугового разряда, позволяющего генерировать плазму при

рабочих давлениях порядка $P = 10^{-2} \div 10^{-1}$ Па, и импульсного имплантера, расположенных под различными углами [21]. Данная установка позволяет осуществлять послойную обработку поверхностных структур материала основы и формирование покрытий в стационарном, импульсном, совмещенном режимах в одном вакуумном цикле. Кроме того, наличие специального приспособления, включающего отражатель и шаблон, даёт возможность генерировать потоки ускоренных ионов и ионизированных кластеров с целью повышения плотности мощности за счёт локализации термомеханических импульсов, инициирующих развитие и, при определённых режимах, перекрытие каскадов столкновений (рис. 1).

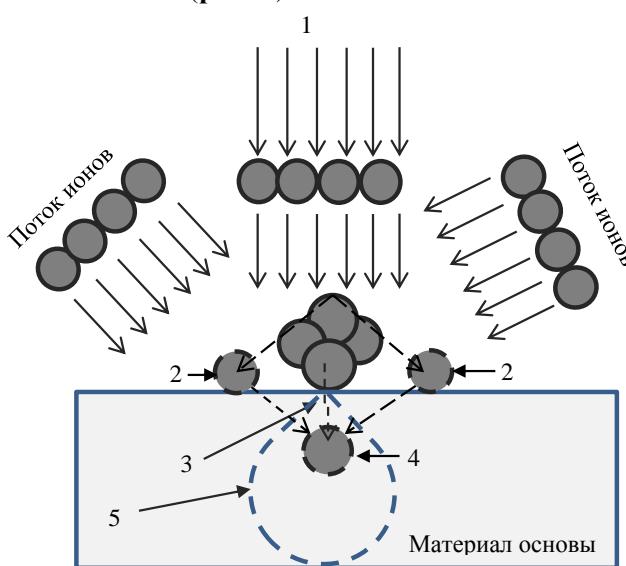


Рис. 1. Схема каскадного перекрёстного эффекта:

1 – поток ионов и ионизированных кластеров, сформированных при взаимодействии ионов имплантера и отражателя; 2 – поверхностный ион в условиях перекрестного эффекта; 3 – термомеханический импульс; 4 – атом отдачи; 5 – область каскада столкновений

Fig. 1. Diagram of the cascade cross effect: 1 is a flow of ions and ionized clusters formed by the interaction of the implanter and reflector ions; 2 is a surface ion under the cross effect; 3 is a thermomechanical pulse; 4 is a recoil atom; 5 is an area of the collision cascade

Объектами исследования являлись образцы из твёрдого сплава ВК-8, твёрдого сплава с оксидными покрытиями, а также образцы из твёрдого сплава с оксидными покрытиями и покрытиями из нитрида титана. Химическое модифицирование осуществлялось методами оксидирования и пассивации. Толщина химически модифицированного слоя составляла порядка 1 мкм.

Модифицирование осуществлялось по методике, приведенной в работе [21].

Морфология поверхности покрытий исследовалась методами электронной микроскопии на электронном микроскопе JEOL JCM – 5700 и зондовой микроскопии на атомно-силовом микроскопе NTEGRA Prima (NT-MDT). Адгезия покрытий к основе проводилась с помощью скретч-тестера CSEM Micro-Scratch Tester MST-S-AX-000.

Результаты исследования и их обсуждение

Основанием для разработки структурно-термодинамического подхода является приведённая на рис. 2 типичная схема строенияnanoструктурного топокомпозита, полученная на основе обобщения результатов проведённых ранее исследований структурно-фазовых состояний слоёв, формируемых при ионно-вакуумном комбинированном воздействии [18–21]. В левой части схемы представлены технологические и термодинамические параметры ионно-вакуумной плазменной обработки (ИВПО), с помощью которых осуществляется целенаправленное управление процессами активации поверхностных слоёв.

В правой части рис. 2 показаны структурные элементы, полученные в результате диссипативных процессов и сформированные на различных уровнях модификации по глубине образца (снизу-вверх) от уровня 1 (самый глубокий) до уровня 5 (скин-слой). В центре схемы представлено послойное строение (уровни модификации) топокомпозита.

Область проявления эффекта дальнодействия (слой 1) характеризуется наличием энергоемких фаз по типу оксидов, оксинитридов, интерметаллидов. В приповерхностном слое (слой 2), области ионного перемешивания (слой 3) и в покрытии (слой 4) располагаются дефекты и их конфигурации (вакансии, дислокационные ансамбли и др.). Верхний слой (5) содержит кластерные образования.

Процесс формирования НСТКП реализовался согласно приведённой на рис. 3 структурной схеме, которая показывает механизм послойной обработки поверхности с использованием ионных потоков различной интенсивности на всех этапах технологического цикла за счёт либо поочерёдной, либо одновременной работы разных катодов и источников напряжений.

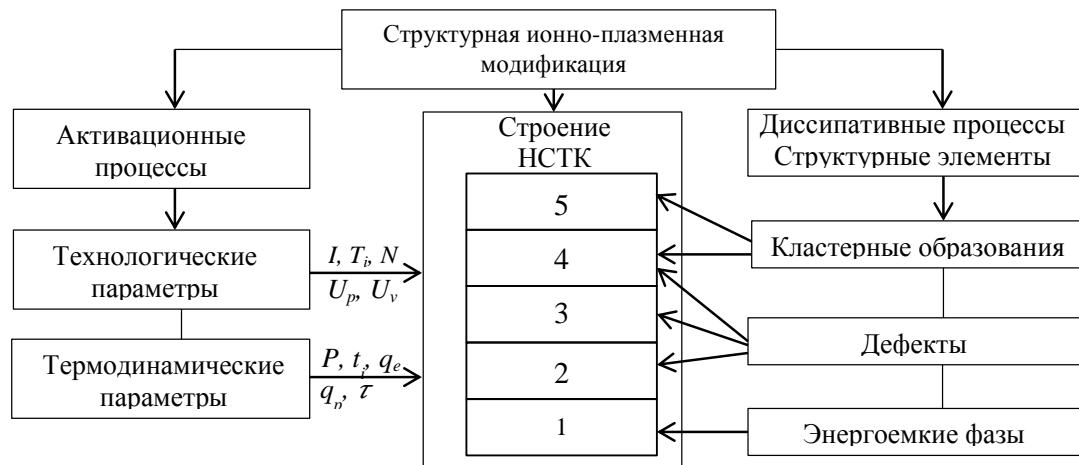


Рис. 2. Строение топокомпозита на различных структурных уровнях ионно-плазменной модификации: I – сила тока ионного пучка; T_b – длительность импульса ионного пучка; N – частота импульсов; U_p – напряжение на подложке; U_v – ускоряющее напряжение; α – угол падения потоков ионов; P – давление; t – температура; q_e – плотность энергии; q_p – плотность мощности; τ – время энергетического воздействия; 1 – упрочненный слой (область эффекта дальнодействия); 2 – приповерхностный слой; 3 – переходный слой (область ионного перемешивания); 4 – покрытие (область конденсированной фазы); 5 – кластерная фаза

Fig. 2. The structure of the topocomposite at various structural levels of ion-plasma modification:
 I is current of the ion beam; T_b is the pulse duration of the ion beam; N is pulse frequency;
 U_p is voltage on the substrate; U_v is accelerating voltage; α is the angle of incidence of ion fluxes;
 P is pressure; t is temperature; q_e is energy density; q_p is power density; τ is energy deposition time;
1 is a hardened layer (a long-range effect region); 2 is a near-surface layer; 3 is a transition layer
(an ion mixing region); 4 is a coating (a condensed phase region); 5 is a cluster phase

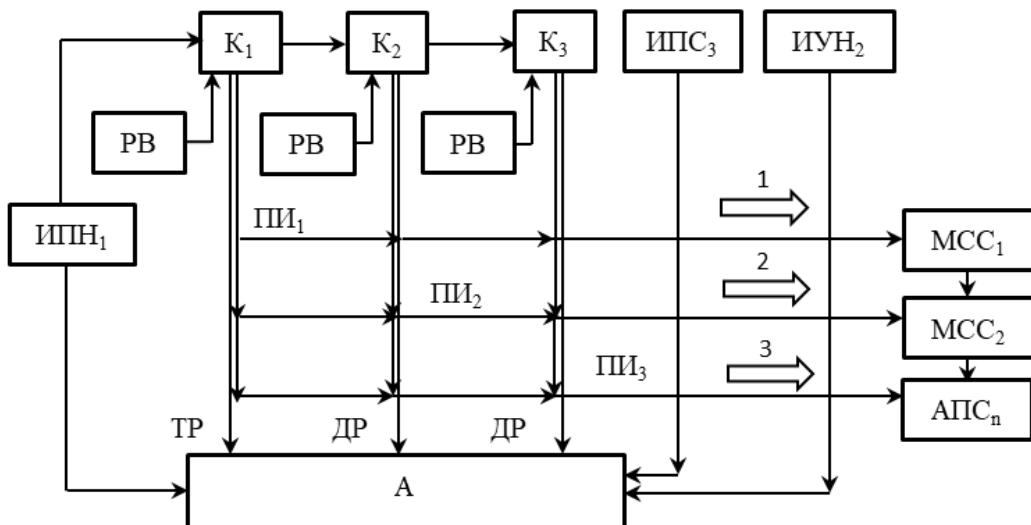


Рис. 3. Структурная схема полученияnanoструктурных топокомпозитных покрытий вакуумной ионно-плазменной обработкой: ИПН₁ – источник постоянного напряжения; ИУН₂ – источник ускоряющего напряжения; ИПС₃ – источник потенциала смещения; РВ – рабочее вещество (газ); ТР – тлеющий разряд; ДР – дуговой разряд; А – анод (обрабатываемый образец); К₁, К₂, К₃ – катоды; МСС₁, МСС₂ – метастабильные структуры; АПС_n – аморфноподобные структуры; ПИ₁, ПИ₂, ПИ₃ – потоки ионов, генерируемые соответствующими катодами; 1, 2, 3 – интенсивности соответствующих ионизированных потоков плазмы

Fig. 3. Block diagram of producing nanostructured topocomposite coatings by vacuum ion-plasma treatment.
Designations: DCVS₁ is a DC voltage source; AVS₂ is an accelerating voltage source; DPS₃ is a displacement potential source; WS is a working substance (gas); GD is glow discharge; AD is arc discharge; A is an anode (the processed sample); K₁, K₂, K₃ are cathodes; MSS₁, MSS₂ – metastable structures; AS_n is amorphous-like structures; IF₁, IF₂, IF₃ are ion flows generated by the corresponding cathodes; 1, 2, 3 is intensity of the corresponding ionized plasma flows

Специфику послойного формирования наноструктурных топокомпозитов можно рассмотреть на основе анализа двух конкурирующих процессов: активационных и диссипативных [22].

Для процесса взаимодействия энергетического потока с исходной структурой поверхности будет справедливо выражение

$$q_{\text{э.п.}} \cdot t_{\text{э.п.}} = q_{\text{акт.}} \cdot t_{\text{акт.}} + q_{\text{дп.}} \cdot t_{\text{дп.}}, \quad (1)$$

где $q_{\text{э.п.}}$ – плотность энергетического потока; $t_{\text{э.п.}}$ – время воздействия энергетического потока; $(q_{\text{акт.}} \cdot t_{\text{акт.}})$ – активационный энергетический поток; $(q_{\text{дп.}} \cdot t_{\text{дп.}})$ – диссипативный энергетический поток.

При этом формирование различных типов метастабильных структур MCC_1 , MCC_2 , вплоть до аморфноподобных – APC_n (см. **рис. 3**), определяется величиной поглощённой внутренней энергии ΔU_{MCC} и будет зависеть от баланса активационного и диссипативного энергетических потоков, который можно описать выражением

$$\Delta U_{\text{MCC}} = q_{\text{акт.}} \cdot t_{\text{акт.}} - q_{\text{дп.}}^* \cdot t_{\text{дп.}}^*. \quad (2)$$

Произведение $(q_{\text{дп.}} \cdot t_{\text{дп.}})$ определяет диссипативную составляющую энергобаланса, имеющую диффузионную (тепловую) природу; $(q_{\text{дп.}}^* \cdot t_{\text{дп.}}^*)$ – диссипативную составляющую энергобаланса, связанную с микроструктурным энергомассопереносом.

Тогда выражение для величины поглощённой внутренней энергии выглядит следующим образом:

$$\Delta U_{\text{MCC}} = q_{\text{акт.}} \cdot t_{\text{акт.}} - D(T) \cdot \frac{dT_i}{dx_i} \cdot t_{\text{дп.}} - q_{\text{дп.}}^* \cdot t_{\text{дп.}}^*. \quad (3)$$

Поглощение внутренней энергии при ионно-плазменном модифицировании является результатом совместных физико-химических микроструктурных процессов, активность которых зависит от дисбаланса между активационными и диссипативными энергетическими потоками, развивающимися в обрабатываемом материале за счет внешнего энергетического воздействия. Полнота реализации активационных микроструктурных процессов управляет плотностью энергетического потока (плотностью мощности) и реакцией материала на него, а диссипативных – интенсивностью энергомассопереноса в приповерхностных слоях модифицируемого материала.

С уменьшением времени активного взаимодействия ионного разряда с материалом энергетический дисбаланс возрастает. Этот случай де-

монстрирует **рис. 4**, на котором приведены два варианта воздействия ионными разрядами, имеющими одинаковую продолжительность $t_{\text{ПЭВ}}$, но различные активационные периоды $t_{\text{акт.}}$

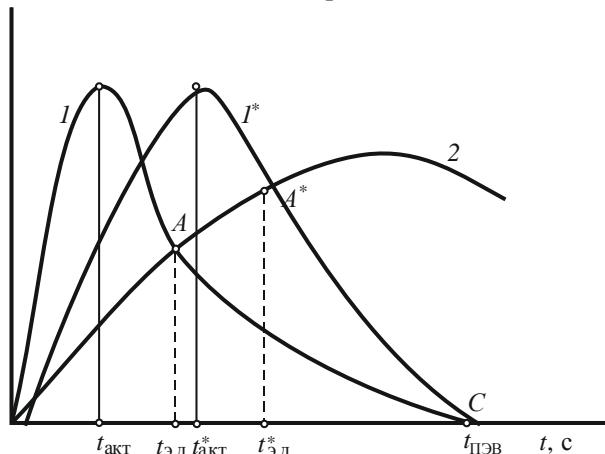


Рис. 4. Энергетические характеристики ИВПО при различных периодах активации (кривая 1 и 1*) разряда с металлом: $t_{\text{акт.}}$ и $t_{\text{акт.}}^*$ – разное время активационного периода ионно-плазменного воздействия ($t_{\text{акт.}} < t_{\text{акт.}}^*$); $t_{\text{э.п.}}$ и $t_{\text{э.п.}}^*$ – время энергетического дисбаланса при разном активационном периоде; $t_{\text{ПЭВ}}$ – период энергетического воздействия; кривая 2 – развитие диссипативных процессов (процессов энергомассопереноса)

Fig. 4. Energy characteristics of IVPT at different activation periods (curve 1 and 1*) of the discharge with metal: $t_{\text{акт.}}$ and $t_{\text{акт.}}^*$ are different time of the activation period of ion-plasma exposure ($t_{\text{акт.}} < t_{\text{акт.}}^*$); $t_{\text{э.п.}}$ and $t_{\text{э.п.}}^*$ are time of energy imbalance at different activation periods; $t_{\text{ПЭВ}}$ is an energy deposition period; curve 2 is the development of dissipative processes (processes of energy and mass transfer)

На **рис. 5** приведены гипотетические зависимости плотности мощности энергетического потока q при активационном процессе (кривая 1), диссипативного процесса (кривая 2) и плотность потока энергетических затрат при дисбалансе (зона 3 и кривая 4). Плотность мощности разряда достигает максимума в конце начального активационного периода $t_{\text{акт.}}$, а затем падает до нуля по истечении периода энергетического воздействия $t_{\text{ПЭВ}}$.

Дисбаланс энергетических потоков при ИВПО будет определяться площадью заштрихованной зоны 3, а временная зависимость плотности мощности энергетических затрат на нейтрализацию дисбаланса представлена кривой 4 как разницы ординат кривой 1 и 2 во временном диапазоне от 0 до $t_{\text{Э.д.}}$

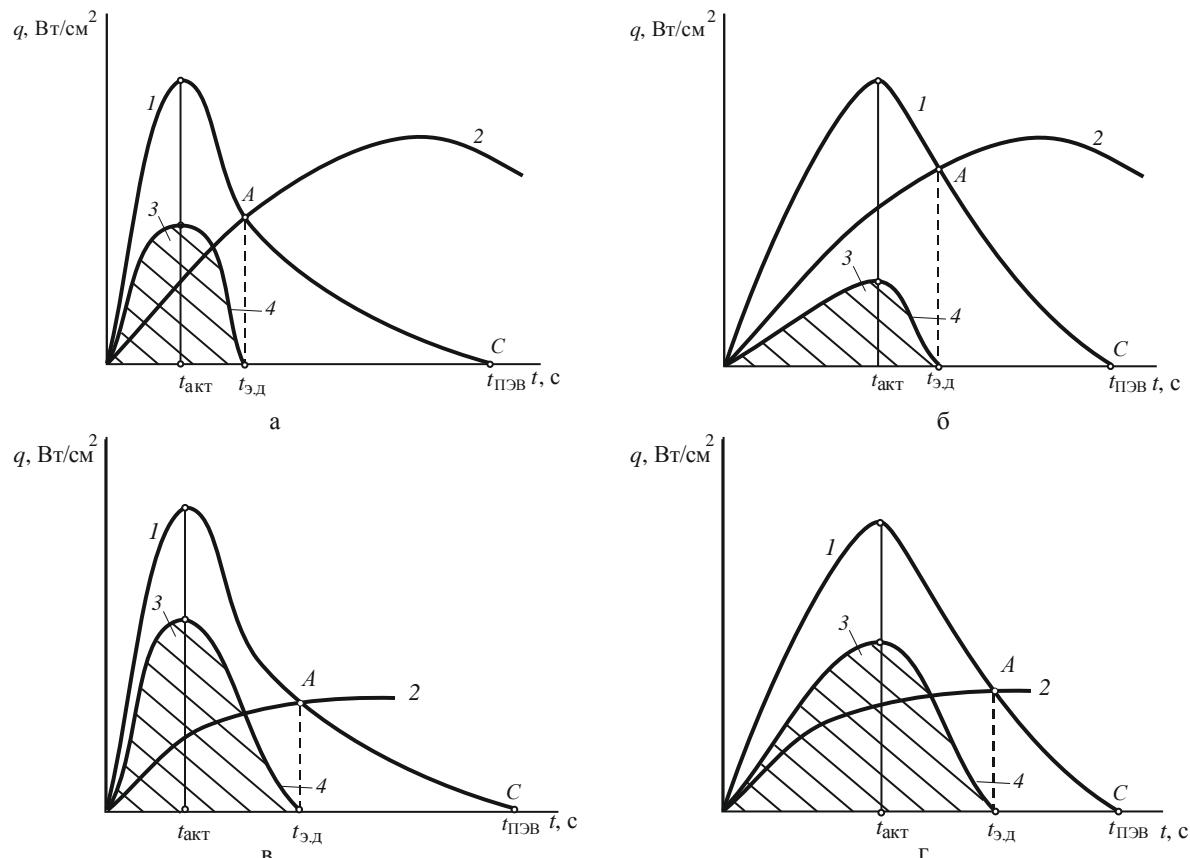


Рис. 5. Гипотетические зависимости изменения плотности мощности при активации и диссипации:
 а – при малом времени активационного периода и высокой интенсивности диссипативных процессов;
 б – при увеличении времени активационного периода и высокой интенсивности диссипативных процессов;
 в – при малом времени активации и низкой интенсивности диссипативных процессов;
 г – при увеличении времени активации и низкой интенсивности диссипативных процессов;
 1 – плотность мощности ионного потока активационного процесса; 2 – плотность мощности потока диссипативного процесса; 3 – зона энергетических затрат при дисбалансе; 4 – кривая энергетического дисбаланса; $t_{\text{акт}}$ – время активационного периода; $t_{\text{э.д}}$ – время энергетического дисбаланса; $t_{\text{ПЭВ}}$ – период энергетического воздействия

Fig. 5. Hypothetical dependences between the change in power density during activation and dissipation: а is within a short activation period and high intensity of dissipative processes; б is within an increase in the activation period and high intensity of dissipative processes; в is within a short activation period and low intensity of dissipative processes; г is at an increase in the activation period and low intensity of dissipative processes; 1 is power density of the ion flux of the activation process; 2 is power density of the dissipative process flow; 3 is a zone of energy consumption in case of imbalance; 4 is an energy imbalance curve; $t_{\text{акт}}$ is an activation period; $t_{\text{э.д}}$ is time of energy imbalance; $t_{\text{ПЭВ}}$ is an energy deposition period

Анализируя **рис. 5**, приходим к заключению, что плотность потока энергетических затрат при дисбалансе (зона 3 и кривая 4) минимальна на **рис. 5, б**. То есть уменьшение плотности мощности q возможно при увеличении времени активационного процесса (активации) и повышении интенсивности диссипативных процессов (например, за счет энергомассопереноса).

При малом активационном периоде и повышении интенсивности диссипативных процессов энергомассопереноса время энергетического дисбаланса уменьшается и при этом увеличивается плотность мощности энергетического потока q . Энергетические затраты при таком варианте дис-

баланса минимальны (зона 3 на **рис. 5, а**).

Для оценки плотности мощности использовалось следующее выражение:

$$q_P = j \cdot U_{acc} \cdot f \cdot \tau \cdot N, \quad (4)$$

где j – плотность тока пучка, А/см²; U_{acc} – ускоряющее напряжение, В; f – частота следования импульсов, Гц; τ – длительность импульса, мкс; N – число импульсов пучка за время обработки.

В условиях каскадного перекрестного эффекта, в предположении аддитивности влияния энергетических потоков, плотность мощности может быть рассчитана по формуле

$$q_{P_K} = jU_{acc} \cdot f \cdot \tau \cdot N + 2q_P \cdot \cos \alpha. \quad (5)$$

После подстановки технологических параметров режимов ионно-плазменной обработки расчётные значения плотности мощности достигали порядка $q_{P_K} = 250\text{--}12000 \text{ Вт/см}^2$.

Из результатов проведенного структурно-энергетического анализа следует, что, варьируя значениями плотности мощности, наряду с изменением диссипативных свойств поверхностного слоя материала, можно целенаправленно управлять процессами послойного формирования структурно-фазового состоянияnanoструктурного топокомпозита.

Анализ соотношения активационных и диссипативных процессов позволяет определить основные пути получения местостабильных структурных состояний поверхностных слоёв на каждом этапе формирования топокомпозитов. Технологически они могут быть обеспечены следующим образом:

- активацией материала перед нанесением покрытий за счёт реализации каскадного перекрёстного эффекта;
- созданием условий для большего временного рассогласования между подводимой энергией ионного разряда и развитием диссипативных каналов, в том числе за счёт предварительного формирования слоёв с высокими диссипативными свойствами;
- повышением адгезионной прочности в системе «покрытие-интерфейс-основа» вследствие локализации (селективного воздействия) ионно-плазменных потоков и повышения значений их плотности мощности при нанесении покрытий в условиях ионного асистирования.

В частности, этап предварительной ионно-плазменной обработки перед нанесением покрытий можно рассматривать не только в качестве технологической операции ионной очистки поверхности от загрязнений. В условиях каскадного перекрёстного эффекта этот этап можно рассматривать и в качестве модифицирующей обработки. В этом случае ионно-плазменная обработка будет способствовать развитию радиационно-индуцированных межфазных процессов в области межфазных границ и, в зависимости от значений плотности мощности, образованию точечных и протяжённых дефектов, субзёренных границ, а также зёренных конгломератов. Очевидно, что указанные структурные изменения

будут влиять на интенсивность диффузионного массопереноса в приповерхностных слоях и, соответственно, на диссипативные свойства материала основы [23]. Кроме того, эффективным «регулятором» диссипативных свойств системы «покрытие-интерфейс-основа» может являться формирование промежуточного слоя – элемента интерфейса из более пластичного слоя, чем материал основы, в частности, оксидного слоя.

На **рис. 6** представлены типичные профили поверхностей после предварительной ионно-плазменной обработки (**рис. 6, а**) и предварительного химического оксидирования с последующей ионно-плазменной обработкой в условиях каскадного перекрёстного эффекта (**рис. 6, б**).

Сравнительный анализ полученных изображений и соответствующих профилей поверхности показывает, что после предварительного химического оксидирования и последующей ионно-плазменной обработки в условиях каскадного перекрёстного эффекта происходит формирование квазиволновых мультимодальных наноразмерных структур, характеризующихся множеством чередующихся участков из «нановпадин» и «нановступов», что свидетельствует об образовании более развитой в последнем случае удельной поверхности. Следует отметить, что полученные данные согласуются с развиваемыми авторами [32] положениями о предпочтительном характере формирования подобных мезоструктур на интерфейсе «поверхностный слой – подложка». Образование подобных структур способствует повышению адгезионной прочности связей в системе «покрытие-интерфейс-основа», о чём свидетельствуют данные скретч-тестирования образцов (**рис. 7**).

Из представленных зависимостей видно, что изменения в их характере определяются уменьшением угла наклона (**рис. 7, а, 1, 2, 3**), что свидетельствует о более равномерном виде поверхности разрушения модифицированных поверхностей, что хорошо согласуется с данными исследования процесса разрушения (**рис. 7, б**).

Из представленных на **рис. 7** результатов видно, что по значениям сигналов акустической эмиссии разрушение покрытий TiN начинается уже при нагрузке около 3 Н и характеризуется его отслаиванием (см. **рис. 7, а**), в то время как для образцов с предварительно нанесённым оксидированным слоем разрушение в исследуемом диапазоне значений нормальной нагрузки, изнашивание происходит равномерно, без выраженных сколов и следов выкрашивания.

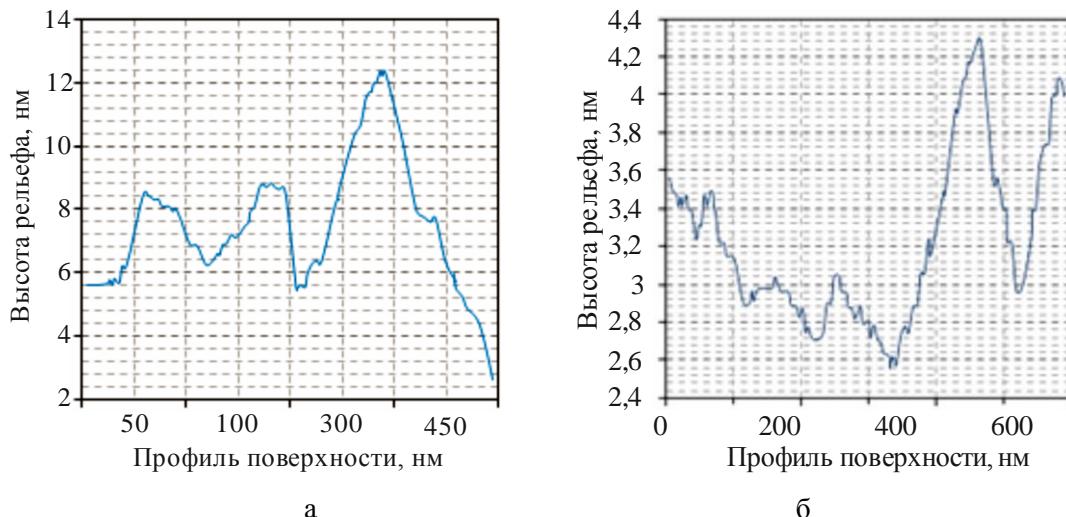


Рис. 6. АСМ-изображение профиля поверхности после ионно-плазменной обработки в условиях каскадного перекрёстного эффекта: а – без предварительного химического оксидирования; б – с предварительным химическим оксидированием

Fig. 6. AFM image of the surface profile after ion-plasma treatment under the cascade cross effect: а is without a preliminary chemical oxidation; б is with a preliminary chemical oxidation

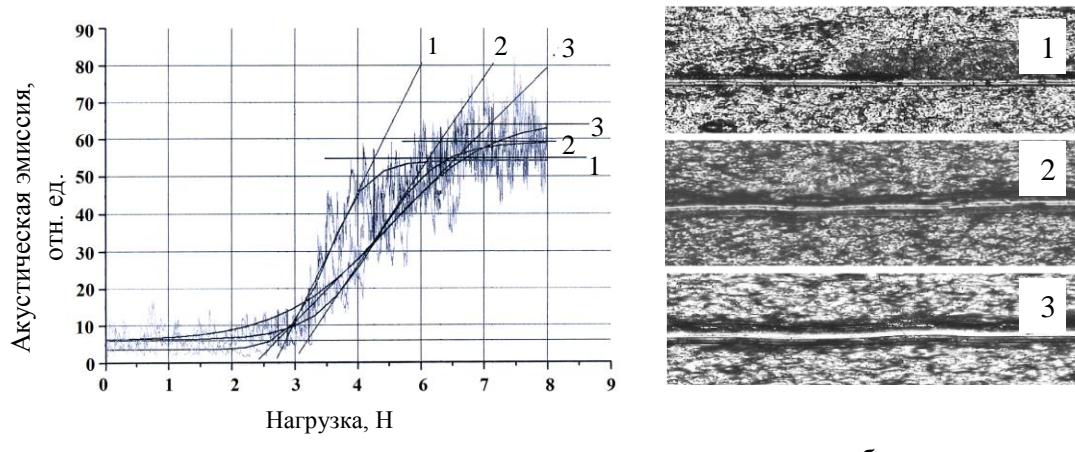


Рис. 7. Результаты скретч-тестирования образцов BK8 с покрытием TiN после активации в условиях каскадного перекрёстного эффекта: а – зависимость акустической эмиссии от приложенной нагрузки; б – вид следа износа; 1 – при плотности мощности 250 Вт/см^2 ; 2 – при плотности мощности 1000 Вт/см^2 ; 3 – при плотности мощности 10000 Вт/см^2

Fig. 7. Scratch testing of samples BK8 coated with TiN after activation under the cascade cross effect: а is dependence between acoustic emission and applied load; б is a wear track; 1 is at 250 W/cm^2 ; 2 is at 1000 W/cm^2 ; 3 is at 10000 W/cm^2

Заключение

В результате проведённых исследований установлено следующее. Теоретические положения структурно-термодинамического подхода к анализу ионно-вакуумных плазменных процессов послойного формированияnanoструктурных топокомпозитов, основанные на анализе баланса активационных и диссипативных процессов, позволяют найти соотношения между термодинамическими и технологическими параметрами для обработки в условиях каскадного перекрёст-

ного эффекта, а также определить основные направления совершенствования технологии получения данных материалов.

Проведённый термодинамический анализ свидетельствует о том, что плотность потока энергетических затрат в условиях дисбаланса активационных и диссипативных процессов минимальна при увеличении времени активационного процесса (активации) и повышении интенсивности диссипативных процессов энергомас-сопереноса. При малом активационном периоде и повышении интенсивности диссипативных

процессов энергомассопереноса время энергетического дисбаланса уменьшается. При этом увеличивается плотность мощности энергетического потока q . Кроме того, как следует из полученных расчётных оценок в условиях каскадного перекрёстного эффекта, уровень соответствующих значений q_{P_K} существенно возрастает, что даёт возможность формировать сильнонеравновесные структурно-фазовые состояния на каждом этапе формирования топокомпозитов.

Полученные результаты показывают, что одним из главных направлений совершенствования указанной технологии является наноконструирование области интерфейса системы «покрытие-интерфейс-основа» как за счёт использования возможностей процесса активации поверхности перед нанесением нитридотитанового покрытия, так и за счёт предварительного химического модифицирования с целью формирования пластичного оксидного слоя. Это позволяет обеспечить на стадии активации поверхности перед нанесением ионно-плазменных покрытий формирование квазиволновых мультимодальных наноразмерных структур, отличительной особенностью которых является наличие множества чередующихся участков из «нановпадин» и «нановыступов».

Образование подобных структур является наиболее предпочтительным с точки зрения повышения адгезионных связей, формирующихся в системе «покрытие-интерфейс-основа», что подтверждается экспериментальными данными стретч-тестирования образцов.

Очевидно, что формирование подобных структур в области интерфейса между покрытием и основой оказывает положительное влияние на снижение уровня внутренних напряжений в области зон концентраторов напряжений как за счёт развитой удельной поверхности, так и за счёт снижения сдвиговой устойчивости оксидных мезослоёв, выполняющих роль дополнительных локально-диссипативных структурных элементов.

Список литературы

- Upadhyay R, Brossard N., Chen C.H. Mechanisms underlying astringency: introduction to an oral tribology approach // J. Phys. D: Appl. Phys. 2016, vol. 49, pp. 104003.
- Matthews A., Franklin S., Holmberg K. Tribological coatings: contact mechanisms and selection // J. Phys. D: Appl. Phys. 2007, vol. 40, pp. 5463.
- Градиентные структуры и дальнодействующие поля напряжений, возникающие в перлитной стали при ударном нагружении / Н.А. Попова, С.Г. Жулейкин, В.В. Коваленко и др. // Современные проблемы прочности: науч. тр. VI Междунар. симпозиума им. В.А. Лихачева, 20–24 октября 2003 г. Великий Новгород: НовГУ, 2003. Т. 1. С. 86–91.
- Формирование и эволюция градиентных структурно-фазовых состояний в толстых сварных швах / В.В. Коваленко, В.П. Гагауз, В.В. Пискаленко и др. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2004. № 2. С. 103–110.
- Васильев М.А., Прокопенко Г.И., Филатова В.С. Нанокристаллизация металлических поверхностей методами интенсивной пластической деформации // Успехи физики металлов. 2004. Т. 5, № 3. С. 345–399.
- Будущее – за градиентными структурами и фазовыми состояниями в сталях и сплавах / В.В. Коваленко, С.В. Коновалов, В.Е. Громов и др. // Всерос. науч.-практ. конф. «Металлургия: новые технологии, управление, инновации и качество». Новокузнецк: СибГИУ, 2005. С. 64–69.
- Наноинженерия поверхности. Формирование неравновесных состояний в поверхностных слоях материалов методами электронно-ионно-плазменных технологий / отв. ред. Н.З. Ляхов, С.Г. Псахье. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. 275 с.
- Влияние ионно-пучковой обработки на структуру и трибомеханические свойства покрытий TiN / В.П. Сергеев, М.В. Федорищева, О.В. Сергеев и др. // Физика и химия обработки материалов. 2008. № 2. С. 10–13.
- Phase Composition and Properties of Wear Resistant Ti–Al–Cr–Zr–Nb–N Coatings Manufactured by the Arc Physical Deposition Method / I.V. Blinkov, A.O. Volkonskii, V.N. Anikin et al. // Inorganic Materials: Applied Research. 2011. Vol. 2. № 3. Pp. 285–291.
- High-performance wear-resistant ion-plasma coatings based on five-component nitrides for a hard-alloy cutting tool operating under constant loads / A.O. Volkonskii, I.V. Blinkov, A.V. Elyutin et al. // Metallurgist. 2010. Vol. 54. Pp. 374–377.
- Структурные изменения в многослойных нанопленках TiAl / К.О. Базалеева, В.С. Крапошин, П.А. Цыганков и др. // Материаловедение. 2008. №4. С. 35–39.
- Возможности метода вакуумной прокатки как способа получения многослойных композитов с нанометрическими толщинами слоев / Л.И. Карпов, В.И. Внуков, К.Г. Волков и др. // Материаловедение. 2004. №1. С.48–53.
- Курзина И. А. Наноразмерные интерметаллидные фазы, формирующиеся в условиях ионной имплантации // Материаловедение. 2010. № 2. С. 49–64.
- Колесников А.Г., Плохих А.И. Конструкционные металлические материалы с субмикро- и наноразмерной структурой // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2010. № 5. С. 44–52.

15. Blinkov I.V., Volkonsky A.O., Podstyazhonok O.B. Structure and properties of multilayer coatings deposited with pvd-arc technology // Surface engineering. 2011. No. 2. Pp. 57–63.

16. Upadhyay R, Brossard N., Chen C.H. Mechanisms underlying astringency: introduction to an oral tribology approach // J. Phys. D: Appl. Phys. 2016. Vol. 49. P. 104003.

17. Разработка и получениеnanoструктурных топокомпозитов / Гринберг П.Б., Коротаев Д.Н., Полещенко К.Н. и др. // Вестник СибАДИ. 2015. № 3(43). С. 39–45.

18. Метод получения nanoструктурированных топокомпозитов для повышения несущей способности конструктивных элементов энергооборудования / Гринберг П. Б., Полещенко К. Н., Горюнов В. Н. и др. // Вестник Омского университета. 2012. № 2. С. 253–258.

19. Nanostructured titanium coatings for parts operating under conditions of fretting-corrosion / D.N. Korotaev E.N. Eremin K.N. Poleschenko et al. // AIP Conference Proceedings. 2141. 2019. P. 040019. <https://doi.org/10.1063/1.5122138>

20. Receiving nanostructural topocomposite coatings in terms of the cascade cross effect / P.B. Grinberg, K.N. Poleschenko, D.N. Korotaev, et al. // Journal of Physics: Conference Series. 2019. P. 012054. DOI:10.1088/1742-6596/1210/1/012054.

21. Формирование nanoструктурных топокомпозитов с кластерно-градиентной архитектурой комбинированной ионно-вакуумной обработкой / Полещенко К.Н., Коротаев Д.Н., Ерёмин Е.Н., Несов С.Н., Тарасов Е.Е., Теплоухов А.А., Семенюк Н.А., Иванова Е.В., Ласица А.М., Иванов А.Л. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №2. С. 68–78. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-2-68-78>

22. Ким В.А., Коротаев Д.Н., Соловьев В.В. Термодинамика упрочняющих технологий // Известия Амурского государственного университета. 1999. №6. С. 32–35.

23. Mass transfer in heterogeneous materials under irradiation with high-intensity beams of charged particles / Vershinin G.A., Poleschenko K.N., Povoroznyuk S.N. et al. // Surface Investigation. 2001. V. 16. P. 761–767.

strength: proceedings of the 6th Likhachev International Symposium]. Veliky Novgorod: Novgorod State University, 2003, vol. 1, pp. 86–91. (In Russ.)

4. Kovalenko V.V., Gagauz V.P., Piskalenko V.V. et al. Forming and evolving gradient structural phase states in thick welding seams. *Fundamentalnye problemy sovremennoego materialovedeniya* [Basic Problems of Modern Materials Science], 2004, no. 2, pp. 103–110. (In Russ.)

5. Vasilev M.A., Prokopenko G.I., Filatova V.S. Nanocrystallizing metal surfaces by severe plastic deformation methods. *Uspekhi fiziki metallov* [Advances in Physics of Metals], 2004, vol. 5, no. 3, pp. 345–399. (In Russ.)

6. Kovalenko V.V., Konovalov S.V., Gromov V.E. et al. Future belongs to gradient structures and phase states in steels and alloys. *Vseros. nauch.-prakt. konferentsiya «Metallurgiya: novye tekhnologii, upravlenie, innovatsii i kachestvo»* [All-Russian Scientific and Practical Conference "Metallurgy: new technologies, management, innovation and quality"]. Novokuznetsk: Siberian State Industrial University, 2005, pp. 64–69. (In Russ.)

7. *Nanoindzeneriya poverkhnosti. Formirovanie neravnovesnykh sostoyaniy v poverkhnostnykh sloyakh materialov metodami elektronno-ionno-plazmennykh tekhnologiy* [Surface nanoengineering. Formation of non-equilibrium states in the surface layers of materials by methods of electron-ion-plasma technologies]. Ed. by Lyakhov N.Z., Psakhie S.G. Novosibirsk: Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2008, 275 p. (In Russ.)

8. Sergeev V.P., Fedorishcheva M.V., Sergeev O.V. et al. Effect of ion-beam treatment on the structure and tribomechanical properties of TiN coatings. *Fizika i khimiya obrabotki materialov* [Physics and Chemistry of Materials Processing], 2008, no. 2, pp. 10–13. (In Russ.)

9. Blinkov I.V., Volkonskii A.O., Anikin V.N. et al. Phase composition and properties of wear resistant Ti–Al–Cr–Zr–Nb–N coatings manufactured by the arc physical deposition method. *Inorganic Materials: Applied Research*, 2011, vol. 2, no. 3, pp. 285–291.

10. Volkonskii A.O., Blinkov I.V., Elyutin A.V. et al. High-performance wear-resistant ion-plasma coatings based on five-component nitrides for a hard-alloy cutting tool operating under constant loads. *Metallurgist*, 54, 374–377 (2010).

11. Bazaleeva K.O., Kravoshin V.S., Tsygankov P.A. et al. Structural changes in TiAl multi-layer nanofilms. *Materialovedenie* [Materials Science], 2008, no. 4, pp. 35–39. (In Russ.)

12. Karpov L.I., Vnukov V.I., Volkov K.G. et al. Potential of the vacuum rolling method as a technique for producing nanolayer composites with nanometer thicknesses of layers. *Materialovedenie* [Materials Science], 2004, no. 1, pp. 48–53. (In Russ.)

13. Kurzina I.A. Nanoscale intermetallic phases forming during ion implantation. *Materialovedenie* [Materials Science], 2010, no. 2, pp. 49–64. (In Russ.)

References

1. Upadhyay R., Brossard N. and Chen C.H. Mechanisms underlying astringency: introduction to an oral tribology approach. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 49, 104003 (2016).
2. Matthews A., Franklin S. and Holmberg K. Tribological coatings: contact mechanisms and selection. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 40, 5463 (2007).
3. Popova N.A., Zhuleikin S.G., Kovalenko V.V. et al. Gradient structures and long-range fields of stresses occurring in pearlitic steel at impact load. *Sovremennye problemy prochnosti: nauch. trudy VI Mezhdunar. simpoziuma im. V.A. Likhacheva* [Modern problems of

14. Kolesnikov A.G., Plokhikh A.I. Structural metallic materials with a submicro- and nanoscale structure. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Priborostroenie* [Bulletin of Bauman Moscow State Technical University. Series: Instrumentation], 2010, no. 5, pp. 44–52. (In Russ.)
15. Blinkov I.V., Volkhonsky A.O. and Podstyazhonomok O.B. Structure and properties of multilayer coatings deposited with PVD-ARC technology. *Surface engineering*, 2, 57–63 (2011).
16. Upadhyay R., Brossard N. and Chen C.H. Mechanisms underlying astringency: introduction to an oral tribology approach. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 49, 104003 (2016).
17. Grinberg P.B., Korotaev D.N., Poleshchenko K.N. et al. Developing and producing nanostructured topocomposites. *Vestnik SibADI* [The Russian Automobile and Highway Industry Journal], 2015, no. 3(43), pp. 39–45. (In Russ.)
18. Grinberg P.B., Poleshchenko K.N., Goryunov V.N. et al. The method for producing nanostructured topocomposites to increase load capacity of structural elements of power equipment. *Vestnik Omskogo universiteta* [Bulletin of Omsk University], 2012, no. 2, pp. 253–258. (In Russ.)
19. Korotaev D.N., Eremin E.N., Poleshchenko K.N. et al. Nanostructured titanium coatings for parts operating under conditions of fretting-corrosion. *AIP Conference Proceedings*, 040019 (2019). <https://doi.org/10.1063/1.5122138>
20. Grinberg P.B., Poleshchenko K.N., Korotaev D.N. et al. Receiving nanostructural topocomposite coatings in terms of the cascade cross effect. *Journal of Physics: Conference Series*, 012054 (2019). DOI:10.1088/1742-6596/1210/1/012054
21. Poleshchenko K.N., Korotaev D.N., Eremin E.N., Nesov S.N., Tarasov E.E., Teploukhov A.A., Semenyuk N.A., Ivanova E.V., Lasitsa A.M., Ivanov A.L. Formation of nanostructured topocomposites with cluster-gradient architecture by combined ion-vacuum processing. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2021, vol. 19, no. 2, pp. 68–78. (In Russ.) <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-2-68-78>
22. Kim V.A., Korotaev D.N., Solovev V.V. Thermodynamics of hardening technologies. *Vestnik Amurskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Amur State University], 1999, no. 6, pp. 32–35. (In Russ.)
23. Vershinin G.A., Poleshchenko K.N., Povoroznyuk S.N. et al. Mass transfer in heterogeneous materials under irradiation with high-intensity beams of charged particles. *Surface Investigation*, 16, 761–767 (2001).

Поступила 18.04.2022; принята к публикации 11.05.2022; опубликована 28.06.2022
Submitted 18/04/2022; revised 11/05/2022; published 28/06/2022

Коротаев Дмитрий Николаевич – доктор технических наук, профессор, Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе, Москва, Россия. Email: korotaevd99@mail.ru. ORCID 0000-0002-5957-4135

Тарасов Евгений Евгеньевич – инженер-технолог, Федеральный научно-производственный центр «Прогресс», Омск, Россия. Email: tarasov_ee@mail.ru

Полещенко Константин Николаевич – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник научно-исследовательского отдела, Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), Омск, Россия. Email: k_poleschenko@mail.ru. ORCID 0000-0002-8623-4777

Теплоухов Андрей Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, Омский государственный технический университет, Омск, Россия. Email: a.a.lektor@mail.ru. ORCID 0000-0002-5649-2871

Семенюк Наталья Андреевна – кандидат технических наук, доцент, Омский государственный технический университет, Омск, Россия. Email: sem-natal@mail.ru. ORCID 0000-0003-0103-7684

Орлов Павел Викторович – кандидат технических наук, начальник НИО, Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), Омск, Россия. Email: orlov-pv@mail.ru

Чуранин Вячеслав Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент, Омский государственный технический университет, Омск, Россия. Email: vgchurakin@omgtu.ru. ORCID 0000-0002-6031-1340

Ласица Александр Михайлович – кандидат технических наук, доцент, Омский государственный технический университет, Омск, Россия. Email: lasitsa@mail.ru. ORCID 0000-0002-7187-6400

Dmitriy N. Korotaev – DrSc (Eng.), Professor, Sergio Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia.
Email: korotaevd99@mail.ru. ORCID 0000-0002-5957-4135

Evgeniy E. Tarasov – Process Engineer,
Progress Federal Research and Production Center, Omsk, Russia.
Email: tarasov_ee@mail.ru

Konstantin N. Poleshchenko – DrSc (Eng.), Professor, Chief Researcher of the Research Department, Siberian State Automobile and Highway University, Omsk, Russia.
Email: k_poleschenko@mail.ru. ORCID 0000-0002-8623-4777

Andrey A. Teploukhov – PhD (Eng.), Associate Professor,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia.
Email: a.a.lektor@mail.ru. ORCID 0000-0002-5649-2871

Natalya A. Semenyuk – PhD (Eng.), Associate Professor,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia.
Email: sem-natal@mail.ru. ORCID 0000-0003-0103-7684

Pavel V. Orlov – PhD (Eng.), Head of the Research Department,
Siberian State Automobile and Highway University, Omsk, Russia.
Email: orlov-pv@mail.ru

Vyacheslav G. Churankin – PhD (Eng.), Associate Professor,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia.
Email: vgchurankin@omgtu.ru. ORCID 0000-0002-6031-1340

Aleksandr M. Lasitsa – PhD (Eng.), Associate Professor,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia.
Email: lasitsa@mail.ru. ORCID 0000-0002-7187-6400

ЭНЕРГЕТИКА МЕТАЛЛУРГИИ, ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ

И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ

METALLURGICAL POWER ENGINEERING, ENERGY SAVING AND ELECTRICAL SYSTEMS

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

УДК 621.365.22

DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-2-120-132



РАЗРАБОТКА УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ИНЖЕКТОРАМИ УГЛЕРОДОСОДЕРЖАЩЕГО МАТЕРИАЛА ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ

Николаев А.А., Тулупов П.Г., Рыжевол С.С., Ивекеев В.С.

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

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). В современной металлургии широкое распространение получили дуговые сталеплавильные печи. В связи с энергоёмкостью данных установок актуальной задачей является разработка усовершенствованных алгоритмов управления печными агрегатами, обеспечивающих снижение доли затрат на электроэнергию и расходные материалы в составе себестоимости конечного продукта. Одним из путей данной задачи является разработка усовершенствованной системы управления инжекторами углеродосодержащего материала, что является целью данной работы. **Используемые методы.** В процессе исследования выполнен анализ существующего алгоритма управления инжекторами углеродосодержащего материала на примере наиболее распространённой системы управления электрическим режимом ARCOS (Primetals Technologies, ранее Siemens VAI, VAI Fuchs, Vantron, Германия). Выявлены основные недостатки, связанные с применяемым параметром управления, а также общим подходом к определению степени экранирования дуг вспененным шлаком. С учётом опыта ранее проведённых исследований предложены технические решения, направленные на устранение выявленных недостатков. **Новизна.** Предложены новые подходы к управлению расходом углеродосодержащего материала, в основе которых лежит применение величины относительного действующего значения суммарных нечётных гармоник напряжений дуг в качестве параметра регулирования, а также учёт интенсивности действующего режима продувки расплава. **Результат.** Разработана новая система управления инжекторами углеродосодержащего материала дуговой сталеплавильной печи, обеспечивающая улучшенное шлакообразование и условия горения электрических дуг за счёт использования усовершенствованной формулы расчёта коэффициента шлака, а также вспомогательной системы автоматической адаптации длин дуг при недостаточном шлакообразовании. **Практическая значимость.** Применение новой системы управления инжекторами позволяет обеспечить оптимальную величину расхода углеродосодержащего материала в соответствии с интенсивностью продувки расплава, а также возможностью полного экранирования дуг вспененным шлаком в условиях заданной рабочей точки. В результате обеспечивается сокращение себестоимости конечного продукта за счёт увеличения теплового КПД дуг и сокращения расхода углеродосодержащего материала.

Ключевые слова: дуговая сталеплавильная печь, система управления электрическим режимом, углеродосодержащий материал, инжектор, тепловой КПД электрической дуги.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект №FZRU-2020-0011).

© Николаев А.А., Тулупов П.Г., Рыжевол С.С., Ивекеев В.С., 2022

Для цитирования

Разработка усовершенствованной системы автоматического управления инжекторами углеродосодержащего материала дуговой сталеплавильной печи / Николаев А.А., Тулупов П.Г., Рыжевол С.С., Ивекеев В.С. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №2. С. 120–132. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-2-120-132>



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

DEVELOPMENT OF AN IMPROVED AUTOMATED CONTROL SYSTEM FOR CARBON INJECTORS OF AN ELECTRIC ARC FURNACE

Nikolaev A.A., Tulupov P.G., Ryzhevol S.S., Ivekeev V.S.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). At present, electric arc furnaces are widely used in modern metallurgy. Due to the energy intensity of these installations, a relevant task is to develop improved algorithms for controlling furnace units that reduce a share of costs for electricity and consumables in the cost of the final product.

One of the ways for completing this task is to develop an improved control system for carbon injectors, which is the objective of this research. **Methods Applied.** In the study, the existing control algorithm for carbon injectors was analyzed using the example of the most common electric mode control system, ARCOS (Primetals Technologies, formerly Siemens VAI, VAI Fuchs, Vantron, Germany). The main disadvantages associated with the applied control parameter, as well as a general approach to determining the degree of arc shielding by foamed slag, are revealed. Taking into account the experience of previous studies, the authors proposed the technical solutions to eliminate the identified disadvantages. **Originality.** The paper describes new approaches to controlling the carbon material consumption, which are based on the use of the relative effective value of the total odd harmonics of arc voltages as a control parameter, as well as taking into account the rate of the current schedule of argon blowing.

Result. A new control system for carbon injectors of the electric arc furnace has been developed to provide improved slag formation and the conditions for arcing by using an improved formula for calculating the slag coefficient, as well as an auxiliary system for automatic adaptation of arc lengths in case of insufficient slag formation.

Practical Relevance. The use of a new injector control system makes it possible to ensure the optimal flow rate of carbon material in accordance with the melt blowing rate, as well as the possibility of complete shielding of the arcs with foamed slag at a given operating point. As a result, the cost of the final product is reduced by increasing the thermal efficiency of the arcs and decreasing the consumption of the carbon material.

Keywords: electric arc furnace, electric mode control system, carbon material, injector, electric arc thermal efficiency.

The research has been funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project No. FZRU-2020-0011).

For citation

Nikolaev A.A., Tulupov P.G., Ryzhevol S.S., Ivekeev V.S. Development of an Improved Automated Control System for Carbon Injectors of an Electric Arc Furnace. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 2, pp. 120–132. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-2-120-132>

Введение

Современная металлургия является одной из наиболее приоритетных отраслей современной экономики. По последним данным доля металлургического производства в валовой добавленной стоимости (ВДС) РФ составила около 2,4%, в промышленном производстве – порядка 17,8%, а в экспорте – 13,5%. При этом предприятия металлургии используют около 20% от общего объема электроэнергии, производимой генерирующими компаниями с собственными электростанциями. Одним из наиболее энергоёмких потребителей электрической энергии на металлургических предприятиях являются дуговые сталеплавильные печи (ДСП). Современные ДСП ха-

рактеризуются следующими основными технико-экономическими показателями: удельная мощность печного трансформатора в диапазоне 0,7–1 МВА/т, продолжительность плавки от выпуска до выпуска около 40 мин, масса выплавляемой стали от 100 до 250 т. За последние десятилетия при освоении новых производственных мощностей, а также реконструкции старых сталеплавильных цехов наметилась устойчивая тенденция внедрения ДСП в производство. Это связано с высокими технико-экономическими, экологическими и эксплуатационными показателями работы данных агрегатов.

Несмотря на очевидные преимущества, показатели энергопотребления ДСП остаются

значительными и составляют весомую долю в себестоимости конечного продукта. Вследствие этого особую актуальность приобретает задача снижения потребления электрической энергии в процессе выплавки жидкой стали. Одним из путей решения данной задачи является обеспечение максимального теплового КПД электрических дуг путём их экранирования вспененным шлаком. Для этого на конечной стадии плавки через специальные инжекторы в ванну печи осуществляется подача углеродсодержащего материала (УСМ). При этом управление расходом УСМ осуществляется специальная вспомогательная система в составе системы управления электрическим режимом, поставляемой в комплекте с основным технологическим оборудованием.

Отметим, что практически во всех современных системах подход к управлению инжекторами на протяжении последних десятков лет остаётся неизменным. Опыт эксплуатации показывает, что штатные решения не всегда являются эффективными и не обеспечивают полного экранирования дуг вспененным шлаком на поздних стадиях плавки, а также в ряде случаев приводят к существенно завышенному расходу УСМ. Таким образом, основной целью данной работы является анализ недостатков существующего подхода к управлению инжекторами на примере системы ARCOS (Primetals Technologies, ранее Siemens VAI, VAI Fuchs, Vantron, Германия), а также разработка новой, более эффективной системы управления инжекторами, в которой выявленные недостатки будут компенсированы.

Краткий обзор современных подходов к диагностике уровня вспененного шлака в ДСП. Анализ недостатков системы управления инжекторами УСМ на примере системы ARCOS

Очевидно, что для управления режимом работы инжектора УСМ необходимо обладать актуальной информацией об уровне вспененного шлака в ванне печи (рис. 1). Для решения данной задачи в промышленности существует несколько подходов. Первый подход подразумевает установку на кожухе печи виброметров, сигнал с которых в дальнейшем с помощью специальных алгоритмов преобразуется в сигнал задания на расход УСМ. В осно-

ве данного принципа лежит различие среды прохождения звуковых волн при горении открытых дуг и среды, формируемой при наведении вспененного шлака. Первой практической реализацией подобного подхода с возможностью построения пространственной модели распределения вспененного шлака в ванне печи стал модуль FSM (Foaming Slag Manager), разработанный фирмой Siemens VAI (Германия) и получивший своё дальнейшее развитие в системе Melt Expert (Primetals Technologies, Великобритания).

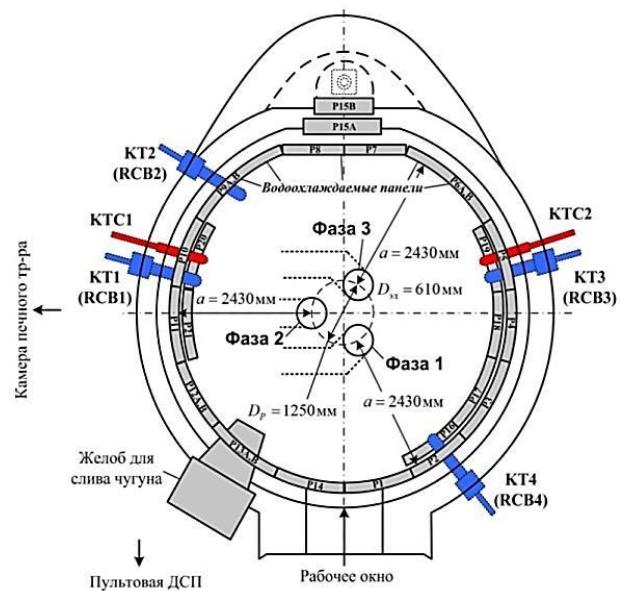


Рис. 1. Типовой чертёж ДСП-120 (95 МВА) с указанием расположения электродов фаз 1-3, комбинированных фурм-горелок (КТ, RCB), инжекторов углерода (КТС) и водоохлаждаемых панелей (P1-P21)

Fig. 1. Typical drawing of EAF-120 (95 MVA), representing the electrodes in phases 1-3, refining combined burners (KT, RCB), carbon injectors (KTC) and water-cooled panels (P1-P21)

Для наглядности функциональная схема модуля FSM приведена на рис. 2. Отметим, что данному направлению посвящено определённое количество отечественных и зарубежных исследований, в качестве примера которых можно привести работы [1, 2]. Несмотря на эффективность, применение метода виброметрии не получило широкого распространения на действующем производстве. Это связано с тем, что эксплуатация виброметров в агрессивных условиях электросталеплавильных цехов часто приводит их к выходу из строя.

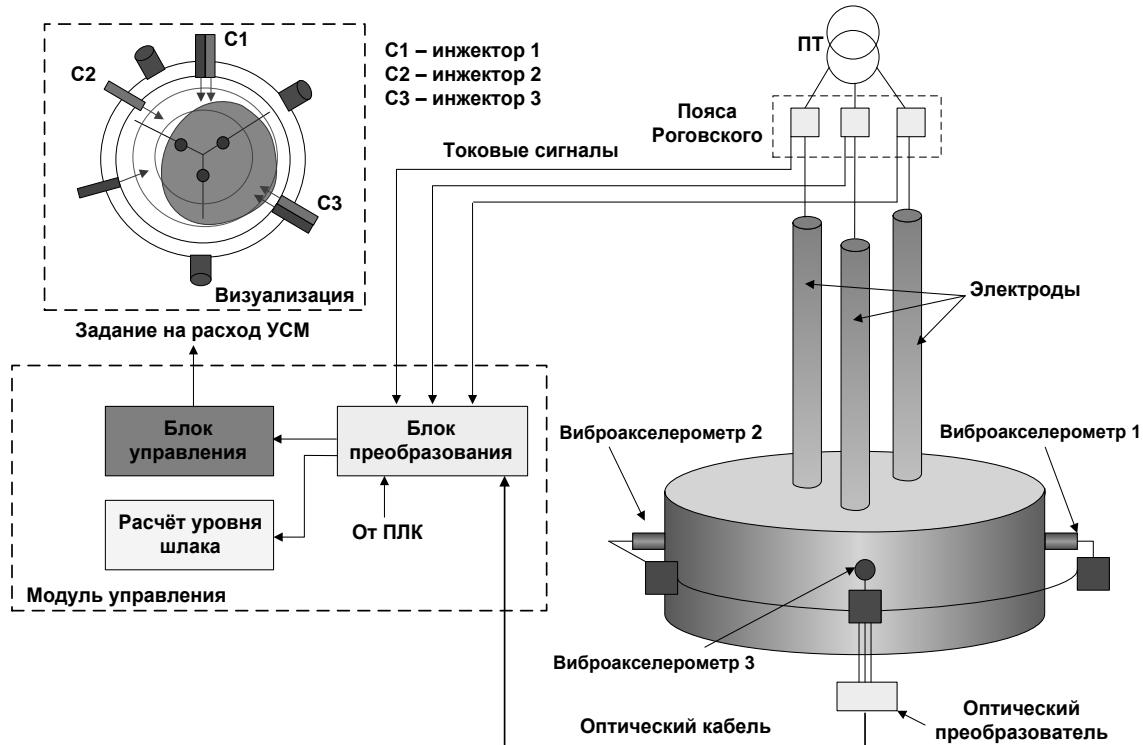


Рис. 2. Функциональная схема модуля диагностики уровня вспененного шлака FSM (Foaming Slag Manager), разработанного фирмой Siemens VAI (Германия)

Fig. 2. Functional diagram for foaming slag diagnostic block FSM (Foaming Slag Manager) designed by Siemens VAI (Germany)

В связи с этим в подавляющем большинстве современных систем управления электрическим режимом [3] применяется второй подход, в соответствии с которым управление режимом работы инжектора осуществляется на основании величины коэффициента шлака, который определяется по формуле

$$K_{\text{ШЛАК}} = \frac{A}{K_I}, \quad (1)$$

где K_I – суммарный коэффициент гармонических составляющих тока (в зарубежной терминологии – Total Harmonic Distortion или THD_I); A – масштабный коэффициент.

В свою очередь, величина суммарного коэффициента гармонических составляющих тока определяется в соответствии со следующим выражением:

$$K_I = \frac{\sqrt{I^2 - I_{(1)}^2 - I_{(0)}^2}}{I_{(1)}} \cdot 100\% = \frac{I_{\text{ВГ}}}{I_{(1)}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где I – действующее (среднеквадратическое) значение тока; $I_{(1)}$ – действующее значение тока 1-й гармоники; $I_{(0)}$ – постоянная составляющая тока; $I_{\text{ВГ}}$ – действующее значение высших гармоник.

В основе управления инжектором по величине $K_{\text{ШЛАК}}$ лежит принцип, суть которого заключается в том, что по мере увеличения тепловой постоянной времени дуги Θ_d и наведения вспененного шлака доля высших гармоник в составе сигнала тока электрической дуги существенно сокращается. Аналогичный эффект используется в системах диагностики стадии плавления шихты по высшим гармоникам токов и напряжений дуг, что подробно описано в работе [4] и наглядно продемонстрировано с помощью **рис. 3**.

Отметим, что тепловая постоянная времени электрической дуги является переменной в составе дифференциального уравнения мгновенной проводимости электрической дуги (уравнение Касси) [5], которое выражается следующей формулой:

$$\Theta_d(t) \frac{dg_d(t)}{dt} = \left(\frac{u_d^2(t)}{E_d^2(t)} - 1 \right) g_d(t) dt, \quad (3)$$

где $g_d(t)$ – мгновенное значение проводимости электрической дуги; Θ_d – тепловая постоянная времени электрической дуги; $E_d(t)$ – противоЭДС электрической дуги.

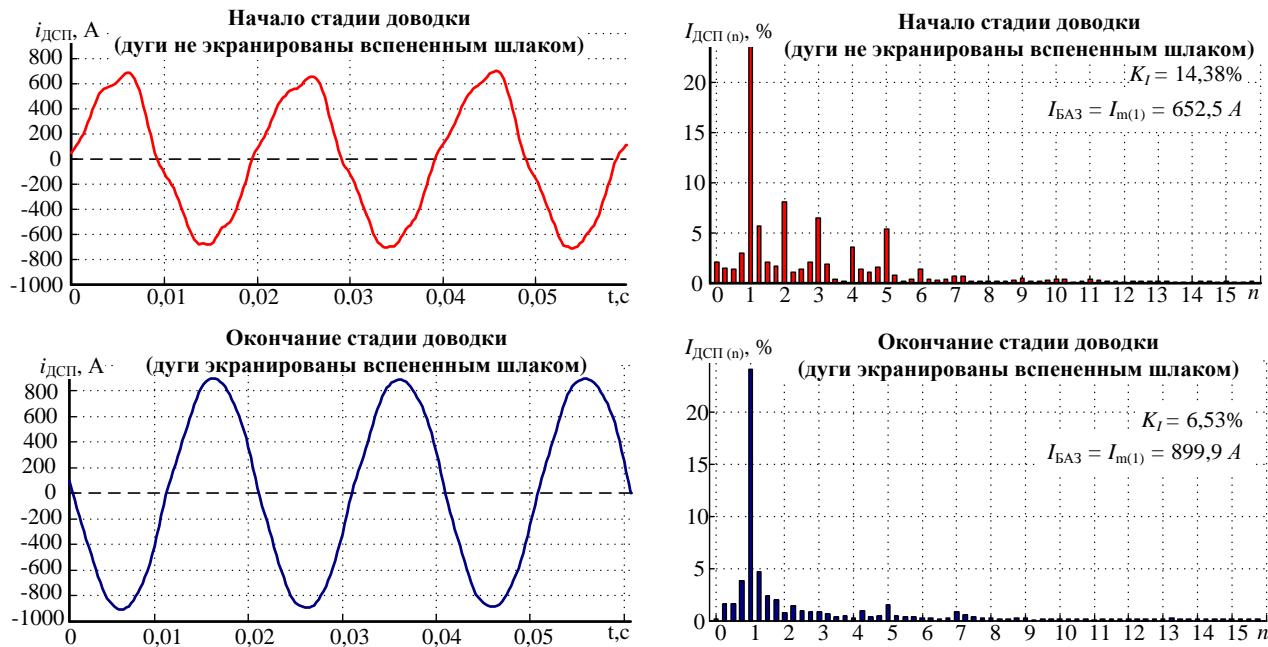


Рис. 3. Влияние стадии плавления шихты на уровень высших гармоник в составе сигнала тока электрической дуги
Fig. 3. Correlation between the level of electric arc current higher harmonics and the charge melting stage

Как упоминалось ранее, подход к управлению инжекторами с использованием величины $K_{\text{ШЛАК}}$ для подавляющего большинства современных систем управления электрическим режимом является типовым и не менялся за последние десятилетия. Рассмотрим структуру блока управления расходом УСМ в составе системы управления электрическим режимом ARCOS, получившей наиболее широкое распространение на отечественном и зарубежном рынке (рис. 4).

Приведём краткое описание работы данного блока. Изначально в системе производится расчёт коэффициента шлака $K_{\text{ШЛАК}}$ в соответствии с формулой (2). Далее на вход нечёткого регулятора поступает два сигнала в режиме реального времени: непосредственно $K_{\text{ШЛАК}}$ и первая производная от $K_{\text{ШЛАК}}$. Нечёткий регулятор содержит в себе три основные предустановленные характеристики. Первая характеристика устанавливает формальные границы для 5-ти уровней образования вспененного шлака, которые в системе ARCOS имеют названия «no slag» (шлак отсутствует), «poor slag» (слабое образование вспененного шлака), «medium slag» (среднее образование вспененного шлака), «good slag» («хорошее образование вспененного шлака»), «excellent slag» («наилучшее образование вспененного шлака»). Вторая характеристика определяет гра-

ницы для 3-х уровней, характеризующих динамику шлакообразования: «slag growing» (уровень вспененного шлака растёт), «slag shrinking» (уровень вспененного шлака сокращается), «slag steady» (уровень вспененного шлака стабилен). Третья характеристика формирует уставку сигнала задания на открытие (закрытие) инжектора для 5-ти основных режимов работы: «no injection» (инжектор выведен из работы), «low injection» («низкая интенсивность работы инжектора»), «medium injection» («средняя интенсивность работы инжектора»), «high injection» («высокая интенсивность работы инжектора»), «max injection» («максимальная интенсивность работы инжектора»).

Работа регулятора осуществляется по набору заранее предустановленных правил, которые сведены в табл. 1. Например, если система наблюдает отсутствие вспененного шлака, а также отсутствие динамики его увеличения, инжектор переводится в режим максимально интенсивной работы. В ином случае, если уровень вспененного шлака максимальен и продолжает нарастать, система выводит инжектор из работы и прекращает подачу УСМ в ванну печи. Для наглядности на рис. 5 представлены основные характеристики нечёткого регулятора, полученные на действующем производственном объекте.

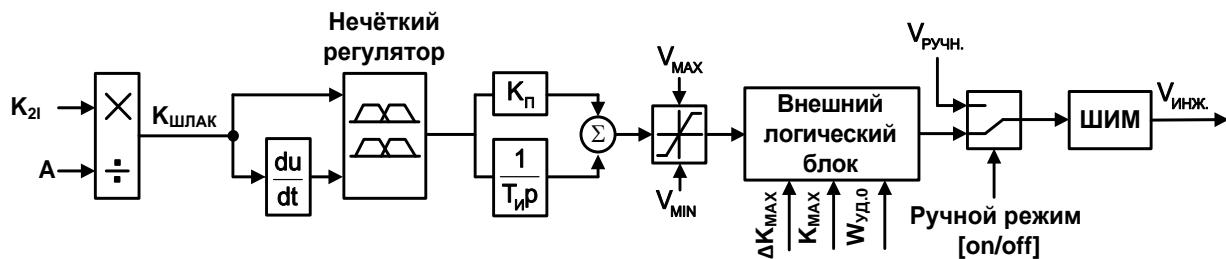


Рис. 4. Структура блока управления инжектором УСМ в системе управления электрическим режимом ARCOS (Primetals Technologies, ранее Siemens VAI, VAI Fuchs, Vantron, Германия)

Fig. 4. The structure of the carbon-injection control block in electric mode control system ARCOS (Primetals Technologies, former Siemens VAI, VAI Fuchs, Vantron, Germany)

Таблица 1. Набор правил для работы нечёткого регулятора в блоке управления инжектором УСМ в системе ARCOS
Table 1. The rules of the fuzzy regulator in the carbon injection control block for ARCOS control system

№ п/п	Уровень шлака	Темп нарастания уровня вспененного шлака	Режим работы инжектора
1	Excellent slag (наилучшее образование вспененного шлака)	Slag growing (уровень вспененного шлака растёт)	No injection (инжектор выведен из работы)
2	Excellent slag (наилучшее образование вспененного шлака)	Slag steady (уровень вспененного шлака стабилен)	No injection (инжектор выведен из работы)
3	Excellent slag (наилучшее образование вспененного шлака)	Slag shrinking (уровень вспененного шлака сокращается)	Low injection (низкая интенсивность работы инжектора)
4	Good slag (хорошее образование вспененного шлака)	Slag growing (уровень вспененного шлака растёт)	No injection (инжектор выведен из работы)
5	Good slag (хорошее образование вспененного шлака)	Slag steady (уровень вспененного шлака стабилен)	Low injection (низкая интенсивность работы инжектора)
6	Good slag (среднее образование вспененного шлака)	Slag shrinking (уровень вспененного шлака сокращается)	Medium injection (средняя интенсивность работы инжектора)
7	Medium slag (среднее образование вспененного шлака)	Slag growing (уровень вспененного шлака растёт)	Low injection (низкая интенсивность работы инжектора)
8	Medium slag (среднее образование вспененного шлака)	Slag steady (уровень вспененного шлака стабилен)	Medium injection (средняя интенсивность работы инжектора)
9	Medium slag (среднее образование вспененного шлака)	Slag shrinking (уровень вспененного шлака сокращается)	High injection (высокая интенсивность работы инжектора)
10	Poor slag (слабое образование вспененного шлака)	Slag growing (уровень вспененного шлака растёт)	Medium injection (средняя интенсивность работы инжектора)
11	Poor slag (слабое образование вспененного шлака)	Slag steady (уровень вспененного шлака стабилен)	Max injection (максимальная интенсивность работы инжектора)
12	Poor slag (слабое образование вспененного шлака)	Slag shrinking (уровень вспененного шлака сокращается)	High injection (высокая интенсивность работы инжектора)
13	No slag (шлак отсутствует)	Slag growing (уровень вспененного шлака растёт)	High injection (высокая интенсивность работы инжектора)
14	No slag (шлак отсутствует)	Slag steady (уровень вспененного шлака стабилен)	Max injection (максимальная интенсивность работы инжектора)
15	No slag (шлак отсутствует)	Slag shrinking (уровень вспененного шлака сокращается)	Max injection (максимальная интенсивность работы инжектора)

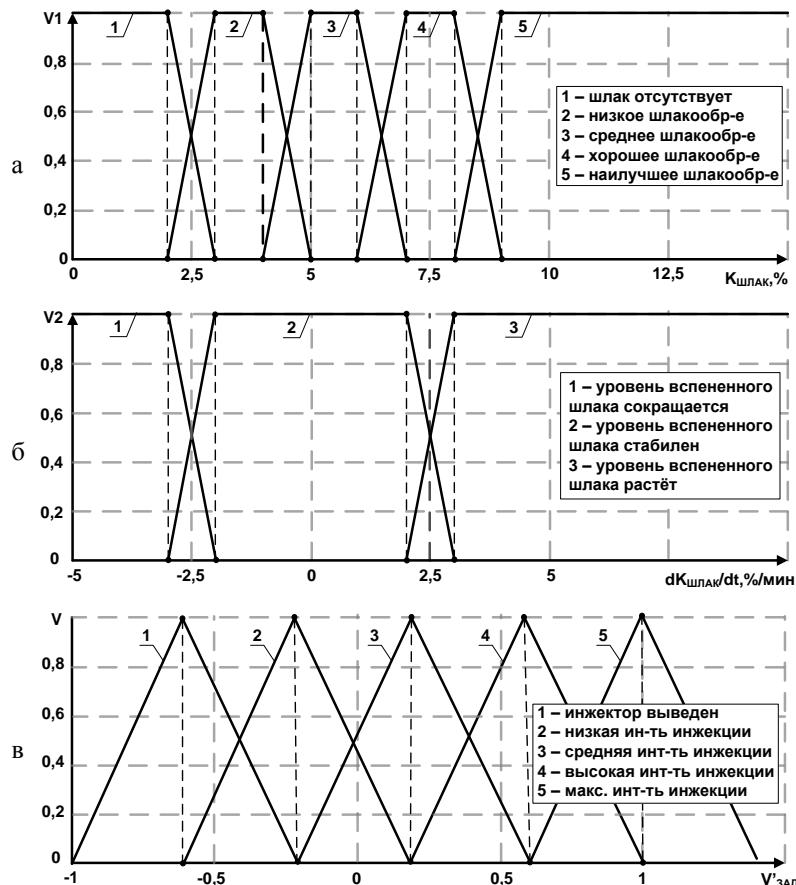


Рис. 5. Характеристики нечёткого регулятора в блоке управления инжекторами системы ARCOS, отвечающие за:
а – оценку уровня вспененного шлака; б – оценку динамики изменения уровня вспененного шлака;

в – формирование сигнала задания на открытие инжектора
Fig. 5. Characteristics of the fuzzy regulator for the carbon injection control block in ARCOS, responsible for:
a is estimation of the foaming slag level; b is estimation of trends in foaming slag; c is control of an injector opening process

На выходе нечёткого регулятора в данном случае формируется сигнал задания на открытие инжектора, находящийся в диапазоне от -1 до 1,5. При этом величина «-1» соответствует максимально быстрому закрытию инжектора и сокращению подачи УСМ, а величина «1,5», наоборот, максимально быстро открытию инжектора и увеличению подачи УСМ. Выходной сигнал с нечёткого регулятора поступает на традиционный ПИ-регулятор, в котором реализуется приведение сигнала задания из безразмерных единиц в процента. Далее сигнал задания на открытие (закрытие) инжектора проходит через стандартный блок ограничения в диапазоне от V_{\min} до V_{\max} , внешний логический блок, который выводит регулятор из работы при превышении максимальной величины $K_{шлак}$ или скорости его нарастания, а также отслеживает момент начала работы блока управления в целом по достижении заданной величины удельного расхода электроэнергии $W_{уд}$. В итоге результирующий

выходной сигнал поступает на блок ШИМ, в котором формируется непосредственное воздействие на механизм открытия (закрытия) инжектора. Отметим, что в системе также предусмотрена возможность ручного управления инжектором, что может быть полезно при возникновении непредвиденных ситуаций.

Анализ недостатков существующих технических решений. Разработка усовершенствованной структуры блока управления инжектором

Структура блока управления инжекторами УСМ в системе ARCOS имеет ряд недостатков, которые были выявлены в процессе эксплуатации на различных металлургических предприятиях России и зарубежных стран. Во-первых, показатель K_I [6–9], на основе которого выполняется расчёт $K_{шлак}$, обладает сильной зависимостью от несимметричных режимов горения дуг, а также возмущающих воздействий по

длине электрической дуги [10–12]. Вследствие этого возникает необходимость применять входные фильтры сигнала с большими постоянными временем (до 15–20 с), что приводит к высокой инерционности системы, неоптимальным шлаковым режимам и перерасходу УСМ. Кроме того, в структуре блока не учитывается режим аргонной продувки (при наличии), который оказывает существенное влияние на гармонический состав тока дуги. По этой причине одно и то же значение $K_{\text{ШЛАК}}$ может быть показателем оптимального шлакового режима при низкой интенсивности продувки расплава, но недостаточной при продувке высокой интенсивности. Помимо вышеперечисленного, существующая система также не учитывает ситуацию, при которой из-за использования УСМ низкого качества не удастся достичь оптимального шлакового режима и инжекторы будут работать при существенной величине расхода вхолостую, а также возможной ситуации поломки одного из инжекторов УСМ, в результате которого возникает несимметричное закрытие дуг вспененным шлаком.

Для компенсации обозначенных недостатков предлагается использовать усовершенствованную систему управления УСМ, которая имеет ряд отличий от существующей. Так, в новой системе вместо коэффициента шлака $K_{\text{ШЛАК}}$, который рассчитывается на основе K_{2i} , используется параметр $K_{\text{ШЛАК}_U}$, рассчитываемый на основании величины относительного действующего значения нечётных гармоник напряжения электрической дуги в соответствии со следующей формулой:

$$U'_{\text{д.вг.нечёт}\Sigma} = \frac{\sqrt{U_{\text{д(3)}}^2 + U_{\text{д(5)}}^2 + U_{\text{д(7)}}^2 + U_{\text{д(9)}}^2}}{U_{2\text{ФН}}} \cdot 100\%, \quad (4)$$

$$K_{\text{ШЛАК}_U} = \frac{U'_{\text{д.вг.нечёт}\Sigma}}{A} \cdot 100\%, \quad (5)$$

где $U_{\text{д(3)}}, U_{\text{д(5)}}, U_{\text{д(7)}}, U_{\text{д(9)}}$ – действующие значения 3, 5, 7 и 9-й гармоник напряжения электрической дуги соответственно; $U_{2\text{Н}}$ – номинальное фазное напряжение печного трансформатора на текущей ступени РПН.

Отметим, что для расчёта $U'_{\text{вг.нечёт}\Sigma}$ необходимо выполнить косвенный расчёт мгновенного значения напряжения электрической дуги в каждой фазе, который осуществляется на основании прямых измерений токов дуг и фазных напряжений в соответствии со следующей формулой:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{\text{д1}}(t) = u_{2\Phi 1}(t) - i_{\text{д1}}(t)R_{\text{KC1}} - L_{\text{KC1}} \frac{di_{\text{д1}}(t)}{dt} \pm \\ \pm M_{21} \frac{di_{\text{д2}}(t)}{dt} \pm M_{31} \frac{di_{\text{д3}}(t)}{dt}; \\ u_{\text{д2}}(t) = u_{2\Phi 2}(t) - i_{\text{д2}}(t)R_{\text{KC2}} - L_{\text{KC2}} \frac{di_{\text{д2}}(t)}{dt} \pm \\ \pm M_{12} \frac{di_{\text{д1}}(t)}{dt} \pm M_{32} \frac{di_{\text{д3}}(t)}{dt}; \\ u_{\text{д3}}(t) = u_{2\Phi 3}(t) - i_{\text{д3}}(t)R_{\text{KC3}} - L_{\text{KC3}} \frac{di_{\text{д3}}(t)}{dt} \pm \\ \pm M_{13} \frac{di_{\text{д1}}(t)}{dt} \pm M_{23} \frac{di_{\text{д2}}(t)}{dt}, \end{array} \right. \quad (6)$$

где $R_{\text{KC1}}, R_{\text{KC2}}, R_{\text{KC3}}$ – активное сопротивление участка короткой сети, $L_{\text{KC1}}, L_{\text{KC2}}, L_{\text{KC3}}$ – индуктивное сопротивление участка короткой сети; $u_{\text{д1}}(t), u_{\text{д2}}(t), u_{\text{д3}}(t)$ – мгновенное значение напряжения дуги; $u_{2\Phi 1}(t), u_{2\Phi 2}(t), u_{2\Phi 3}(t)$ – мгновенное значение фазного напряжения на вторичной стороне ПТ; $i_{\text{д1}}(t), i_{\text{д2}}(t), i_{\text{д3}}(t)$ – мгновенные значения токов дуг; $M_{12}, M_{21}, M_{23}, M_{32}, M_{13}, M_{31}$ – коэффициенты взаимной индуктивности между фазами печи (знаки при составляющих с данными коэффициентами в системе уравнений определяются индивидуально для каждого объекта в зависимости от ориентации консолей в пространстве).

Выбор $U'_{\text{вг.нечёт}\Sigma}$ в качестве параметра управления обусловлен результатами исследования [13], в котором доказано, что данный показатель имеет прямую связь с величиной тепловой постоянной времени дуги $\theta_{\text{д}}$, а также в наименьшей мере подвержен влиянию несимметричных режимов и возмущающих воздействий по длине электрической дуги. Благодаря этому отпадает необходимость в применении входных фильтров с большими постоянными времени, что решает проблему инерционности исходной системы.

Помимо нового параметра управления, в системе предусмотрены два дополнительных усовершенствования: 1) использована более сложная структура нечёткого регулятора, в которой предопределён индивидуальный набор характеристик, аналогичных **рис. 5**, для различных режимов продувки расплава аргоном. Необходимость этого связана с тем, что при более интенсивной продувке значение $K_{\text{ШЛАК}_U}$, свидетельствующее о достижении оптимального шлакового режима, будет несколько завышено по сравнению с тем же значением при низкой интенсивности продувки. Несмотря на то, что показатель $K_{\text{ШЛАК}_U}$ является стабильным и не подвер-

жен сильному влиянию возмущений, вызванных продувкой, данная опция может быть полезна для печей малой и средней мощности; 2) предусмотрен дополнительный блок, который отслеживает продолжительную работу инжекторов без существенного изменения шлакового режима. При возникновении такой ситуации система управления адаптирует электрический режим путём перехода на более короткую длину электрической дуги, формируемой переходом на новую рабочую кривую N_{PK} , что позволит увеличить тепловой КПД дуг. При этом набор правил, инициирующих переход на более короткую дугу, может определяться индивидуально для каждого отдельно взятого объекта.

С учётом вышеперечисленного функциональная схема усовершенствованного блока управления УСМ приведена на **рис. 6**. Возможная структура алгоритма управления рабочей кривой N_{PK} приведена на **рис. 7**, на котором следующие обозначения: W_{ABC} – абсолютное значение потребленной электроэнергии [$\text{kВт}\cdot\text{ч}$]; $W_{ГР}$ – граничные значения абсолютного расхода электроэнергии, используемые для перехода к точкам алгоритма [$\text{kВт}\cdot\text{ч}$]; $W_{РАСЧ}$ – расчетное значение ожидаемого расхода электроэнергии для закрытия пальцев; $VT_{ПАН}$ – рассчитанные скорости изменения температуры водоохлаждаемых панелей [$^{\circ}\text{C}/\text{мин}$]; $VT_{ЗАД}$ – граничные значения скоростей изменения температуры водоохлаждаемых панелей

[$^{\circ}\text{C}/\text{мин}$]; $K_{ВСПЕН}$ – коэффициент вспенивания шлака, рассчитываемый на основании информации о высших гармониках токов дуг; $K_{ВСПЕН.ГР}$ – граничные значения коэффициентов вспенивания шлака, используемые для изменения длины электрической дуги на стадии доводки металла.

В данном случае при выборе значения N_{PK} , помимо стандартных условий по абсолютному расходу электроэнергии, используют также другие технологические параметры, такие как температура водоохлаждаемых панелей, а также коэффициент вспенивания шлака, рассчитанный по сигналу $U'_{ВГ.НЕЧЕТ.Σ}$. Набор сочетаний ступеней печного трансформатора и номеров рабочих кривых для различных режимов данного алгоритма приведён в **табл. 2**. При этом режимы 6, 7 и 8 соответствуют режимам с разными длинами дуг для поздней стадии плавки.

Таким образом, применение усовершенствованного блока позволит обеспечить более рациональный расход УСМ, сформировать электрический режим с максимальным тепловым КПД электрических дуг в соответствии с текущим распределением вспененного шлака в ванне печи, а также адаптировать работу инжектора к различным режимам продувки расплава. При этом особую актуальность для дальнейших исследований приобретает задача установки взаимосвязи между $K_{ШЛАКУ}$, уровнем вспененного шлака и режимом продувки расплава.

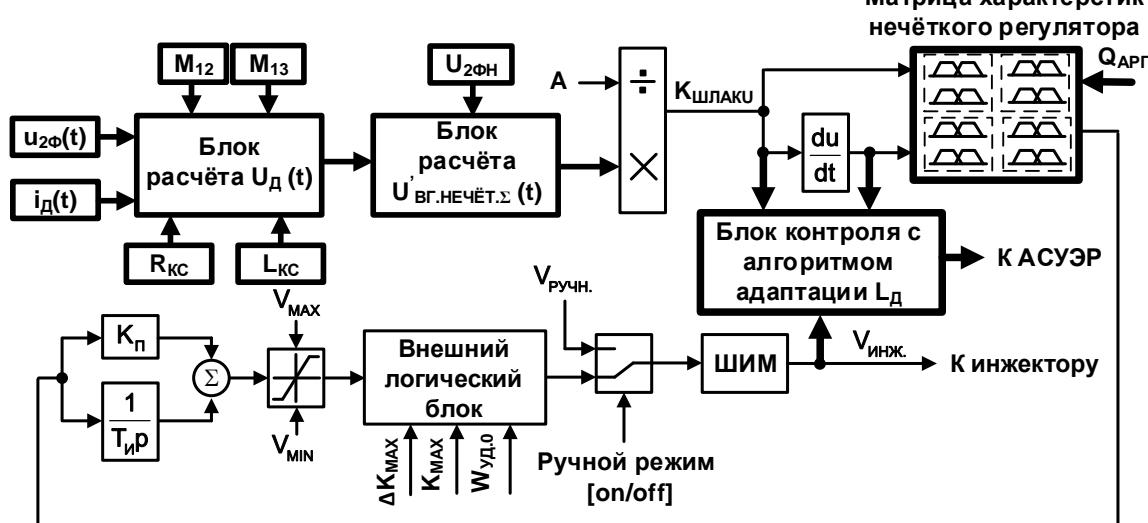


Рис. 6. Структура усовершенствованного блока управления инжектором УСМ (дополнительные блоки усовершенствованной системы управления инжектором УСМ выделены жирными линиями)

Fig. 6. The structure of the modified carbon-injection control block (additional blocks of the improved carbon-injection control system are highlighted in bold)

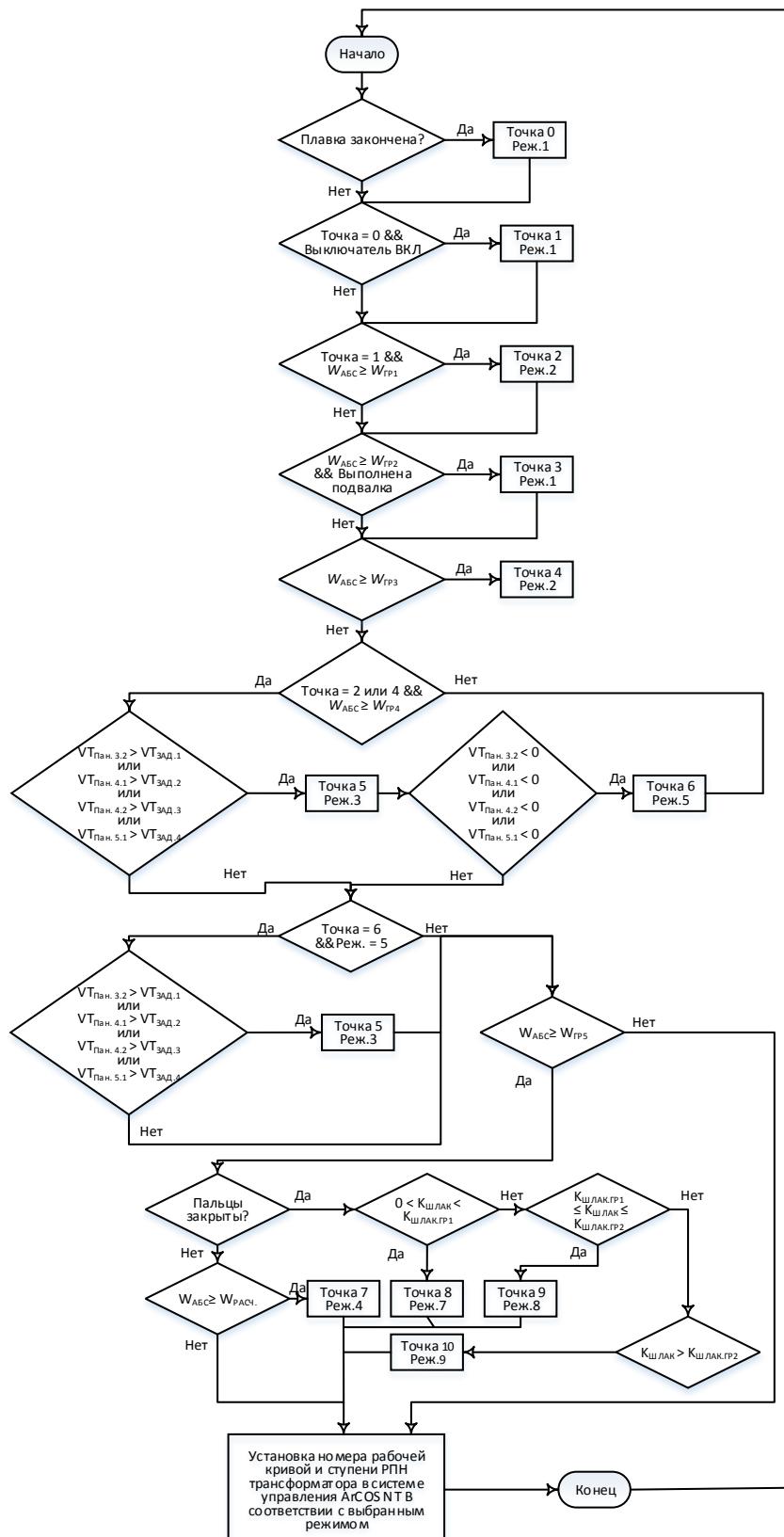


Таблица 2. Набор сочетаний ступеней печного трансформатора и номеров рабочих кривых для различных режимов алгоритма автоматической адаптации длины дуги к шлаковому режиму

Table 2. The values of furnace transformer taps and operating curve numbers for the modified adaptation algorithm of electric arc length to a slag level

Номер режима	Номер ступени печного трансформатора N_{TP}	Номер рабочей кривой N_{PK}
1	7	5
2	9	5
3	9	3
4	8	4
5	9	5
6	8	3
7	8	2
8	8	1

Заключение

1. В настоящее время существует два основных подхода к управлению инжекторами УСМ в ДСП. Первый подход основан на анализе сигналов с виброакселерометров, установленных на кожухе печи. Несмотря на эффективность, данный подход не получил широкого распространения на практике ввиду того, что эксплуатация вибрационных датчиков в агрессивных условиях электросталеплавильных цехов часто приводит к их поломке. Второй подход основан на анализе гармонического состава тока электрической дуги. В его основе лежит явление сокращения доли высших гармонических составляющих в составе сигнала тока дуги по мере экранирования электрических дуг вспененным шлаком. Тем не менее данный подход, а также его реализация в современных системах управления электрическим режимом имеет ряд недостатков. На примере блока управления инжекторами в системе ARCOS (Primetals Technologies, ранее Siemens VAI, VAI Fuchs, Vantron, Германия) было выявлено, что работа блока была слишком инерционной ввиду необходимости применения фильтров с большими постоянными временем. Данная необходимость вызвана тем, что параметр управления $K_{шлак}$, рассчитываемый на основе суммарного коэффициента гармонических составляющих K_I , сильно подвержен влиянию несимметричных режимов и колебаний длины дуг. Помимо этого, к недостаткам существую-

щего технического решения можно отнести отсутствие учёта режима продувки, а также отсутствия блока контроля продолжительной работы инжекторов без существенного изменения уровня вспененного шлака.

2. В связи с этим в исследовании предложена структура нового блока управления инжектором УСМ, отличающаяся тем, что в качестве параметра управления в ней используется более стабильный показатель $K_{шлак}$, который рассчитывается на основе относительного действующего значения нечетных гармоник напряжения дуги. Помимо этого, в новой структуре предусмотрен дополнительный блок контроля, который в случае низкого качества УСМ и недостаточного образования вспененного шлака адаптирует электрический режим путём сокращения длины электрической дуги. Кроме того, в блоке предусмотрена возможность адаптации характеристик нечёткого регулятора к режимам аргонной продувки. Применение результатов данного исследования на действующем производстве позволит обеспечить сокращение расхода УСМ, а также увеличение среднего значения теплового КПД электрических дуг на протяжении плавки. В дополнение к вышеперечисленному сформирована база для проведения дальнейших исследований, направленных на установку взаимосвязи между уровнем $K_{шлак}$, уровнем вспененного шлака и интенсивностью продувки для адекватной настройки регулятора в составе блока управления инжектором УСМ.

Список литературы

1. Advanced Foaming Slag Control / Jansen T., Krüger K., Schliephake H. et al. // 10th European Electric Steelmaking Conference, Graz. 25–28 Sep., 2012, pp. 385–390.
2. Сериков В.А. Акустические и вибрационные характеристики сверхмощных дуговых сталеплавильных электропечей: дис. ... канд. техн. наук / Сериков Виктор Андреевич. Новосибирск, 2016. 147 с.
3. Николаев А.А., Тулупов П.Г., Ивекеев В.С. Сравнительный анализ современных систем управления электрическим режимом дуговых сталеплавильных печей и установок ковш-печь // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2020. Т. 20, №3. С. 52–64. DOI: 10.14529/power200306.
4. Николаев А.А., Тулупов П.Г., Омельченко Е.Я. Экспериментальные исследования гармонического состава токов и напряжений дуг мощной дуговой сталеплавильной печи шахтного типа // Электротехнические системы и комплексы. 2018. №4 (41). С. 63–72.

5. Cassie A.M. Nouvelle théorie des arcs de rupture et rigidité du circuit (New theory of breaker arcs and circuit rigidity) // CIGRE Report. No. 102. 1939.

6. Krüger K. Modellbildung und Regelung der elektrischen Energieumsetzung von Lichtbogenöfen (Modeling and control of the electrical energy conversion in arc furnaces) / Dr.-Ing. Dissertation, Fachbereich Maschinenbau, Universität der Bundeswehr Hamburg, Fortschritt-Berichte VDI. Reihe 6, Nr. 382. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1998.

7. Bowman B., Krüger K. Arc Furnace Physics // Verlag Stahleisen GmbH. Düsseldorf, 2009.

8. Harmonic Analysis of the Industrial Power System with an AC Electric Arc Furnace / G.W. Chang, Y.J. Liu, H.M. Huang, S.Y. Chu // Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting. 2016. Montreal. Canada. IEEE, pp. 1–4. DOI: 10.1109/PES.2006.1709471.

9. Ye Xiao-Mei. The Harmonic Detection based on Wavelet Transform and FFT for Electric Arc Furnaces / Ye Xiao-Mei, Liu Xiao-He // Proceedings of International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition. Baoding. China. IEEE. 2009, pp. 408–412. DOI: 10.1109/ICWAPR.2009.5207486.

10. Simulation Research of Harmonics in Electric System of Arc Furnace / Yongning Wang, Heming Li, Boqiang Xu, Liling Sun // Proceedings of Power System Technology International Conference. IEEE. 2004. Vol.1. Pp. 902–906. DOI: 10.1109/ICPST.2004.1460122.

11. Анализ гармонического состава токов и напряжений дуг в дуговой сталеплавильной печи с использованием математической модели / А.А. Николаев, П.Г. Тулупов, А.С. Денисевич, С.С. Рыжевол // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2021. Т. 21, №2. С. 72–84.

12. Электрические промышленные печи: дуговые печи и установки специального нагрева: учебник для вузов / А.Д. Свенчанский, И.Т. Жердев, А.М. Кручинин [и др.]; под общ. ред. А.Д. Свенчанского. М.: Энергоиздат, 1981. 296 с.

13. Макаров А.Н. Законы теплообмена электрической дуги и факела в металлургических печах и энергетических установках. Тверь: Изд-во Тверск. гос. техн. ун-та, 2012. 164 с.

14. Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika [Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering], 2020, vol. 20, no. 3, pp. 52–64. (In Russ.) DOI: 10.14529/power200306

15. Nikolaev A.A., Tulupov P.G., Omelchenko E.Ya. Experimental analysis of the electric arc current and electric arc voltage harmonic composition of the high power shaft electric arc furnace. *Elektrotehnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 4(41), pp. 63–72. (In Russ.) [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4\(41\)-63-72](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4(41)-63-72)

16. Cassie A.M. Nouvelle théorie des arcs de rupture et rigidité du circuit (New theory of breaker arcs and circuit rigidity). CIGRE Report. No. 102, 1939.

17. Krüger K. Modellbildung und Regelung der elektrischen Energieumsetzung von Lichtbogenöfen (Modeling and control of the electrical energy conversion in arc furnaces). Dr.-Ing. Dissertation, Fachbereich Maschinenbau, Universität der Bundeswehr Hamburg, Fortschritt-Berichte VDI. Reihe 6, Nr. 382. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1998.

18. Bowman B., Krüger K. Arc Furnace Physics. Verlag Stahleisen GmbH. Düsseldorf, 2009.

19. Chang G.W., Liu Y.J., Huang H.M., Chu S.Y. Harmonic analysis of the industrial power system with an AC electric arc furnace. Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting. 2016. Montreal. Canada. IEEE, pp. 1–4. DOI: 10.1109/PES.2006.1709471.

20. Ye Xiao-Mei, Liu Xiao-He. The harmonic detection based on wavelet transform and FFT for electric arc furnaces. Proceedings of International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition. Baoding. China. IEEE, 2009, pp. 408–412. DOI: 10.1109/ICWAPR.2009.5207486.

21. Yongning Wang, Heming Li, Boqiang Xu, Liling Sun. Simulation research of harmonics in electric system of arc furnace. Proceedings of Power System Technology International Conference. IEEE. 2004, vol. 1, pp. 902–906. DOI: 10.1109/ICPST.2004.1460122.

22. Nikolaev A.A., Tulupov P.G., Denisevich A.S., Ryzhevolev S.S. Mathematical model for the harmonic analysis of electric arc currents and voltages in an electric arc furnace. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika* [Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering], 2021, vol. 21, no. 2, pp. 72–84. (in Russ.) DOI: 10.14529/power210208

23. Svenchansky A.D., Zherdev I.T., Kruchinin A.M. et al. *Elektricheskie promyshlennye pechi: Dugovye pechi i ustanovki spetsialnogo nagreva: Uchebnik dlya vuzov* [Electric industrial furnaces: Arc furnaces and special heating installations: A textbook for universities]. Moscow: Energoizdat, 1981, 296 p. (In Russ.)

24. Makarov A.N. *Zakony teploobmena elektricheskoy dugi i fakela v metallurgicheskikh pechakh i energeticheskikh ustanovkakh* [The laws of heat transfer between an electric arc and a torch in metallurgical furnaces and power plants]. Tver: Publishing House of Tver State Technical University, 2012, 164 p. (In Russ.)

References

1. Jansen T., Krüger K., Schliephake H. et al. Advanced foaming slag control. 10th European Electric Steelmaking Conference, Graz. 25–28 Sep., 2012, pp. 385–390.
2. Serikov V.A. *Akusticheskie i vibratsionnye kharakteristiki sverkhmoshchnykh dugovykh staleplavilnykh elektropechey: diss. kand. tekhn. nauk* [Acoustic and vibrational characteristics of high power electric arc furnaces. PhD thesis]. Novosibirsk, 2016. 147 p.
3. Nikolaev A.A., Tulupov P.G., Ivezkeev V.S. The comparative analysis of modern electric mode control systems in electric arc and ladle furnaces. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika* [Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering], 2020, vol. 20, no. 3, pp. 52–64. (In Russ.) DOI: 10.14529/power200306
4. Nikolaev A.A., Tulupov P.G., Omelchenko E.Ya. Experimental analysis of the electric arc current and electric arc voltage harmonic composition of the high power shaft electric arc furnace. *Elektrotehnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 4(41), pp. 63–72. (In Russ.) [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4\(41\)-63-72](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4(41)-63-72)
5. Cassie A.M. Nouvelle théorie des arcs de rupture et rigidité du circuit (New theory of breaker arcs and circuit rigidity). CIGRE Report. No. 102, 1939.
6. Krüger K. Modellbildung und Regelung der elektrischen Energieumsetzung von Lichtbogenöfen (Modeling and control of the electrical energy conversion in arc furnaces). Dr.-Ing. Dissertation, Fachbereich Maschinenbau, Universität der Bundeswehr Hamburg, Fortschritt-Berichte VDI. Reihe 6, Nr. 382. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1998.
7. Bowman B., Krüger K. Arc Furnace Physics. Verlag Stahleisen GmbH. Düsseldorf, 2009.
8. Chang G.W., Liu Y.J., Huang H.M., Chu S.Y. Harmonic analysis of the industrial power system with an AC electric arc furnace. Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting. 2016. Montreal. Canada. IEEE, pp. 1–4. DOI: 10.1109/PES.2006.1709471.
9. Ye Xiao-Mei, Liu Xiao-He. The harmonic detection based on wavelet transform and FFT for electric arc furnaces. Proceedings of International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition. Baoding. China. IEEE, 2009, pp. 408–412. DOI: 10.1109/ICWAPR.2009.5207486.
10. Yongning Wang, Heming Li, Boqiang Xu, Liling Sun. Simulation research of harmonics in electric system of arc furnace. Proceedings of Power System Technology International Conference. IEEE. 2004, vol. 1, pp. 902–906. DOI: 10.1109/ICPST.2004.1460122.
11. Nikolaev A.A., Tulupov P.G., Denisevich A.S., Ryzhevolev S.S. Mathematical model for the harmonic analysis of electric arc currents and voltages in an electric arc furnace. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika* [Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering], 2021, vol. 21, no. 2, pp. 72–84. (in Russ.) DOI: 10.14529/power210208
12. Svenchansky A.D., Zherdev I.T., Kruchinin A.M. et al. *Elektricheskie promyshlennye pechi: Dugovye pechi i ustanovki spetsialnogo nagreva: Uchebnik dlya vuzov* [Electric industrial furnaces: Arc furnaces and special heating installations: A textbook for universities]. Moscow: Energoizdat, 1981, 296 p. (In Russ.)
13. Makarov A.N. *Zakony teploobmena elektricheskoy dugi i fakela v metallurgicheskikh pechakh i energeticheskikh ustanovkakh* [The laws of heat transfer between an electric arc and a torch in metallurgical furnaces and power plants]. Tver: Publishing House of Tver State Technical University, 2012, 164 p. (In Russ.)

Поступила 15.03.2022; принята к публикации 05.04.2022; опубликована 28.06.2022
Submitted 15/03/2022; revised 05/04/2022; published 28/06/2022

Николаев Александр Аркадьевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой АЭПиМ, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: aa.nikolaev@magtu.ru. ORCID 0000-0001-5014-4852

Тулупов Платон Гарриевич – младший научный сотрудник кафедры АЭПиМ, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: tulupov.pg@mail.ru. ORCID 0000-0002-3058-2406

Рыжевол Сергей Сергеевич – аспирант кафедры АЭПиМ, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: snaffls18@gmail.com. ORCID 0000-0001-8525-279X

Ивекеев Владимир Сергеевич – младший научный сотрудник кафедры АЭПиМ, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: vivekeev@yandex.ru. ORCID 0000-0002-0730-8257

Alexander A. Nikolaev – PhD (Eng.), Associate Professor,
Head of the Automated Electric Drives and Mechatronics Department,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: aa.nikolaev@magtu.ru. ORCID 0000-0001-5014-4852

Platon G. Tulupov – junior researcher of the Automated Electric Drives and Mechatronics Department,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: tulupov.pg@mail.ru. ORCID 0000-0002-3058-2406

Sergey S. Ryzhevov – postgraduate student of the Automated Electric Drives and Mechatronics Department,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: snaffls18@gmail.com. ORCID 0000-0001-8525-279X

Vladimir S. Ivekeev – junior researcher of the Automated Electric Drives and Mechatronics Department,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: vivekeev@yandex.ru. ORCID 0000-0002-0730-8257

ЭКОЛОГИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ

INDUSTRIAL ECOLOGY IN METALLURGY

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

УДК 504.064

DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-2-133-139



ЭКОПОСТ-МАГНИТОГОРСК: ИТОГИ ПЕРВОГО ГОДА РАБОТЫ

Расулмухамедов Э.А.¹, Волкова Е.А.², Перятинский А.Ю.², Тулупов О.Н.², Муртазин Р.А.²

¹ Всероссийское общество охраны природы, Москва, Россия

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

Аннотация. В последние десятилетия руководство нашей страны ведет политику по оздоровлению населения Российской Федерации. Взаимосвязь между здоровьем граждан и состоянием окружающей среды всем очевидна: мы – это чистый воздух, вода, земля. Экономические вопросы тоже не остаются в стороне. А рост экономики – это, прежде всего, рост производства. Загрязнение урбозоисистем, особенно в моногородах, связано не только с основным градообразующим производством, но и с наличием неявных источников негативного воздействия. В городе Магнитогорске с целью выявления подобных источников в 2021 году был создан экопост, работа которого направлена на выявление потенциальных источников загрязнения воздуха в городе, изучение вероятного влияния таких источников на состояние атмосферного воздуха, составление карты вероятных источников, оценки уровня загрязнения атмосферы. Создание карты подразумевает два основных варианта ее формирования: прежде всего, создание и заполнение интерактивной карты загрязнения атмосферного воздуха города с удобным интерфейсом, позволяющей любому желающему ознакомиться с состоянием воздуха в его районе, а также формирование карты источников загрязнения, которая поможет оперативно выявлять причину и источник локального загрязнения в случае непредвиденных ситуаций. Итогом работы предполагается разработка мероприятий, нацеленных на минимизацию негативного воздействия таких источников, оздоровление городской среды, а значит, и уменьшение вреда, наносимого здоровью жителей города. Вовлечение в работу предприятий и общественных организаций города Магнитогорска позволит оперативно решать возникающие проблемные вопросы, принимать меры к снижению негативного воздействия действующих объектов на окружающую среду.

Ключевые слова: экопост, атмосферный воздух, источники загрязнения, городская среда, экологический мониторинг.

© Расулмухамедов Э.А., Волкова Е.А., Перятинский А.Ю., Тулупов О.Н., Муртазин Р.А., 2022

Для цитирования

Экопост-Магнитогорск: итоги первого года работы / Расулмухамедов Э.А., Волкова Е.А., Перятинский А.Ю., Тулупов О.Н., Муртазин Р.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №2. С. 133–139. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-2-133-139>



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

ECOPOST-MAGNITOGORSK: RESULTS OF THE FIRST YEAR OF OPERATION

Rasulmukhamedov E.A.¹, Volkova E.A.², Peryatinskiy A.Yu.², Tulupov O.N.², Murtazin R.A.²

¹All-Russian Society for Nature Conservation, Moscow, Russia

²Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. In recent decades, the leadership of this country has pursued a policy of improving health of the population of the Russian Federation. The relationship between health of citizens and the state of the environment is obvious to all: we are clean air, water and land. Economic issues are not neglected either. So, economic growth is, above all, growth in production. Pollution of urban ecosystems, especially in single-industry cities, is attributed not only to the main city-forming production, but also to implicit sources of negative impact. To identify such sources, in 2021 the ecopost was established in Magnitogorsk. Its operation is aimed at identifying potential sources of air pollution in the city, study of probable influence of such sources on atmospheric air, drawing of the map of probable sources, and air pollution level assessment. Drawing the map implies two main options: first of all, creation and filling of an interactive map of air pollution in the city with a convenient interface, allowing anyone to learn the air condition in a relevant area, and also building of a map of pollution sources to promptly identify the cause and source of local pollution in case of unforeseen situations. The outcome of the operation is expected to be the development of measures aimed at minimising the negative impact of such sources, improving the urban environment and, therefore, reducing the harm caused to health of city residents. Involvement of the Magnitogorsk enterprises and public organizations will contribute to promptly settling arising problems, taking measures to decrease negative impact of operating facilities on environment.

Keywords: ecopost, atmospheric air, sources of pollution, urban environment, ecological monitoring.

For citation

Rasulmukhamedov E.A., Volkova E.A., Peryatinskiy A.Yu., Tulupov O.N., Murtazin R.A. Ecopost-Magnitogorsk: Results of the First Year of Operation. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 2, pp. 133–139. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-2-133-139>

Введение

В последнее десятилетие вопросы изменения и улучшения экологической обстановки промышленных городов и населенных пунктов все чаще находят поддержку на самых высших уровнях государственного управления. Так, 2017 год был объявлен годом экологии. В 2018 году стартовал федеральный проект «Чистый воздух», суть которого состоит в том, чтобы «...воздух в городах с высоким и очень высоким уровнем загрязнения атмосферы должен стать настолько чистым, чтобы граждане ощутили это, просто открыв форточку...»

РД 52.04.667-2005 определяет 4 градации качества атмосферного воздуха, что для нашего города соответствует высокому и очень высокому уровню загрязнения.

В январе текущего года был официально озвучен антирейтинг самых грязных городов, согласно которому город Магнитогорск занимает третье место, уступая только Челябинску и Нижнему Тагилу.

В нашем городе много промышленных предприятий. Но исконно сложилось, что всё внима-

ние жителей города и средств массовой информации приковано к одному – к ПАО «ММК», который является градообразующим предприятием. Его видно практически со всех точек города. И уже стало обычным явлением то, что если спросить жителей: «Что или кто является, по вашему мнению, причиной неблагоприятной экологической обстановки в городе?», то 9 человек из 10 с уверенностью ответят: «Комбинат!»

Полученные результаты и их обсуждение

Понимая и принимая тот факт, что большинство людей просто не понимают всю картину сложившейся экологической ситуации в городе, верят рейтингам, слухам и сплетням, назрела необходимость проведения независимой квалифицированной оценки реальной ситуации в городе, выявление источников загрязнения окружающей среды и обязательное объяснение жителям и гостям города, что каждый из нас ответственен за экологическое благополучие родного города.

Принимая во внимание все эти аспекты, с апреля по декабрь 2021 года специалистами ФГБОУ

ВО «МГТУ им. Г.И Носова» совместно с Всероссийским обществом охраны природы (ВООП) была начата и проводилась работа на тему «Разработка методики экологического мониторинга и исследование состояния атмосферного воздуха города Магнитогорска с целью научно обоснованного определения и изучения источников загрязнения», в рамках которой мы попытались идентифицировать первичные и вторичные источники негативного воздействия на атмосферный воздух города, а также на основании полученных данных сформировать научно обоснованные результаты экологического мониторинга за счет системной и независимой информации о выявленных источниках загрязнения.

В апреле была сформирована рабочая группа, в которую, кроме сотрудников университета и ВООП, вошли студенты кафедры промышленной экологии и безопасности жизнедеятельности, обучающиеся по направлению «Техносферная безопасность», и волонтеры центра «По зову сердца». Для полного охвата территории города были определены точки возможного нахождения источников загрязнения, составлен сезонный график проведения замеров в выбранных точках (табл. 1).

Проведение измерений загрязнения атмосферного воздуха города Магнитогорска проводилось не только в местах, определенных графи-

ком (всего 126 контрольных точек), но и на границах санитарно-защитных зон промышленных предприятий. Работа была бы неполной и поверхностной, если бы нам не помогали общественные активисты, которые предоставляли информацию о нарушающей экологические требования деятельности предприятий малого и среднего бизнеса. По сигналам и жалобам жителей города проводился выезд в районы воздействия таких производств, регистрировалось загрязнение атмосферного воздуха возле объекта. После чего сотрудниками и волонтерами регулярно осуществлялся контроль за состоянием воздуха возле таких предприятий.

Анализ полученных за весь период наблюдений результатов позволил идентифицировать ряд источников и разработать предварительные рекомендации для минимизации их негативного воздействия на атмосферный воздух и здоровье горожан. Большее воздействие, чем крупные промышленные объекты (такие, как ПАО «ММК», ОАО «ММК-МЕТИЗ», Цементный завод), на жителей и гостей города оказывают воздействие автотранспорт, работа систем жилищно-коммунального хозяйства (насосные и перекачивающие станции, коллекторы), жилой сектор (использование печного отопления, бани), СНТ (сжигание мусора на территории садов, использование удобрений и пестицидов).

Таблица 1. Сезонный план реализации экологического мониторинга
Table 1. Seasonal ecological monitoring plan

Источник	Периодичность	Обоснование
Автомобильные перекрестки	Посезонно при скоплении автотранспорта в часы пик	Мониторинг осуществляется постоянно в связи с сезонными изменениями метеорологических условий. Наиболее интересен в зимний период в связи с возможным сужением ширины проезжей части автомобильных дорог и увеличением скопления автомобильного транспорта на перекрестках
Садовые некоммерческие товарищества	Весна, лето, осень	Мониторинг осуществляется весной и осенью в связи с возможными выбросами с участков при сжигании мусора и использовании печного отопления; в весенне-летний период – с использованием удобрений и ядохимикатов
Поселки	Посезонно	Мониторинг осуществляется посезонно по причине влияния на загрязнение атмосферы выбросов отопительных дровяных и газовых печей домов и бань, весной и осенью возможны выбросы от сжигания мусора
Городская свалка	Лето, зима	Мониторинг осуществляется в холодный и теплый периоды в связи с влиянием на загрязнение атмосферы метеорологических условий, катализирующих или флагматизирующих процессы разложения ТКО с выделением вредных веществ в атмосферу
Предприятия города	Посезонно	Мониторинг осуществляется постоянно в связи с сезонными изменениями метеорологических условий

За весь период наблюдения были отмечены значительные превышения допустимых норм по следующим веществам:

- углеводородам – в 1,2–5,3 раза вблизи автодорог, перекрестков, автостоянок торговых центров и АЗС – влияние источников автотранспорта и городской инфраструктуры;

- сероводороду – в 61,3–585 раза, меркаптанам – в 8,3–1890 раз и аммиаку – в 2,5–24 раза на территории частного сектора, садоводческих товариществ, в районах выхода канализационных коллекторов на территории города и непосредственной близости от канализационной насосной станции №16 по ул. Вознесенской – влияние источников городской инфраструктуры (очистные сооружения, насосные и перекачивающие станции, коллекторы) и инфраструктуры частного сектора, в частности хозфекальные объекты, автономные источники теплоснабжения, предприятия малого бизнеса (автомастерские, шиномонтажные мастерские, пункты приема металломолома и др.), использующие печное отопление.

В районах птицефабрики, правобережных и левобережных очистных сооружений содержание углеводородов находится на уровне 0,6–1,2 ПДК.

Данные замеров в районе воздействия асфальтового завода ООО «Магистраль» и ООО «Алмаз» показали значения по сероводороду на уровне 439 ПДК, по меркаптанам – 1310 ПДК, углеводородам – 10–14 ПДК.

Данные, полученные в период НМУ в разных районах города возле постов наблюдения за за-

грязнением атмосферы, остаются примерно на том же уровне, что и в обычные дни.

В июле–августе 2021 года по всему Южному Уралу установилась аномально жаркая погода. Всё это сопровождалось пожарами, оказывающими значительное действие на общее состояние атмосферного воздуха, наблюдался смог. В дни смога результаты измерений значительных изменений в содержании в воздухе определяемых веществ не выявили: отмечено превышение по углеводородам в 3,6–6,4 раза. Взвешенные вещества, которые в данном случае являются главной составляющей в воздухе, газоанализатором Геолан-1П не определяются.

Результаты измерений были нанесены на интерактивную карту города (рис. 1), с которой может ознакомиться любой желающий на сайтах ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» и федеральном сайте ВООП.

По результатам работы уже сегодня можно говорить о неявных источниках загрязнения атмосферного воздуха города Магнитогорска, деятельность которых оказывает первостепенное влияние на здоровье жителей и гостей города. К ним относятся автотранспорт, предприятия среднего и малого бизнеса, жилищно-коммунального хозяйства, городская инфраструктура, АЗС, садовые некоммерческие товарищества и др.

Наблюдение за объектами воздействия позволило разработать рекомендации по возможной минимизации влияния выявленных источников на окружающую среду.

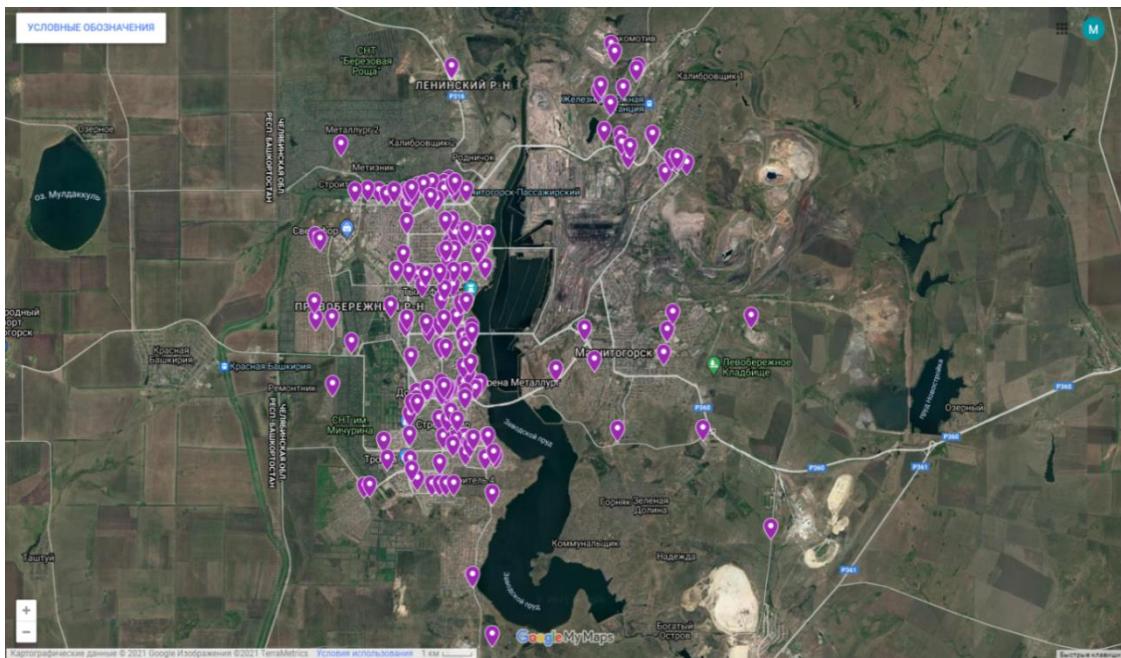


Рис. 1. Интерактивная карта загрязнений атмосферы города Магнитогорска
Fig. 1. Interactive map of air pollution in Magnitogorsk

Для снижения загрязнений на наиболее перегруженных перекрестках совместно с ГИБДД, Управлением архитектуры и градостроительства и Управлением инженерного обеспечения, транспорта и связи, а также самой Администрацией города Магнитогорска можно рекомендовать проведение следующих мероприятий:

- 1) перевод на газовое или сжиженное топливо 50% городского автотранспорта;
- 2) контроль за выбросами автотранспорта;
- 3) запрет на демонтаж катализаторов в автомобилях;
- 4) установка компьютерного оборудования на двигателях автомобилей согласно требованиям стандарта EURO III и более новых стандартов выбросов;
- 5) строительство в черте и на границах города дорог (в том числе объездных), многоуровневых развязок;
- 6) планирование городской инфраструктуры с учетом увеличения численности автотранспортных средств;
- 7) расширение проезжей части возле перекрестков без безвозвратного уничтожения зеленых насаждений (деревьев) между проезжей частью и пешеходной зоной;
- 8) развитие общественного транспорта;
- 9) создание центров по управлению и мониторингу дорожного движения.

Владельцам садово-огородных участков, председателям СНТ и поселковых поселений

рекомендуется в период наблюдения НМУ и смога не сжигать отходы и мусор с территорий садово-огородных участков, при наличии бань – ограничить пользование ими.

Городские мусорные свалки – проблема всех муниципалитетов в нашей стране. Учитывая тот факт, что официально Магнитогорская городская свалка закрыта в феврале прошлого года, дирекции свалки рекомендуется в целях исключения негативного воздействия на окружающую среду прекратить незаконный прием ТКО и строительных отходов, не проводить сжигание мусора, обеспечив контроль за его самопроизвольным возгоранием. Проведение рекультивационных работ по примеру аналогичных объектов накопленного негативного воздействия на окружающую среду обязательно. Остается надеяться на скорое введение в эксплуатацию нового полигона твердых коммунальных отходов, отвечающего всем требованиям природоохранного законодательства.

Регулярная и качественная очистка смотровых и канализационных колодцев, создание раздельной канализационной системы в новых районах и модернизация существующей в старых, своевременный ремонт канализационных труб/систем водоотведения позволяют исключить поступление в атмосферу города таких веществ как сероводород, меркаптаны, оказывающие раздражающее действие на население.

Рекомендации по другим выявленным источникам приведены в **табл. 2**.

Таблица 2. Мероприятия по минимизации негативного воздействия на атмосферу по источникам выбросов
Table 2. Measures to minimize the negative impact on atmosphere by sources of emissions

Источник	Рекомендации	Ответственный
Канализационная насосная станция №16	Ликвидация окон-отдушек либо установка на них компактных систем газоочистки для предотвращения поступления дурнопахнущих газов в атмосферу	МП «Трест "Водоканал"»
ООО «Алмаз» Асфальтовый завод	Ликвидация несанкционированных источников сжигания Налаживание конструктивного диалога с жителями поселков Новостройка и Горнорудный	Росприроднадзор Администрация города Магнитогорска Дирекция предприятий
Смог	Отказ по возможности от пользования личным автотранспортом, передвижение на небольшие расстояния на велосипеде или пешком для снижения накопления в приземном слое вредных выхлопных газов Ношение смоченной марлевой повязки Завешивание открытых окон сетками или марлей, которые надо постоянно увлажнять	Жители города
	Частое орошение и мытье улиц	Управление жилищно-коммунального хозяйства администрации города Магнитогорска
	Использование кондиционеров, воздухоочистителей с современными фильтрами и эффектом ионизации положительными и отрицательными ионами	Руководители офисных компаний Жители города
Предприятия города	Контроль содержания вредных веществ в атмосферном воздухе на границе СЗЗ предприятия Контроль за выхлопами автотранспорта предприятия При НМУ и смоге: соблюдение мероприятий, направленных на снижение негативного воздействия на окружающую среду и позволяющих обеспечить сокращение концентрации загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы примерно на 15–20%	Дирекция предприятий Отделы / лаборатории охраны окружающей среды

Заключение

Таким образом, остается очевидным, что только совместная работа всех жителей города и специалистов, просветительская работа среди населения, особенно детей и молодежи, позволит адекватно оценить воздействие на атмосферу. Понимание того, что нет одного виновного в сложившейся экологической обстановке, что каждый несет ответственность за состояние окружающей среды, позволит реализовать мероприятия по оздоровлению воздуха.

Список литературы

1. Федеральный закон «Об охране атмосферного воздуха» от 04.05.1999 № 96-ФЗ (ред. от 08.12.2020)

2. Другов Ю.С., Родин А.А. Мониторинг органических загрязнений природной среды. 500 методик [Электронный ресурс]: практическое руководство. 3-е изд. (эл.). М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. 893 с.

3. Шабельников В.Н., Лихачева С.В., Немова К.А. Эколо-аналитический контроль промышленных выбросов // Трубопроводный транспорт нефти. 2010. №2. С. 62.

4. Экоаналитический контроль: методические указания / Лобачев А.Л., Лобачева И.В., Петрова Е.И., Ревинская Е.В. Самара: Издательство «Самарский университет», 1999.

5. <http://www.mosecom.ru/air/>

6. <http://artpb.ru/stats/stat36.html>

7. Банчева А.А. Экологический след как индикатор устойчивости городской среды // Территории и планирование. 2009. № 2 (20). С. 50–52.

8. Потравный И.М., Зомонова Э.М., Зандакова А.Б. Показатель экологического следа (на примере Республики Бурятия // Экономика природопользования. 2012. №4. С. 18–32.

9. Зомонова Э.М., Зандакова А.Б. Методические подходы к оценке экологического следа в системе показателей измерения спроса на природные ресурсы // Экология. Экономика. Информатика: материалы XL конф. «Математическое моделирование в проблемах рационального природопользования». Ростов н/Д: Изд-во Южного федерального ун-та, 2012. С. 368–373.

10. Зомонова Э.М., Зандакова А.Б. Применение методов принятия решений в рамках концепции социо-эколого-экономического анализа DS1R // Экология. Экономика. Информатика: материалы XL конф. «Математическое моделирование в проблемах рационального природопользования». Ростов н/Д: Изд-во Южного федерального ун-та, 2012. С. 373–377.

References

1. Federal Law No. 96-FZ dated May 04, 1999 (revised on December 08, 2020) “On Atmospheric Air Protection”.
2. Drugov Yu.S., Rodin A.A. *Monitoring organicheskikh zagryazneniy prirodnoy sredy. 500 metodik [Elektronnyy resurs]: prakticheskoe rukovodstvo* [Monitoring of organic pollutants of natural environment. 500 methods. [Electronic resource]: a practical guide]. 3rd (electronic) edition. Moscow: BINOM. Laboratory of Knowledge, 2013, 893 p. (In Russ.)
3. Shabelnikov V.N., Likhacheva S.V., Nemova K.A. Ecological and analytical control of industrial emissions. *Truboprovodny transport nefti* [Oil Transport by Pipeline], 2010, no. 2, p. 62. (In Russ.)
4. Lobachev A.L., Lobacheva I.V., Petrova E.I., Revinskaya E.V. *Ekoanaliticheskiy kontrol: metodicheskie ukazaniya* [Eco-analytical control: guidelines]. Samara: Samara University Publishing House, 1999. (In Russ.)
5. <http://www.mosecom.ru/air/>
6. <http://artpb.ru/stats/stat36.html>
7. Bancheva A.A. Ecological footprint as an indicator of stability of urban environment. *Territorii i planirovanie* [Territories and Planning], 2009, no. 2 (20), pp. 50–52. (In Russ.)
8. Potravny I.M., Zomonova E.M., Zandakova A.B. Ecological footprint indicator (on the example of the Republic of Buryatia. *Ekonomika prirodopolzovaniya* [Nature Management Economics], 2012, no. 4, pp. 18–32. (In Russ.)
9. Zomonova E.M., Zandakova A.B. Methodological approaches to the assessment of the ecological footprint in the system of indicators for measuring the demand for natural resources. *Ekologiya. Ekonomika. Informatika: materialy XL konf. «Matematicheskoe modelirovanie v problemakh ratsionalnogo prirodopolzovaniya»* [Ecology. Economics. Informatics: Proceedings of the 40th Conference “Mathematical modeling in issues of rational nature management”]. Rostov-on-Don: Publishing House of Southern Federal University, 2012, pp. 368–373. (In Russ.)
10. Zomonova E.M., Zandakova A.B. Application of decision-making methods within the concept of socio-environmental and economic analysis of DS1R. *Ekologiya. Ekonomika. Informatika: materialy XL konf. «Matematicheskoe modelirovanie v problemakh ratsionalnogo prirodopolzovaniya»* [Ecology. Economics. Informatics: Proceedings of the 40th Conference “Mathematical modeling in issues of rational nature management”]. Rostov-on-Don: Publishing House of Southern Federal University, 2012, pp. 373–377. (In Russ.)

Поступила 22.03.2022; принята к публикации 24.05.2022; опубликована 28.06.2022
Submitted 22/03/2022; revised 24/05/2022; published 28/06/2022

Расулмухамедов Элмурод Абдурахимович – первый заместитель председателя Центрального Совета, Всероссийское общество охраны природы, Москва, Россия.

Волкова Елена Александровна – кандидат технических наук, профессор РАЕ, доцент кафедры промышленной экологии и безопасности жизнедеятельности, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: valena.dom@rambler.ru

Перятинский Алексей Юрьевич – кандидат технических наук, заведующий кафедрой промышленной экологии и безопасности жизнедеятельности, доцент, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.

Тулупов Олег Николаевич – профессор, доктор технических наук, профессор кафедры технологий обработки материалов, проректор по научной и инновационной работе, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: o.tulupov@mail.ru

Муртазин Рустам Ахметрашидович – кандидат педагогических наук, проректор по молодежной и информационной политике, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: r.murtazin@magtu.ru

Elmurod A. Rasulmukhamedov – First Deputy of the Chairman of the Central Board, All-Russian Society for Nature Conservation, Moscow, Russia.

Elena A. Volkova – PhD (Eng.), Professor of the Russian Academy of Natural History, Associate Professor of the Department of Industrial Ecology and Health and Safety, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: valena.dom@rambler.ru

Alexey Yu. Peryatinskiy – PhD (Eng.), Head of the Department of Industrial Ecology and Health and Safety, Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Oleg N. Tulupov – Professor, DrSc (Eng.), Professor of the Department of Materials Processing Technologies, Vice Rector for Research and Innovation, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: o.tulupov@mail.ru

Rustam A. Murtazin – PhD (Pedagogy), Vice Rector for Youth and Information Policies, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: r.murtazin@magtu.ru

ЭКОНОМИКА, УПРАВЛЕНИЕ И РЫНОК ПРОДУКЦИИ
ECONOMICS, MANAGEMENT AND PRODUCT MARKET

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

УДК 658.14(075)

DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-2-140-147



УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ ПРЕДПРИЯТИЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ
ОТРАСЛИ: АСПЕКТЫ, КРИТЕРИИ, ИНДИКАТОРЫ

Майорова Т.В., Пономарева О.С., Павлова И.Е.

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

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Концептуальной основой устойчивого развития является единство долгосрочной стабильности природной среды, экономического роста и социальной справедливости, конечной целью устойчивого развития является достижение баланса между экологической, экономической и социальной устойчивостью. Проблемой достижения целей устойчивого развития является то, что сложившаяся модель экономического развития и соответствующий ей характер производства и потребления не являются устойчивыми, поскольку не обеспечивают эффективное и справедливое распределение ресурсов внутри и между поколениями с осуществлением социально-экономической деятельности в пределах конечной экосистемы. **Цель работы.** Исследование аспектов устойчивого развития на корпоративном уровне добывающих, металлургических, энергетических и других компаний как основы достижения целей устойчивого развития современного общества. Методический подход заключается в обобщении глобальных целей устойчивого развития и выявлении аспектов устойчивого развития промышленной компании, которыми являются три взаимосвязанные области: экономическая, экологическая и социальная устойчивость. **Новизна.** Устойчивость деятельности компании оценивается одновременно с позиций экологической и социальной приемлемости, экономической и социальной справедливости, экономической целесообразности и экологической жизнеспособности. **Результат.** В результате исследования определены частные индикаторы экономической, экологической и социальной устойчивости компании и предложены критерии для оценки уровня экономического развития, экологической нейтральности и социального благополучия в регионе присутствия компании. **Практическая значимость.** Разработанная система интегральных индикаторов, характеризующих уровень устойчивости промышленной компании с позиции рационального потребления природных ресурсов, минимизации влияния на природную среду, обеспечения равных прав и возможностей для всех людей и сообществ на территории влияния компании. Для комплексной оценки степени интеграции экономических, экологических и социальных аспектов в процесс принятия решений и эффективности достижения целей устойчивого развития промышленной компании предложен индекс устойчивости компании.

Ключевые слова: устойчивое развитие, металлургическая компания, экономическая устойчивость, социальная устойчивость, экологическая устойчивость, индекс устойчивости.

© Майорова Т.В., Пономарева О.С., Павлова И.Е., 2022

Для цитирования

Майорова Т.В., Пономарева О.С., Павлова И.Е. Устойчивое развитие предприятий металлургической отрасли: аспекты, критерии, индикаторы // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №2. С. 140–147. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-2-140-147>



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

SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF METALLURGICAL ENTERPRISES: ASPECTS, CRITERIA, INDICATORS

Maiorova T.V., Ponomareva O.S., Pavlova I.E.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). A conceptual basis of sustainable development is the triple bottom line framework of long-term stability of the environment, economic growth and social justice. An ultimate goal of sustainable development is to achieve a balance between environmental, economic and social sustainability. The problem of achieving sustainable development goals is that the current model of economic development and the relevant nature of production and consumption are not sustainable, because they do not provide an efficient and fair distribution of resources within and between generations, including social and economic activities within a final ecosystem. **Objectives.** The research is aimed at studying aspects of sustainable development at a corporate level of mining, metallurgical, power generating and other companies as the basis for achieving the goals of sustainable development of modern society. A methodological approach lies in generalizing the global goals of sustainable development and identifying aspects of sustainable development of an industrial company, namely three interrelated areas: economic, environmental and social sustainability. **Originality.** Sustainability of the company's activities is assessed in terms of environmental and social acceptability, economic and social justice, economic feasibility and environmental viability. **Result.** The study identified particular indicators of economic, environmental and social sustainability of the company and criteria proposed to assess the level of economic development, environmental neutrality and social well-being within the company's footprint. **Practical Relevance.** The authors developed a system of integral indicators, characterizing the level of sustainability of an industrial company in terms of a sustainable consumption of natural resources, minimizing the impact on the environment, ensuring equal rights and opportunities for all people and communities within the area of the company's influence. To make a comprehensive assessment of the degree of integration of economic, environmental and social aspects in the decision-making process and efficiency of achieving the sustainable development goals of an industrial company, the authors proposed a company sustainability index.

Keywords: sustainable development, iron and steel company, economic sustainability, social sustainability, environmental sustainability, sustainability index.

For citation

Maiorova T.V., Ponomareva O.S., Pavlova I.E. Sustainable Development of Metallurgical Enterprises: Aspects, Criteria, Indicators. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 2, pp. 140–147. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-2-140-147>

Введение

Концепция устойчивого развития остается актуальной и широко распространенной моделью развития экономики и общества и в контексте общемировой стратегии предполагает достижение целей человеческого развития через удовлетворение потребностей настоящих и будущих поколений в пределах конечной экосистемы [1, 2].

Это означает, что человеческая популяция должна сохранить способность развиваться, обеспечивая эффективное и справедливое распределение ресурсов в процессе социально-экономической деятельности сегодня и в будущем, не оказывая необратимого неблагоприятного воздействия на несущую способность среды. Устойчивость ставит в центр внимания дея-

тельность человека и его способность вести экономическую и социальную жизнь, используя ограниченные ресурсы для развития.

Трансформация общества и экономики в направлении устойчивого развития – сложная задача, которая решается в контексте согласования и равновесия между обществом, экономикой и окружающей средой с точки зрения регенеративной способности экосистем планеты и достижения справедливости между поколениями [3, 4].

Необходимый баланс между экономическим ростом, экологическим равновесием и социальным благополучием достигается за счет интеграции экономических, экологических и социальных аспектов в процесс принятия решений на всех уровнях – глобальном, национальном и корпоративном [5]. Достижение устойчивости на корпоративном уровне означает ведение бизнеса

с положительными экономическими, экологическими и социальными последствиями, в связи с чем подходы к управлению бизнесом должны быть направлены на устойчивое накопление и использование природного и финансового капитала при условии сохранения биоразнообразия и экологической целостности и улучшения политических, культурных, медицинских, образовательных и других социальных систем [6].

В интересах бизнеса найти новые решения, позволяющие перейти к моделям устойчивого производства и потребления, выявляя «слабые звенья» в цепочке создания добавленной стоимости [7], воздействие на которые обладает наибольшим потенциалом для улучшения экологического и социального состояния системы в целом.

Достижение целей человеческого развития при одновременном сохранении способности природных систем обеспечивать природные ресурсы и экосистемные услуги, от которых зависят экономика и общество, требует, чтобы развитие индустрии, в частности металлургических предприятий, было направлено на создание экономически выгодных, экологически безопасных и социально привлекательных производственных условий и продуктов [8]. По этой причине стратегия устойчивого развития металлургической компании выстраивается на основе анализа и совместного решения трех основных проблем устойчивого развития – экономический рост при обеспечении защиты окружающей среды и достижении социального равенства.

Полученные результаты и их обсуждение

Исходя из анализа глобальных целей устойчивого развития, необходимости комплексного решения основных проблем устойчивого развития и определяющей роли бизнеса в процессах производства и потребления [9, 10], определили, что аспектами устойчивого развития металлургической компании являются три взаимосвязанные области устойчивости: экономическая, экологическая и социальная. Полагаем, что стратегия устойчивого развития металлургической компании имеет своей триединой целью достижение целевых значений экономической, экологической и социальной устойчивости.

Экономическая устойчивость подразумевает наличие такой системы производства, распределения и потребления продуктов и услуг, которая удовлетворяет текущие уровни потребления без ущерба для будущих потребностей [11], при этом

основной проблемой обеспечения устойчивости экономического развития является то, что рыночный механизм неконтролируемого потребления не учитывает экологические последствия такой экономической деятельности – исчерпание ресурсов, деградация окружающей среды, изменение климата [12, 13], усиливает социальную несправедливость при распределении и доступности ограниченных природных ресурсов и благ, которые становятся дефицитными.

Таким образом, достижение экономической устойчивости как одной из стратегических целей устойчивого развития компании будем соизмерять с экологической и социальной приемлемостью управлеченческих решений.

Экологическая устойчивость заключается в способности биосфера сохранять и возвращаться в исходное состояние, испытывая влияние внутренних и внешних воздействий; многократно возросшее в индустриальный и постиндустриальный периоды антропогенное воздействие [14] – изъятие ресурсов, образование отходов, преобладание незамкнутых технологических процессов – стало основной причиной нарушения экологической устойчивости.

Очевидно, что для сохранения стабильной и устойчивой природной среды необходим переход к механизму устойчивого использования природного капитала [15], который означает, что природные ресурсы должны потребляться не быстрее, чем они могут быть восстановлены, а отходы должны выбрасываться не быстрее, чем они могут быть ассимилированы окружающей средой.

Экологическую устойчивость определяем как состояние природной экосистемы с учетом воздействия на нее и ответной реакции на это воздействие, при котором природная среда остается продуктивно стабильной и устойчивой для обеспечения жизни и развития человека. В связи с этим достижение экологической устойчивости как одной из целей стратегии устойчивого развития компании будем соизмерять с экономической и социальной справедливостью управлеченческих решений.

Социальная устойчивость заключается в создании равных прав и возможностей для отдельных лиц, групп, организаций и сообществ в рамках существующих экологических и экономических ресурсов общества.

Экономический разрыв между людьми, группами, странами с высоким уровнем доходов приводит к росту уровня бедности, нарастанию социальной несправедливости, недоступности

основных услуг для наименее обеспеченных групп населения. Этому способствует, в частности, сложившаяся структура мировой экономики, в которой транснациональные корпорации являются основными владельцами передовых технологий и производств товаров с высокой добавленной стоимостью, собственниками акций и конечными получателями значительной доли прибыли от эксплуатации природных ресурсов и дешёвой рабочей силы развивающихся стран, обеспечивая 90% валового внутреннего продукта развитых стран [16].

Однако борьба с бедностью не должна привлечь за собой ни неоправданное разрушение окружающей среды, ни экономическую нестабильность, рост экономики не должен быть связан с бесконтрольным увеличением нагрузки на окружающую среду и ростом потребления невозобновляемых ресурсов.

Достижение социальной устойчивости как одной из стратегических целей устойчивого развития компании будем соизмерять с экологической жизнеспособностью и экономической целесообразностью управлеченческих решений.

Исследование аспектов устойчивости и необходимость комплексного решения задач для достижения целей устойчивого развития позволили определить критерии достижения экономической, экологической и социальной устойчивости компаний (рис. 1).



Рис. 1. Критерии экономической, экологической и социальной устойчивости предприятия
Fig. 1. Criteria of economic, environmental and social sustainability of the enterprise

Для оценки экономической устойчивости компании вводим интегральный индикатор I_1 :

$$I_1 = k_1 \cdot \sum_{i=1}^n X_{1i}, \quad (1)$$

где X_{1i} – i -й нормированный индикатор экономической устойчивости компании; k_1 – суммарная

оценка деятельности компании по критериям экологической и социальной приемлемости (табл. 1); n – количество нормированных индикаторов.

Таблица 1. Критерии экономической устойчивости
Table 1. Criteria of economic sustainability

	Наименование	Оценка действий	
Экологическая приемлемость	Концентрация загрязняющих веществ в атмосфере на территории деятельности компаний	снижается	1
		не меняется	0,5
		растет	0
	Концентрация загрязняющих веществ в водоемах на территории деятельности компаний	снижается	1
		не меняется	0,5
		растет	0
Социальная приемлемость	Концентрация загрязняющих веществ в почве на территории деятельности компании	снижается	1
		не меняется	0,5
		растет	0
Экономическая приемлемость	Площадь деградированных земель в результате деятельности компании	снижается	1
		не меняется	0,5
		растет	0
	Уровень развития и качество инфраструктуры в регионе присутствия компании	растет	1
		не меняется	0,5
		снижается	0
Экологическая приемлемость	Доступность и качество основных услуг в регионе присутствия компании (чистая вода, энергоснабжение)	растет	1
		не меняется	0,5
		снижается	0
Социальная приемлемость	Доступность и качество медицины, образования, спорта в регионе присутствия компании	растет	1
		не меняется	0,5
		снижается	0

Для предприятий добывающей и обрабатывающей отраслей, в частности металлургических компаний, которые характеризуются высоким уровнем потребления энергии и других ресурсов, в контексте реализации стратегии устойчивого развития считаем целесообразным экономическую устойчивость компании оценивать по индикаторам эффективности использования ресурсов в процессах производства и потребления и перехода к производственно-сбытовой цепочке замкнутого цикла. Для расчета интегрального индикатора экономической устойчивости компании I_1 предлагаем следующий набор индикаторов:

$X_{1,1}$ – потребление всех видов энергии на единицу готовой продукции;

$X_{1,2}$ – доля использования ископаемого топлива в общем объеме потребления энергии;

$X_{1,3}$ – доля использования возобновляемых источников энергии;

$X_{1,4}$ – водопотребление на единицу готовой продукции;

$X_{1,5}$ – доля повторного использования воды;

$X_{1,6}$ – доля повторного использования отходов в собственном производстве;

$X_{1,7}$ – доля отходов, переработанных в базовые материалы для производства новых продуктов;

$X_{1,8}$ – доля производственных процессов замкнутого цикла.

Для нормирования индикаторов экономической устойчивости используем фактические и целевые значения индикаторов.

Экономическую устойчивость соизмеряем с экологической и социальной приемлемостью.

В качестве критерия экологической приемлемости предлагаем использовать оценку изменения состояния природной среды в результате деятельности компании – улучшение или неухудшение качественных характеристик.

Оценку положительных (не отрицательных) последствий управленческих решений для персонала компании, отдельных лиц и сообществ предлагаем использовать в качестве критерия социальной приемлемости. Критерии экономической устойчивости компаний представлены в **табл. 1**.

Для оценки экологической устойчивости компании вводим интегральный индикатор I_2 :

$$I_2 = k_2 \cdot \sum_{i=1}^n X_{2i}, \quad (2)$$

где X_{2i} – i -й нормированный индикатор экологической устойчивости компании; k_2 – суммарная оценка деятельности компании по критериям экономической и социальной справедливости (**табл. 2**); n – количество нормированных индикаторов.

Металлургические предприятия с полным технологическим циклом, включающим аглодоменное, коксохимическое, сталеплавильное и прокатное производство, оказывают существенное воздействие на окружающую природную среду, поэтому экологическую устойчивость компаний предлагаем оценивать по индикаторам негативного воздействия на климат, атмосферу, водные объекты, земельные ресурсы в результате производственной деятельности компаний:

$X_{2,1}$ – масса выброса парниковых газов в CO_2 -экв. на единицу конечной продукции;

$X_{2,2}$ – доля улавливания и преобразования парниковых газов в CO_2 -эквиваленте;

$X_{2,3}$ – масса выброса загрязняющих веществ в атмосферу на единицу конечной продукции;

$X_{2,4}$ – масса сброса загрязняющих веществ в водоемы на единицу конечной продукции;

$X_{2,5}$ – доля улавливания и нейтрализации загрязняющих веществ;

$X_{2,6}$ – масса образующихся отходов на единицу конечной продукции;

$X_{2,7}$ – площадь земель, занятых под размещение отходов производства.

Таблица 2. Критерии экологической устойчивости
Table 2. Criteria of environmental sustainability

Наименование		Оценка действий	
Экономическая справедливость	Доступность экосистемных услуг и природных благ для населения в регионе присутствия компании	растет	1
		не меняется	0,5
		снижается	0
	Стоимость экосистемных услуг и природных благ для населения в регионе присутствия компании	снижается	1
		не меняется	0,5
		растет	0
Социальная справедливость	Компания осуществляет инвестиции в регионе присутствия для создания общих ценностей и благополучия	постоянно	1
		одноразово	0,5
		никогда	0
	Компания осуществляет благотворительность и поддерживает волонтерское движение	постоянно	1
		одноразово	0,5
		никогда	0
	Нефинансовая информация о деятельности компании доступна и соответствует требованиям	полностью	1
		частично	0,5
		отсутствует	0

Для нормирования индикаторов экологической устойчивости используем фактические и целевые значения индикаторов. Экологическую устойчивость соизмеряем с экономической и социальной справедливостью. В качестве критерия экономической справедливости используем оценку доступности и стоимости экосистемных услуг, ограниченных или дефицитных ресурсов для отдельных лиц и групп населения.

Критерий социальной справедливости предлагаем использовать для оценки уровня прозрачности деятельности и вклада в развитие сообществ в регионе присутствия компаний. Критерии экологической устойчивости компаний представлены в **табл. 2**.

Для оценки социальной устойчивости компании вводим интегральный индикатор I_3 :

$$I_3 = k_3 \cdot \sum_{i=1}^n X_{3i}, \quad (3)$$

где X_{3i} – i -й нормированный индикатор социальной устойчивости компании; k_3 – суммарная оценка деятельности компании по критериям экономической целесообразности и экологической жизнеспособности (табл. 3); n – количество нормированных индикаторов.

Таблица 3. Критерии социальной устойчивости
Table 3. Criteria of social sustainability

Наименование критерия		Оценка действий	
Экономическая целесообразность	Уровень занятости населения в регионе присутствия компании	растет	1
		не меняется	0,5
		снижается	0
	Доходы населения в регионе присутствия компании	растет	1
		не меняется	0,5
		снижается	0
	Время и возможности для увеличения дохода у людей в регионе присутствия компании	растет	1
		не меняется	0,5
		снижается	0
Экологическая жизнеспособность	Компания осуществляет деятельность по смягчению и адаптации к изменению климата	постоянно	1
		одноразово	0,5
		никогда	0
	Компания осуществляет деятельность по сохранению и восстановлению биоразнообразия	постоянно	1
		одноразово	0,5
		никогда	0
	Компания осуществляет инвестиции в объекты охраны и восстановления природной среды	постоянно	1
		одноразово	0,5
		никогда	0
	Количество существенных аварий с экологическим ущербом в результате деятельности компании	снижается	1
		не меняется	0,5
		растет	0

Технология производства чугуна, стали, металлоконструкций сопряжена с большим количеством вредных и опасных для человека производственных факторов, трудовой процесс характеризуется высокой напряженностью, в том числе в связи с необходимостью сменной организации труда, поэтому социальную устойчивость металлургической компании предлагаем оценивать, в первую очередь, по показателям безопасности и обеспечения максимально возможного уровня жизни и здоровья людей, а

также соблюдения прав человека, отсутствия всех форм дискриминации:

$X_{3,1}$ – частота травматизма и несчастных случаев на производстве;

$X_{3,2}$ – уровень профессиональной и общей заболеваемости;

$X_{3,3}$ – уровень заработной платы;

$X_{3,4}$ – дополнительные денежные выплаты;

$X_{3,5}$ – неденежное стимулирование;

$X_{3,6}$ – гендерный баланс;

$X_{3,7}$ – этническое разнообразие.

Для нормирования индикаторов социальной устойчивости используем фактические и целевые значения индикаторов.

Социальную устойчивость компаний соизмерим с экономической целесообразностью и экологической жизнеспособностью.

В соответствии с критерием экономической целесообразности оцениваем уровень занятости и доходов, время и возможности у людей для увеличения своего дохода.

Оценку воздействия деятельности компании на экосистему, которое может привести к негативным и даже необратимым последствиям в природной среде, предлагаем использовать в качестве критерия экологической жизнеспособности.

Критерии социальной устойчивости компаний представлены в табл. 3.

Для оценки эффективности достижения целей устойчивого развития металлургической компании разработан индекс устойчивости компании I , который предлагаем рассчитывать как сумму интегральных индикаторов экономической устойчивости I_1 , экологической устойчивости I_2 и социальной устойчивости I_3 :

$$I = \sum_{i=1}^3 c_i \cdot I_i, \quad (4)$$

где I_i – i -й интегральный индикатор устойчивости; c_i – весовой коэффициент i -го индикатора.

Заключение

Таким образом, предлагаемый индекс устойчивости позволяет оценить эффективность интеграции экономических, экологических и социальных аспектов в процесс принятия решений на корпоративном уровне.

Высокая оценка устойчивости подтверждает высокий статус производственной компании как проводника преобразований в области устойчивого производства и потребления, устойчивых

инноваций и предпринимательства, осуществления социальных инвестиций для создания общих ценностей и благополучия сообществ.

Компании, которые согласовывают свои приоритеты с целями общемировой стратегии устойчивого развития, могут рассчитывать на улучшение взаимодействия с партнерами, сотрудниками, инвесторами и другими заинтересованными сторонами. Возрастающее внимание инвесторов к экологическим, социальным и управлению критериям будет стимулировать инвестиции в компании, стратегия которых выстроена в соответствии с целями устойчивого развития. Поскольку цели устойчивого развития направлены на перераспределение глобальных государственных и частных инвестиционных потоков на решение глобальных проблем, компании, которые осуществляют стратегическое планирование во всех областях функционирования, устанавливая приоритеты по актуальным темам устойчивого развития, будут иметь конкурентное преимущество.

Список литературы

1. Конференция ООН по окружающей среде и развитию, Рио-де-Жанейро, Бразилия, 3–14 июня 1992 года. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.un.org/en/conferences/environment/rio1992>
2. Цели в области устойчивого развития [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/ru/>
3. Преобразование нашего мира: повестка дня в области устойчивого развития на период до 2030 года. Генеральная ассамблея ООН, 21 октября 2015 [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://unctad.org/meetings/en/SessionalDocuments/ares70d1_ru.pdf
4. Долматова С.А. Устойчивое развитие как новые мирохозяйственные отношения в условиях геополитических вызовов // Экономика и бизнес: теория и практика. 2019. №12-1 (58). С. 153–159.
5. Майорова Т.В., Пономарева О.С., Ермолова Е.О. Индикаторы результативности экологического менеджмента в области достижения сбалансированного эколого-экономического развития // Наука и бизнес: пути развития. 2019. №12 (102). С. 243–246.
6. Майорова Т.В. Устойчивое развитие: возможности и стимулы для экономического прогресса // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2021. Т. 12. №2. С. 47–51.
7. Jaeger J., Banaji F., Calnek-Sugin T. By the numbers: How business benefits from the sustainable development goals // World Resource Institute. 2017. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.wri.org/>
8. Орехова С.В., Бутаков И.А. Устойчивое развитие металлургических предприятий и институциональные вызовы // Уфимский гуманитарный научный форум. 2022. №1 (9). С. 93–98.
9. Ecological indicators in the system of non-financial reporting at industrial enterprises / Kolokol'cev V.M., Vdovin K.N., Maiorova T.V., Ponomareva O.S. // CIS Iron and Steel Review. 2017. №13. С. 4–10.
10. Maiorova T.V., Belik I.S. Indicators of environmental performance and energy efficiency of businesses under the low-carbon economy development // Proceedings of the 2016 Conference on Information Technologies in Science, Management, Social Sphere and Medicine (ITSMSSM 2016), 2016, pp. 426–430.
11. Elgert L., Krueger R. Modernising sustainable development? Standardisation, evidence and experts in local indicators // Local Environment. 2012. Т. 17. №5. С. 561–571.
12. Maiorova T.V., Belik I.S., Ponomareva O.S., Kolyada L.G. Low carbon global economy: Scenarios of sustainable development, power consumption and greenhouse gas emission control // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, no. 315(5), №052061.
13. Статистический обзор мировой энергетики [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>
14. McGinty D. 5 Opportunities of a Circular Economy // World Resources Institute. 2021 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.wri.org/insights/5-opportunities-circular-economy>
15. Филиппова М.С., Красавина М.Ю. Влияние ресурсной устойчивости на устойчивое развитие промышленного предприятия // Конкурентоспособность в глобальном мире: экономика, наука, технологии. 2018. №5 (1). С. 77–79.
16. Глазьев С.Ю. Структуры национальной экономики в мировом экономическом развитии // Экономика и математические методы. 2016. №52 (2). С. 3–29.

References

1. United Nations Conference on Environment and Development, Rio de Janeiro, 1992. Available at: <https://www.un.org/en/conferences/environment/rio1992>
2. Sustainable Development Goals. Available at: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/>
3. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. The United Nations General Assembly, October 21, 2015. Available at: https://unctad.org/meetings/en/SessionalDocuments/ares70d1_ru.pdf
4. Dolmatova S.A. Sustainable development as new economic relations in the conditions of geopolitical challenges. *Ekonomika i biznes: teoriya i praktika* [Journal of Economy and Business: Theory and Practice], 2019, no. 12-1 (58), pp. 153–159. (In Russ.)
5. Mayorova T.V., Ponomareva O.S., Ermolova E.O. Environmental management performance indicators in the field of achieving balanced environmental and economic development. *Nauka i biznes: puti razvitiya* [Science and

Business: Ways of Development], 2019, no. 12 (102), pp. 243-246. (In Russ.)

6. Mayorova T.V. Sustainable development: opportunities and incentives for economic progress. *Aktualnye problemy sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya* [Current Problems of Modern Science, Technology and Education], 2021, vol. 12, no. 2, pp. 47-51. (In Russ.)
7. Jaeger J., Banaji F., Calnek-Sugin T. By the numbers: How business benefits from the sustainable development goals. World Resource Institute, 2017. Available at: <https://www.wri.org/>
8. Orehkova S.V., Butakov I.A. Sustainable development of metallurgical enterprises and institutional challenges. *Ufimskii gumanitarnyi nauchnyi forum* [Ufa Humanitarian Scientific Forum], 2022, no. 1 (9), pp. 93-98. (In Russ.)
9. Kolokoltsev V.M., Vdovin K.N., Maiorova T.V., Ponomareva O.S. Ecological indicators in the system of non-financial reporting at industrial enterprises. *CIS Iron and Steel Review*, 2017, no.13, pp. 4-10.
10. Maiorova T.V., Belik I.S. Indicators of environmental performance and energy efficiency of businesses under the low-carbon economy development. Proceedings of the 2016 Conference on Information Technologies in Science, Management, Social Sphere and Medicine (ITSMSSM 2016), 2016, pp. 426-430.
11. Elgert L., Krueger R. Modernising sustainable development? Standardisation, evidence and experts in local indicators. *Local Environment*, 2012, vol. 17, no. 5, pp. 561-571.
12. Maiorova T.V., Belik I.S., Ponomareva O.S., Kolyada L.G. Low carbon global economy: Scenarios of sustainable development, power consumption and greenhouse gas emission control. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 315(5), 052061 (2019).
13. Statistical Review of World Energy 2021. Available at: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>
14. McGinty D. 5 opportunities of a circular economy. World Resources Institute, 2021. Available at: <https://www.wri.org/insights/5-opportunities-circular-economy>
15. Filippova M.S., Krasavina M.Yu. Effect of resource sustainability on sustainable development of an industrial enterprise. *Konkurentospособность в глобальном мире: экономика, наука, технологии* [Competitiveness in the Global World: Economics, Science, Technologies], 2018, no. 5 (1), pp. 77-79. (In Russ.)
16. Glaziev S.Yu. National economy structures in the global economic development. *Ekonomika i matematicheskie metody* [Economics and Mathematical Methods], 2016, no. 52 (2), pp. 3-29. (In Russ.)

Поступила 25.04.2022; принята к публикации 16.05.2022; опубликована 28.06.2022
Submitted 25/04/2022; revised 16/05/2022; published 28/06/2022

Майорова Татьяна Владимировна – кандидат экономических наук, доцент,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: mtv1_2010@rambler.ru. ORCID 0000-0002-5137-6425

Пономарева Ольга Станиславовна – кандидат педагогических наук, доцент,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: slava_5@inbox.ru. ORCID 0000-0003-2274-2964

Павлова Ирина Евгеньевна – ассистент,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: mirenaly@icloud.com. ORCID 0000-0001-7213-1489

Tatyana V. Maiorova – PhD (Econ.), Associate Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: mtv1_2010@rambler.ru. ORCID 0000-0002-5137-6425

Olga S. Ponomareva – PhD (Pedagogy), Associate Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: slava_5@inbox.ru. ORCID 0000-0003-2274-2964

Irina E. Pavlova – Teaching Assistant,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: mirenaly@icloud.com. ORCID 0000-0001-7213-1489

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

УДК 681.51

DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-2-148-160



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ АКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ГИБКИХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Рагимов Ш.Р., Мамедов Дж.Ф.

Сумгайитский государственный университет, Сумгайит, Азербайджан

Аннотация. В результате анализа проблемы по исследованию процесса управления гибких производственных систем (ГПС) в области машиностроения была поставлена цель, которая предусматривает исследование вопроса управления ее активных элементов на основе компьютерных экспериментов. Для обеспечения компьютерного эксперимента предложена архитектура пространственного структурного моделирования ГПС, которая отличается от традиционных методов моделирования по времени и отсчитывается лишь в моменты, когда в системе происходят события, изменяющие ее состояние. Рассматривается возможность взаимодействия методов геометрического моделирования с моделью системы, основанной на базе модулей активных элементов ГПС. Предложен алгоритм логического вывода на основе активных данных в виде текущих ситуаций в процессе со-поставления продукции с нечеткой базой знаний, где осуществляется выбор активной продукции и принимается решение по выработке управляющих воздействий U_i на двигатели активных действий для достижения конечной цели всей системы. В качестве глобальной базы данных нечеткой продукции модели используется сенсорная ГПС, содержимое которой динамически меняется после каждого активного действия и вырабатываемого управляющего воздействия в результате логического вывода. Для построения оптимальных траекторий перемещения активных элементов ГПС в производственной среде и определения их столкновений разработаны программные модули на языке C#, а также обеспечивается итеративное взаимодействие системы с программистом на основе диалогового режима, который позволяет строить изображение любой интересующей его части технологической среды в любой момент времени и визуально наблюдать за результатом введения изменений в разрабатываемую программу.

Ключевые слова: гибкая производственная система, структурное моделирование, неопределенность, логический вывод, логическое программирование, нечеткая продукционная модель.

© Рагимов Ш.Р., Мамедов Дж.Ф., 2022

Для цитирования

Рагимов Ш.Р., Мамедов Дж.Ф. Экспериментальное исследование процесса управления активных элементов гибких производственных систем в условиях неопределенности // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №2. С. 148–160. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-2-148-160>



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

EXPERIMENTAL STUDY ON THE CONTROL PROCESS OF ACTIVE ELEMENTS OF FLEXIBLE MANUFACTURING SYSTEMS UNDER UNCERTAINTY

Ragimov Sh.R., Mamedov Dzh.F.

Sumgait State University, Sumgait, Azerbaijan

Abstract. By analyzing the issue of studying the control process of flexible manufacturing systems (FMS) in the field of mechanical engineering, the authors set a goal, providing for the study on the control of its active elements based on computer experiments. To provide a computer experiment, the paper proposes the architecture of spatial structural modeling of FMS, which is different from conventional modeling methods in time and counted only at the moments, when the system contains the events, changing its state. The paper describes a potential interaction between geometric modeling methods and a system model based on the modules of active elements of FMS. An inference algorithm is proposed based on active data as current situations in the process of comparing products with a fuzzy knowledge base, where active products are selected and a decision is made to develop control actions U_i on the engines of active actions to achieve the ultimate goal of the entire system. As a global database of fuzzy products of the model, the authors use a sensor FMS, whose content dynamically changes after each active action and the control actions generated as a result of a logical inference. To build optimal trajectories of movement of the active elements of FMS in the production environment and determine their collisions, C# modules have been developed, and iterative interaction between the system and a programmer is provided based on a dialog mode, used to build an image of any part of the technological environment of interest at any time and visually monitor the result of introducing changes to the program under development.

Keywords: flexible manufacturing system, structural modeling, uncertainty, logical inference, logic programming, fuzzy production model.

For citation

Ragimov Sh.R., Mamedov Dzh.F. Experimental Study on the Control Process of Active Elements of Flexible Manufacturing Systems Under Uncertainty. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 2, pp. 148–160. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-2-148-160>

Введение

Создание и внедрение гибких производственных систем (ГПС) по выпуску продукции в области машиностроения является сложным итерационным процессом и вопросы по разработке системы управления ГПС, относятся к категории трудно формализуемых. Учитывая, что ГПС состоят из активных элементов различного назначения, такие как технологическое оборудование с программным управлением, автоматические транспортные системы, промышленные роботы, манипуляторы и другие вспомогательные устройства, они в основном функционируют в недетерминированной среде [1, 2]. Следует отметить, что каждый активный элемент ГПС сам по себе является элементарной динамической системой, которая может находиться во множестве внутренних состояний. Кроме того, при выполнении сложной технологической операции активные элементы ГПС имеют общие рабочие зоны, где из-за технологических условий с не-

четкой информационной средой часто создаются конфликтные ситуации [3]. Следует отметить, что под общими рабочими зонами понимаются смежные состояния активных элементов ГПС, через которые осуществляются их взаимодействия. Подобными примерами возникновения конфликтных ситуаций может быть пересечение траектории движения активных элементов (АЭ) или их рабочих зон, где могут возникать не предусмотренные заранее препятствия. Для разрешения таких конфликтных ситуаций требуется интеллектуальная система автоматизированного управления, реализующая траектории движения технических единиц в среде ГПС машиностроительных предприятий.

Итак, неполнота и нечеткость информации, предварительно получаемых статистических и динамических данных о поведении активных элементов ГПС в процессе их функционирования происходит в условиях неопределенности.

Анализ подобных систем [4, 5] со сложной структурной компоновочной схемой активных

элементов ГПС показал, что решение таких задач приводит к нечетким результатам, усложняется функционирование системы управления и, соответственно, снижается надежность системы в целом. Также применение готовых интеллектуальных систем управления из-за отличительных свойств области применения могут неэффективно влиять на процесс управления.

В действительности функционирование каждого активного элемента ГПС в общих рабочих зонах и оценка их структурно-функциональных характеристик осуществляются в условиях информационной неопределенности. Невозможность полного исследования и эксплуатации всей системы ГПС в условиях нечеткой информационной среды при интеллектуальном управлении АЭ приводит к обнаружению существенных неполадок лишь на этапе внедрения и требует дополнительных программных, технических ресурсов и времени для их устранения.

Перспективным решением данной проблемы является создание программного обеспечения процесса интеллектуального управления АЭ при методике синтеза структур ГПС. С использованием технологии нечеткой логики разрабатываются программные модули для выбора лучшего варианта целенаправленного поведения активных элементов ГПС на основе компьютерных экспериментов.

Кроме того, полученные данные о результатах функционирования активных элементов при нечетких алгоритмах управления более эффективны по сравнению с классическими методами. Это связано с тем, что классические методы управления АЭ обычно применяются в детерминированной среде. Для систем с неточной (или неполной) информацией и высокой сложностью объекта управления более эффективными являются нечеткие методы управления. Отсутствие априорных сведений о математической модели активного элемента означает, что процессы интеллектуального управления АЭ плохо поддаются формализации и математическому описанию.

Построение алгоритма интеллектуальной системы управления АЭ ГПС

Как известно, активные элементы ГПС функционируют в недетерминированном пространстве ситуаций [6] и обычно до внедрения и эксплуатации ГПС проектируются группой специалистов разных профессий: механиков, технологов, конструкторов, специалистов по автоматике и сенсорной технике, причем каждый специалист, играя

роль эксперта в своей области, выполняет ту часть работы, которая связана со сферой его деятельности с учетом их объединения в одно целое на этапе функционирования ГПС.

В связи с фундаментальной ролью структурных моделей для системного анализа важное значение приобретает разработка методов построения структурных моделей ГПС [7, 8], которые в наибольшей степени соответствуют особенностям деятельности групп, состоящих из лиц разных специальностей и сформированных для решения комплексных задач. Необходимо отметить и тот факт, что задуманное проектирование ГПС, основанное на использовании опыта и интуиции специалистов различных направлений, также себя не оправдывает в процессе удобного функционирования ГПС.

В процессе проектирования сложных технических систем, особенно ГПС, специалисты не могут принять окончательное решение по их управлению или затрудняются. В особых случаях для оценки правильности принятия решения специалистами при выборе активных элементов ГПС примем случаи 0 или 1. То есть если решение специалиста оправдывается, то такая оценка будет соответствовать 1, в обратном случае оценка при принятии решения будет 0. Следовало бы отметить, что представленные решения специалистов полностью не реализуют условия системы управления ГПС. В связи с этим на основе принятых решений, учитывая эффективность, полученную при управлении ГПС, можно проводить оценку правильности решения в отрезке [0; 1].

Как известно, задачи, которые решаются при разработке системы управления (СУ) ГПС, относятся к категории трудно формализуемых. Это связано с тем, что для решения любой из этих задач СУ в результате анализа информации от сенсоров должен быть выбран метод перебора вариантов из множества всевозможных ситуаций активных элементов ГПС и соответствующие им правила действия, которые обеспечивают достижение конечной цели всей системы. Очевидно, что решение задачи методом перебора всевозможных вариантов не обеспечит требований реального времени. Эффективным в таких случаях является следующий подход: формализовать функционирование ГПС с использованием продукционной системы на основе опыта и знания эксперта в каждом конкретном применении и представляется в следующем виде:

$$S_t : X \rightarrow (U, A, Z),$$

где S_t – ситуация, происходящая во времени t ; X – массив о текущем состоянии ГПС; U – активные действия для достижения конечной цели всей системы; A – множество активных элементов, выполняющих операции в течение времени t ; Z – коэффициент правильности активных действий, происходящих во времени t , принимает значение из интервала $[0; 1]$.

Исследование функционирования механических узлов активных элементов ГПС показало, что математические модели механических функциональных узлов компонентов таких систем имеют одинаковые структуры и отличаются в каждом конкретном случае лишь значениями постоянных параметров [9]. А кинематическая схема этих узлов, например механических рук манипуляционного робота в производстве испарителей [10], представляет собой разомкнутую кинематическую цепь. Особенность кинематической цепи со структурой дерева заключается в том, что звенья можно пронумеровать, начиная с основания таким образом, чтобы номер последующего звена дерева всегда был больше номера предшествующего звена, равного j_i . Это даёт возможность представить порядок соединения звеньев механизма матрицей параметров размером $2 \times n$. В первой строке этой матрицы приводятся номера звеньев в порядке их возрастания ($\forall i > k, a_i > a_k$), обычно от единицы до n . Во второй строке матрицы приводятся номера звеньев, предшествующих звеньям первой строки.

Матрица, определяющая порядок соединения звеньев n -звенного механизма, в общем случае имеет следующий вид:

$$B = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & \dots & a_i & \dots & a_n \\ a_{j1} & a_{j2} & \dots & a_{ji} & \dots & a_{jn} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $1 \leq i \leq n$, $1 \leq j_i \leq n$, $a_i > a_{ji}$; n – число звеньев; a_i – номера звеньев механического узла; a_{ji} – номера звеньев, предшествующих звеньям первой строки, с которыми они связаны.

Таким образом, для описания конкретного механического узла, кинематическая схема которого входит в класс кинематических схем руки робота, необходимо определить значения следующих типов параметров: матрицу $B(2 \times n)$, определяющую порядок соединения звеньев механизма.

Модуль логического вывода на основе активных данных в виде текущих ситуаций в процессе сопоставления продукции с нечеткой ба-

зой знаний (НБЗ) осуществляет выбор активной продукции и принимается решение по выработке управляющих воздействий U_i на двигатели активных действий для достижения конечной цели всей системы. В качестве глобальной базы данных нечеткой продукции модели используется сенсорная система ГПС [11], содержимое которой динамически меняется после каждого активного действия и вырабатываемые управляющие воздействия в результате логического вывода непосредственно передаются к объекту управления и переводят его в новое состояние для достижения конечной цели всей системы.

Данные в виде фактов $S_t : f(X_i) \Rightarrow f(U_j)$; ($f = \{\&, \vee, \lceil, \rightarrow\}$ – алгебра предикатов первого порядка) поступают к входу модуля управления базы данных, где структурируются и создается массив X в виде базы фактов о текущем состоянии ГПС:

$$X = \|X_1 X_2 \dots X_i \dots X_n\|,$$

где X_i – информации от i -х сенсоров, установленных в различных позициях ГПС; n – количество сенсоров конкретной ГПС.

Отметим, что S_t есть ситуация, происходящая во времени t . Априорные знания о конкретной ГПС в виде текущей $P_i : f(X_i^a) \Rightarrow f(U_i)$ последовательно поступают к входу модуля управления НБЗ, где они структурируются, и создается массив текущей нечеткой продукции X_a^p априорных знаний, у которого неиспользованные элементы массива маскируются:

$$X_a^p = \|X_{ti}^a M_j\|; \quad i = \overline{1, n}; \quad j < n, \quad (2)$$

где X_{ti}^a – соответствующий i -й компонент текущей a -й нечеткой продукции, происходящей во времени t ; M_j – маскированные элементы массива текущей j -й нечеткой продукции, которые не используются при выработке управляющих действий.

Кроме того, на основе НБЗ определяются коэффициенты уверенности (Z) для правил, полученных на основании априорной информации о действии активных элементов ГПС:

$$Z = \{z_1, z_2, \dots, z_m\},$$

где m – количество коэффициентов уверенности для нечеткой продукции при функционировании конкретной ГПС.

Над соответствующими элементами массива

X и X_a^p осуществляется поразрядная логическая операция «нечеткое исключающее ИЛИ» (\oplus), далее производится «нечеткое логическое сложение» (\vee) всех результатов предыдущей логической операции:

$$Z_t = \left(X_1 \oplus X_{t1}^a \right) \vee \left(X_2 \oplus X_{t2}^a \right) \vee \dots \vee \left(X_n \oplus X_{tn}^a \right) = \\ = \bigvee_{i=1}^n (X_i \oplus X_{ti}^a). \quad (3)$$

Если Z_t принимает значение из множества $\{z_1, z_2, \dots, z_m\}$, то активизируется соответствующее правило $f(U_j)$ проверенной текущей нечеткой продукции. В противном случае вызывается следующая нечеткая продукция и процедура повторяется аналогично вышеизложенному. Алгоритм логического вывода для решения задач при выполнении имитационного эксперимента представлена на **рис. 1**.

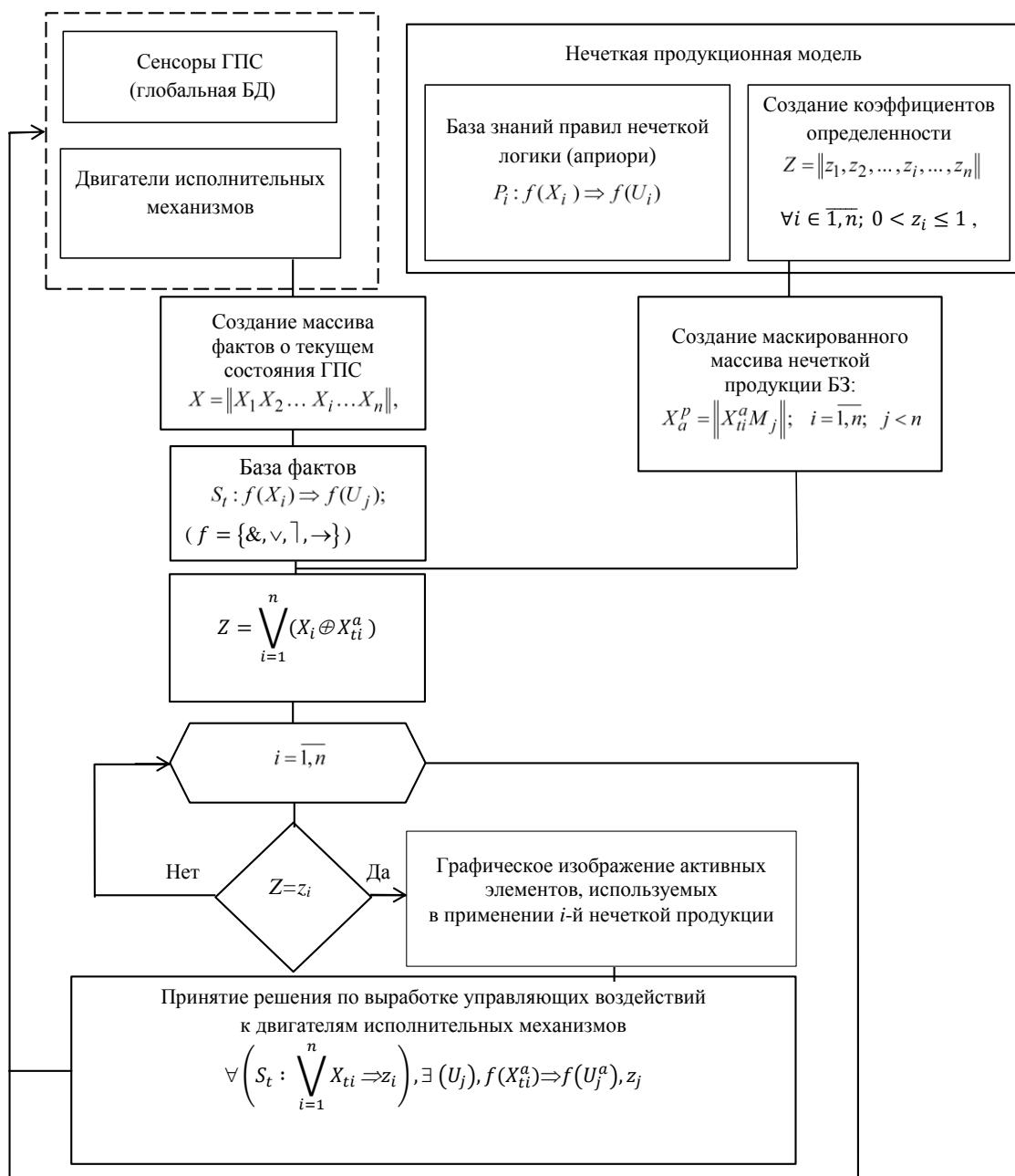


Рис. 1. Алгоритм решения задач при выполнении компьютерного эксперимента
Fig. 1. Problem solution algorithm, when conducting the computer experiment

Принятие решения по выработке управляющих воздействий в блоке логического вывода выполняется по алгоритму:

$$\forall \left(S_t : \bigvee_{i=1}^n X_{ti} \Rightarrow z_i \right), \exists (U_j), \\ f(X_{ti}^a) \Rightarrow f(U_j^a), z_j. \quad (4)$$

Словесно это описание интерпретируется в следующим виде: для каждой текущей ситуации активных данных S_t с начальным коэффициентом уверенности z_i существует адекватное активное действие U_j^a , которое переводит базу фактов в новое состояние с целью достижения конечного результата в реальном масштабе времени, ограниченного минимальным тактом ГПС, конечный коэффициент уверенности определяется по значению z_j .

Разработка программного обеспечения

На основе (3) и (4) разрабатывается программное обеспечение для проведения компьютерного эксперимента функционирования системы управления ГПС. Программное обеспечение компьютерного эксперимента (ПОКЭ) состоит из: модуля управления нечеткой базы данных (МУНБД); модуля управления нечеткой базы знаний (МУНБЗ); планировщика и логического вывода. МУНБД обеспечивает прием и структурирование информации от множества сенсорных устройств (из базы фактов) и передает ее к блоку нечеткого логического вывода. МУНБЗ обеспечивает прием и структурирование нечеткой продукции и передает их к блоку логического вывода. Учитывая, что ГПС состоят из АЭ различного назначения, основная цель создания МУНБЗ – формализация описания поведения АЭ системы.

Методика логического программирования определяет способ задания последовательностей движения и действия активного элемента и их логическую организацию [12]. Кроме того, методы логического программирования более удобны для построения МУНБД и МУНБЗ в том, что знания, представленные в виде фактов и правил, являются основной частью языка ПРОЛОГ [13], что упрощает создание НБД и НБЗ в логическом выражении.

Для построения оптимальных траекторий перемещения АЭ в окружающей среде и определе-

ния их столкновений используются программные модули, разработанные на языке С# [14], а также обеспечивается итеративное взаимодействие системы с программистом. Применение диалогового режима упрощает такое взаимодействие. Диалоговый режим позволяет программисту строить изображение любой интересующей его части технологической среды в любой момент времени и визуально наблюдать за результатом введения изменений в разрабатываемую программу.

Методика совместного программирования на языках ПРОЛОГ и С# определяет способ задания последовательностей интеллектуального движения и действия АЭ (рис. 2). Для улучшения интеллектуальности перемещения АЭ в окружающей среде используется итеративное взаимодействие системы с программистом, учитывая идеи и предложения группы специалистов – инженера по знаниям, технолога и конструктора, а также применение диалогового режима, вводятся продукции, представленные в виде (3), для функционирования конкретной ГПС и создается структура НБД и НБЗ для проведения интеллектуального управления ГПС. Планировщик определяет стратегию поиска активных действий в базе правил, устанавливает приоритетность и последовательность их выполнения.

Модуль логического вывода на основе активных данных в виде текущих ситуаций в процессе сопоставления продукции с НБЗ осуществляет выбор активной продукции и принимает решение по выработке управляющих воздействий на двигатели АЭ. Следовательно, для управления АЭ требуются прием информации от сенсоров, установленных в различных позициях АЭ, и вырабатываемые целенаправленные воздействия на его исполнительные механизмы.

На этапе проектирования ГПС интерпретация управляющих моделей выполняется для анализа алгоритмов управления и решения различных оптимизационных задач, вытекающих из общей цели системотехнического проектирования. Спроектированная с помощью системы структурного моделирования и отлаженная управляющая модель в дальнейшем используется для функционирования ГПС. При этом интерпретация управляющей модели на конкретной ГПС выполняется с помощью тех же программных средств, которые использовались на этапе проектного анализа.

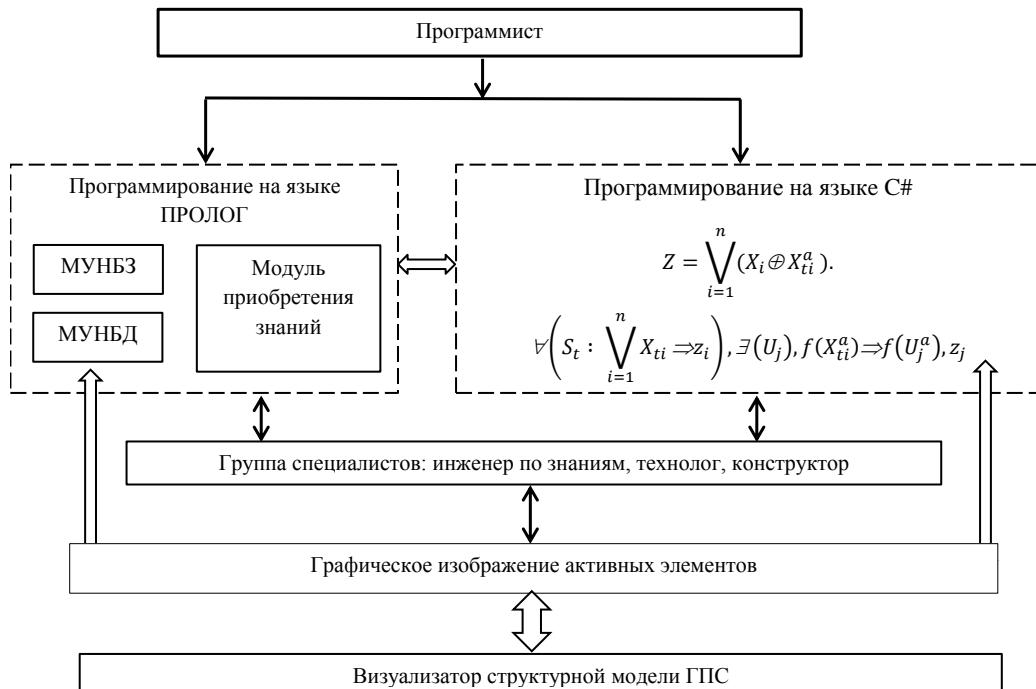


Рис. 2. Компьютерный эксперимент интеллектуального управления ГПС
Fig. 2. Computer experiment of intelligent control of FMS

При успешном завершении компьютерного эксперимента получается загрузочный модуль программы на носителе информации, который обеспечивает функционирование реальной ГПС в промышленных условиях.

Синтез структурного моделирования ГПС

Синтез структур и улучшение интеллектуальности на базе конкретной ГПС осуществляются с помощью разработанных программных средств. Программные средства при управлении активных элементов ГПС содержат следующие модули: семантической и статической интерпретации функционирования ГПС; нечеткого логического вывода; планировщика; визуализации структурной модели ГПС. Отметим, что такие программные модули объединены в группу специализированных инструментальных программных средств.

На основе разработанного программного обеспечения проектировщик имеет возможность интеллектуально анализировать современное состояние автоматизации аналогичных технологических процессов. С помощью НБЗ либо выбирается готовый проект, разработанный в других предприятиях, либо разрабатывается новый вариант, если отсутствуют аналоги, выполняющие функции, предусмотренные в техническом задании. Далее проектировщик разрабатывает структурную модель ГПС в нескольких вариан-

тах и вместе со специалистами по автоматике анализирует интеллектуальность задачи управления ГПС. В результате конструкторы выбирают стандартные узлы для компоновки отдельных модулей и при необходимости конструируют новые узлы.

Как видно, проектирование является сложным итерационным процессом и должно реализовываться поэтапно, а важным этапом при проектировании ГПС является задача синтеза их структур, так как успехи в дальнейших этапах во многом зависят от правильности выбранной структуры ГПС и их элементов для конкретного применения. В результате компьютерного имитационного эксперимента определяется адекватность разработанного алгоритма функционирования ГПС на основе логико-лингвистической модели, сформулированной экспертом с учетом определенных ограничений и дефицита информации об объекте управления. Информационные объекты реализованы на основе общей НБД и служат источником информации, выбранной в соответствии с профессиональными интересами пользователя и преобразованной в форму, пригодную для решения его задач. НБЗ системы содержит знания экспертов, применяемые ими в процессе проектирования ГПС.

Разработанное программное обеспечение системы структурного моделирования ГПС прак-

тически было применено на роботизированном участке создания пакета из алюминиевых карточек и его прокатки [15]. Основное назначение принципа работы участка заключается в том, что с помощью робота карточки снимаются с необходимых позиций, то есть из рабочей зоны, и передаются на участок нанесения рисунка, где и происходит операция нанесения рисунка на карточку. Рабочая зона означает то, что карточки могут находиться в любой позиции в этой зоне. Зона, определенная между рабочей зоной и роботом, является границей рабочей зоны.

С применением разработанных программных модулей можно моделировать имитационные движения активного элемента и улучшить интеллектуальность как в пределах рабочей зоны, так и в рабочей зоне. Таким образом, за границей рабочей зоны коэффициент уверенности z_j для нечеткой продукции при функционировании конкретного активного элемента не имеет смысла, то есть принимается равным нулю. В качестве входной лингвистической переменной принята “Действия активных элементов”. Лингвистическая переменная под названием “Действия активных элементов” является терм-множеством и ее характеристики содержат следующие нечеткие переменные:

- 1) “начинается вход в рабочую зону”;
- 2) “почти в рабочей зоне”;
- 3) “начинается выход из рабочей зоны”;
- 4) “уже покидает рабочую зону”;
- 5) “почти покинул рабочую зону”.

Каждая нечеткая переменная, являющаяся элементом (или характеристикой) множества под названием “Действия активных элементов”, принимает соответствующие значения с областью $(0,1]$. Значения нечетких переменных, зависящих от ситуации, меняются во времени. Промышленный робот, который рассматривается как активный элемент, приближается к границе рабочей зоны в роботизированном участке, далее пересекает граничную зону и входит в рабочую зону, где расположена цель. Если после входа в рабочую зону робот захватывает карточку из необходимого положения, то это можно считать приближением к цели. Итак, после выполнения двух операций робота – “начинается вход в рабочую зону” и “почти в рабочей зоне” – конечная цель считается почти достигнутой. Однако, учитывая, что с другим активным элементом следующая карточка помещается в эту позицию (означающая как целевой), промышленный робот (ПР), который захватил карточку, должен с карточкой покинуть целевую по-

зицию. ПР, покидая рабочую зону, перемещается к границе рабочей зоны и оказывается за пределами зоны. И в конечном итоге, как указано выше, карточки с помощью ПР передаются на участок нанесения рисунка, где и происходит операция нанесения рисунка на карточку. Значит, выполняются следующие три операции: “начинается выход из рабочей зоны”, “уже покидает рабочую зону” и “почти покинул рабочую зону”, и цель достигнута.

Имитационные движения промышленного робота показаны на **рис. 3**.

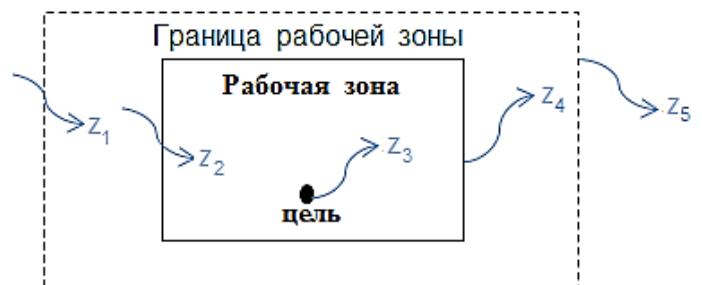


Рис. 3. Имитационно-графическое представление робота

Fig. 3. Simulation graphic representation of the robot

Коэффициент уверенности, означающий характеристики нечетких переменных множеств под названием “Действия активных элементов”, определено экспертом и первичным имеет следующее представление:

- “начинается вход в рабочую зону”/ $(z_1=0,45)$;
- “почти в рабочей зоне”/ $(z_2=0,64)$;
- “начинается выход из рабочей зоны”/ $(z_3=0,92)$;
- “уже покидает рабочую зону”/ $(z_4=0,75)$;
- “почти покинул рабочую зону”/ $(z_5=0,24)$.

При выполнении любой технологической операции активные элементы ГПС, в том числе и на роботизированном участке создания пакета из алюминиевых карточек и его прокатки, имеют между собой конкретные общие рабочие зоны. В зависимости от количества активных элементов, участвующих в конкретной общей рабочей зоне, первичное представление коэффициента уверенности для “Действий активных элементов” (определяется со стороны эксперта) обновляется программным путем, и принимаются новые значения. Полученное новое значение сопоставляется с коэффициентом уверенности, которое обозначает действия каждого активного элемента ГПС, представленные в нечеткой производственной модели.

Для настройки нечеткой производственной системы под названием “Действия активных элементов” с применением алгоритмического

языка C# разработано программное обеспечение. Фрагмент настройки нечеткой производственной системы приведен на **рис. 4**, а нечеткая производственная модель для интеллектуального движения робота, полученная программированием, показана на **рис. 5**.

Для каждой текущей ситуации “Действия активных элементов” существует адекватное активное действие, которое переводит нечеткую базу данных в новое состояние с целью дости-

жения конечного результата. Значит, нечеткие базы данных содержат постоянно обновляемую информацию о текущем состоянии АЭ.

Совместно с настройкой нечеткой производственной системы на заданный участок, используя логический язык ПРОЛОГ, формализована нечеткая база данных, состоящая из коэффициентов уверенности. Фрагмент нечеткой базы данных коэффициентов уверенности приведен на **рис. 6**.

```
private void SOZDAT_NCT_PRODUKSII(DataGridView NZVN_RPDS)
{
    // ===== СОЗДАНИЯ МОДУЛЯ УПРАВЛЕНИЯ НЕЧЕТКОЙ БАЗЫ ЗНАНИЙ =====
    int prds_klc = Produksiyalar.RowCount - 1; //
    int oturucu_sayi = Produksiyalar.ColumnCount - 1; //
    int zet_znaceni = Produksiyalar.RowCount - 1; //

    sec_produksiyalari.Items.Clear();

    string Prods_yzl = "";
    string birlsv_smv = "";

    for (int i = 1; i < prds_klc; i++)
    {
        birlsv_smv = "";
        Prods_yzl = "P_№" + i.ToString() + " ==> ";
        int j = 0;
        for (int k = 1; k <= oturucu_sayi; k++)
        {
            string otrc_qymt="";
            if (
                (Produksiyalar [k, i].Value == null)
                ||
                ((otrc_qymt = Produksiyalar [k, i].Value.ToString().Trim()) == ""))
            ) continue;

            if (j > 0) birlsv_smv = " & ";
            if (otrc_qymt == "1") Prds_yzl += birlsv_smv + "(X" + k.ToString() + ")";
            if (otrc_qymt == "0") Prds_yzl += birlsv_smv + "(~X" + k.ToString() + ")";
            j++;
        }
        if (j != 0) Prods_yzl += "(Z" + i.ToString() + ")";
        if (j == 0) Prods_yzl += "( Не определено! )";
        sec_produksiyalari.Items.Add(Prds_yzl);
        bzdnx(Prds_yzl);
    }
}
```

Рис. 4. Программный фрагмент настройки нечеткой производственной системы
Fig. 4. Software component of setting the fuzzy production system

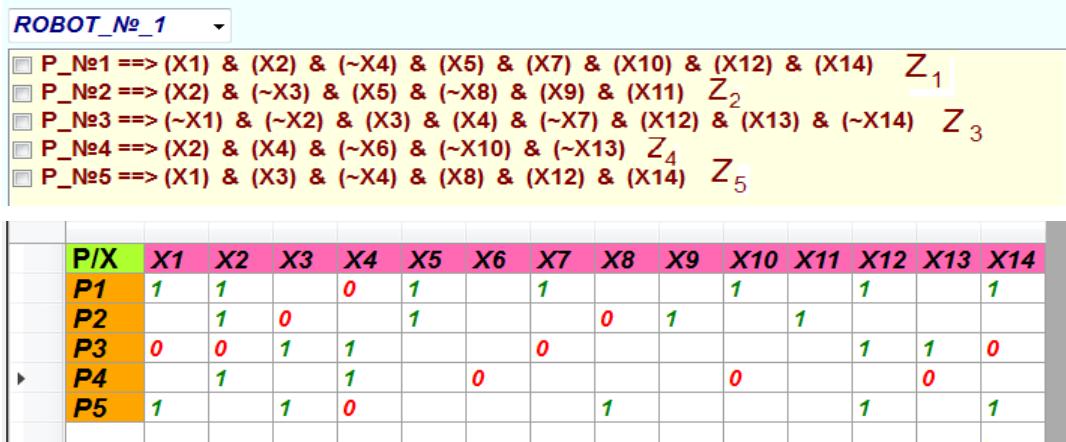


Рис. 5. Нечеткая продукционная модель для интеллектуального движения робота
Fig. 5. Fuzzy production model for intelligent movement of the robot

```

domains
zet_zncn=real
zetn_list= zet_zncn*
robot_dvj = symbol
zona_qld = real
L_zona_qld = zona_qld*
database – dat_S_har
data_prd_bd(robot, zet_zncn, zetn_list)
predicates
xaraktrs(zet_zncn, robot_dvj).
akv_elemnt (robot, zona_qld).
sec_opmtl(robot, zona_qld).
maxqb(L_yulk_qld, zona_qld).
clauses
xaraktrs(0.45, “начинается вход в рабочую зону”).
xaraktrs(0.64, “почти в рабочей зоне”).
xaraktrs(0.92, “начинается выход из рабочей зоны”).
xaraktrs(0.75, “уже покидает рабочую зону”).
xaraktrs(0.24, “почти покинул рабочую зону”).
sec_opmtl (Ael, Optml) :- findall (Y, akv_elemnt ( _ , akv_elemnt ( _ , Y), L),
maxqb(L, Optml), akv_elemnt (Ael, Optml).
Goal
sec_opmtl (Ak_el_syh, Optml), consult(Ak_el_syh, “vrcl_baza.dsh”, dat_S_har),
xaraktrs(R, dat_S_har).

```

Рис. 6. Фрагмент нечеткой базы данных коэффициентов уверенности
Fig. 6. Component of the fuzzy database of certainty factors

Построение интеллектуальной системы управления активных элементов гибких производственных систем осуществляется в следующей последовательности:

- 1) определение входов и выходов системы управления исполнительных механизмов “Действия активных элементов”;
- 2) разработка лингвистических правил;
- 3) определение коэффициента уверенности для каждой нечеткой продукции;
- 4) выбор и реализация алгоритма нечеткого логического вывода;

5) анализ процесса управления “Действия активных элементов”.

Имитационный режим позволяет программисту строить изображение любой интересующей его части технологической среды в любой момент времени и визуально наблюдать за результатом введения изменений в разрабатываемую программу. Также визуальное наблюдение дает возможность синтезировать структуру конкретной ГПС и с помощью разработанных программных средств увеличить интеллектуальность на основе коэффициентов уверенности (рис. 7).

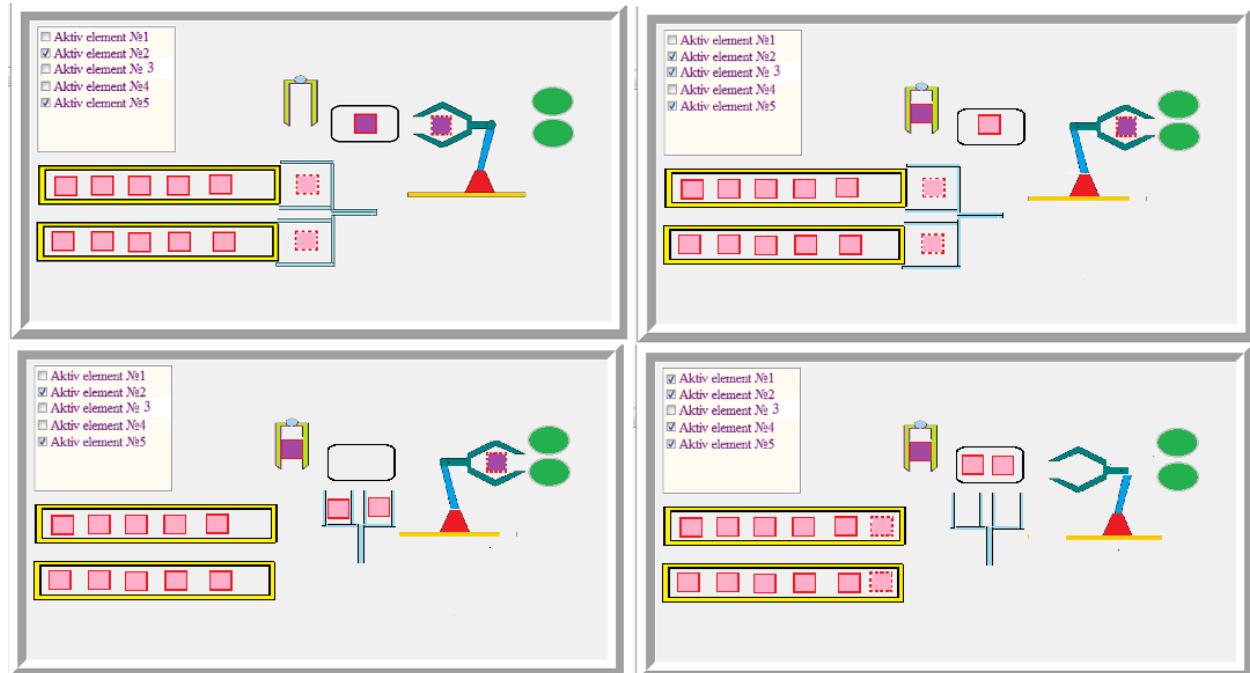


Рис. 7. Визуальное изображение исследуемого робототехнического модуля
Fig. 7. Visual image of the robotic module under study

Заключение

Все программные средства разработаны по модульному принципу, каждый модуль рассматривается как функционально-законченный программный продукт и позволяет специалистам анализировать различные аспекты функционирования активных элементов гибких производственных систем и устранять допущенные ошибки на этапе предварительного проектирования.

Создание нечетких баз знаний дает возможность сформировать новые нечеткие правила усовершенствования вновь разрабатываемых ГПС, а также исследовать интеллектуальность функционирования уже существующих ГПС, и удобно для сравнения различных проектированных вариантов систем управления ГПС, в результате определяются их достоинства и недостатки. Предложенный алгоритм также может быть применен в производствах, аналогичных рассмотренному производству.

Список литературы

1. Албагачиев А.Ю., Краско А.С. Модель загрузки транспортно-загрузочного средства гибкой производственной системы // Проблемы машиностроения и надежности машин. №4. 2019. С. 77–82.
2. Сергеев А.И. Разработка технического предложения по созданию гибкой производственной системы ме-

ханической обработки // Современные научно-исследовательские технологии. 2016. №3-2. С. 272–279.

3. Beezão A.C., Cordeau J.F., Laporte G., Yanasse H.H. Scheduling identical parallel machines with tooling constraints // European journal of operational research. 2017. V. 257. №3. Pp. 834–841.
4. Формализованное описание работы гибких производственных систем при создании систем компьютерного моделирования / Сердюк А.И., Сергеев А.И., Корнилаев М.А., Проскурин Д.А. // СТИН. 2016. №7. С. 12–18.
5. Matejic M.1, Tadic B.1, Lazarevic M.2, Vukelic D., Misić M. Modelling and simulation of a novel modular fixture for a flexible manufacturing system // International journal of simulation modeling. 2018. V. 17. №1. С. 18–27.
6. Ouaret S., Kenné J.P., Gharbi A. Production and replacement policies for a deteriorating manufacturing system under random demand and quality // European journal of operational research. 2018. V. 264. №2. С. 623–632.
7. Кадырова А.А. Методы моделирования и исследования нелинейных и логико-динамических систем управления. Ташкент: Янги аср авлоди, 2010. 186 с.
8. Роганов В.Р., Филиппенко В.О. Сравнительный анализ систем имитации визуальной обстановки // Современные информационные технологии. 2014. №19. С. 162–166.
9. Алиев Р.А., Церковный А.Э., Мамедова Г.А. Управление производством при нечеткой исходной информации. М.: Энергоатомиздат, 1991. 240 с.

10. Рагимов Ш.Р., Гусейнов А.Г. Структурное моделирование базы данных и базы знаний активных элементов гибких производственных систем // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2020, №7. С. 15–23.
11. Усков А.А. Системы с нечеткими моделями объектов управления: монография. Смоленск: СФРУК, 2013. 153 с.
12. Метакидес Г., Нероуд А. Принципы логики и логического программирования. М.: Факториал, 1998. 288 с.
13. Братко И. Алгоритмы искусственного интеллекта на языке Prolog: пер. с англ. 3-е изд. М.: Вильямс, 2001. 640 с.
14. Скит, Джон. C# для профессионалов: тонкости программирования: пер. с англ. 3-е изд. М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2014. 608 с.: ил.
15. Рагимов Ш. Р. Определение и программирование эффективности функционирования активных элементов гибких производственных систем при структурном моделировании // Автоматизация. Современные технологии. 2021. №3. С. 112–116.

References

1. Albagachiev A.Yu., Krasko A.S. The loading pattern of a transport-loading facility of a flexible manufacturing system. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin* [Problems of Mechanical Engineering and Reliability of Machines], 2019, no. 4, pp. 77–82. (In Russ.)
2. Sergeev A.I. Development of a technical proposal for designing a flexible manufacturing system for mechanical processing. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Modern Science-Intensive Technologies], 2016, no. 3-2, pp. 272–279. (In Russ.)
3. Beezão A.C., Cordeau J.F., Laporte G., Yanasse H.H. Scheduling identical parallel machines with tooling constraints. *European Journal of Operational Research*, 2017, vol. 257, no. 3, pp. 834–841.
4. Serdyuk A.I., Sergeev A.I., Kornipaev M.A., Proskurin D.A. A formalized description of the operation of flexible manufacturing systems when creating computer simulation systems. *STIN* [Machines and Tools], 2016, no. 7, pp. 12–18. (In Russ.)
5. Matejic M., Tadic B., Lazarevic M., Vukelic D., Masic M. Modeling and simulation of a novel modular fixture for a flexible manufacturing system. *International Journal of Simulation Modeling*, 2018, vol. 17, no. 1, pp. 18–27.
6. Ouaret S., Kenné J.P., Gharbi A. Production and replacement policies for a deteriorating manufacturing system under random demand and quality. *European Journal of Operational Research*, 2018, vol. 264, no. 2, pp. 623–632.
7. Kadyrova A.A. *Metody modelirovaniya i issledovaniya nelineynykh i logiko-dinamicheskikh sistem upravleniya* [Methods of modeling and research of nonlinear and logical-dynamic control systems]. Tashkent: Yangi asr avlod, 2010. 186 p. (In Russ.)
8. Roganov V.R., Filippenko V.O. A comparative analysis of visual environment simulation systems. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii* [Modern Information Technologies], 2014, no. 19, pp. 162–166. (In Russ.)
9. Aliev R.A., Tserkovny A.E., Mamedova G.A. *Upravlenie proizvodstvom pri nechetkoy iskhodnoy informatsii* [Production management with fuzzy initial information]. Moscow: Energoatomizdat, 1991, 240 p. (In Russ.)
10. Ragimov Sh.R., Guseynov A.G. Structural modeling of the database and knowledge base of active elements of flexible manufacturing systems. *Vestnik kompyuternykh i informatsionnykh tekhnologii* [Bulletin of Computer and Information Technologies], 2020, no. 7, pp. 15–23. (In Russ.)
11. Uskov A.A. *Sistemy s nechetkimi modelyami obektov upravleniya: monografiya* [Systems with fuzzy models of control objects: monograph]. Smolensk: Smolensk Branch of the Russian University of Cooperation, 2013, 153 p. (In Russ.)
12. Metakides G., Nerode A. *Printsipy logiki i logicheskogo programmirovaniya* [Principles of logic and logic programming]. Moscow: Factorial, 1998, 288 p. (In Russ.)
13. Bratko I. *Algoritmy iskusstvennogo intellekta na yazyke Prolog* [Prolog programming for artificial intelligence]. Moscow: Williams, 2001. 640 p. (In Russ.)
14. Skeet John. *C# dlya professionalov: tonkosti programmirovaniya* [C# for professionals: the subtleties of programming]. Moscow: LLC Williams Publishing House, 2014, 608 p. (In Russ.)
15. Ragimov Sh.R. Determining and programming efficiency of functioning active elements of flexible production systems in structural modeling. *Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii* [Automation. Modern Technologies], 2021, no. 3, pp. 112–116. (In Russ.)

Поступила 23.03.2022; принята к публикации 17.05.2022; опубликована 28.06.2022
 Submitted 23/03/2022; revised 17/05/2022; published 28/06/2022

Рахимов Шафагат Рахим оглы – кандидат технических наук, доцент,
 кафедра «Информационные технологии и программирование»,
 Сумгайитский государственный университет, Сумгайит, Азербайджан.
 Email: cavan62@mail.ru. ORCID 0000-0002-7642-4921

Мамедов Джаваншир Фирудин оглу – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автоматизация процессов»
Сумгайтский государственный университет, Сумгайт, Азербайджан.
Email: cavan62@mail.ru. ORCID 0000-0002-1998-3137

Shafagat R. Ragimov – PhD (Eng.), Associate Professor,
Department of Information Technologies and Programming,
Sumgait State University, Sumgait, Azerbaijan.
Email: cavan62@mail.ru. ORCID 0000-0002-7642-4921

Dzhavanshir F. Mamedov – DrSc (Eng.), Professor,
Head of the Process Automation Department,
Sumgait State University, Sumgait, Azerbaijan.
Email: cavan62@mail.ru. ORCID 0000-0002-1998-3137