

ИЗВЕСТИЯ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

Том 64 Номер 12 2021



• МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

**РАЗРАБОТКА НОВОЙ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКИ НА ОСНОВЕ ПЫЛИ
ГАЗООЧИСТКИ СИЛИКОМАРГАНЦА**

• МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

**ПОВЕРХНОСТНОЕ УПРОЧНЕНИЕ ТВЕРДОСПЛАВНОГО ИНСТРУМЕНТА
НА ОСНОВЕ КАРБИДА ВОЛЬФРАМА КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ
ЭНЕРГИИ**

**ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ РЕЛЬСОВ
ПРИ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

• ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ДОЖИГАНИЯ ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ
В КОНВЕРТЕРАХ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ДВУХЯРУСНЫХ КИСЛОРОДНЫХ ФУРМ**

ISSN 0368-0797 (Print)
ISSN 2410-2091 (Online)

ИЗВЕСТИЯ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

Том 64, Номер 12, 2021

Научно-технический журнал
Издается с января 1958 г. ежемесячно

IZVESTIYA

FERROUS METALLURGY

Volume 64, Number 12, 2021

Scientific and Technical Journal
Published since January 1958. Issued monthly

ИЗВЕСТИЯ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

www.fermet.misis.ru

ISSN 0368-0797 (Print) ISSN 2410-2091 (Online)

Варианты названия:

Известия вузов. Черная металлургия
Izvestiya. Ferrous Metallurgy

Учредители:



Национальный исследовательский
технологический университет «МИСиС» (НИТУ МИСиС)



Сибирский государственный индустриальный университет

Главный редактор:

Леопольд Игоревич Леонтьев, академик РАН, советник,
Президиум РАН; д.т.н., профессор, Национальный иссле-
довательский технологический университет «МИСиС»;
главный научный сотрудник, Институт металлургии УрО РАН,
г. Москва

Заместитель главного редактора:

Евгений Валентинович Протопопов, д.т.н., профессор,
Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк

Адреса редакций:

Россия, 119991, Москва, Ленинский пр-т, д. 4
Национальный исследовательский технологический
университет «МИСиС»,
Тел.: +7 (495) 638-44-11

E-mail: fermet.misis@mail.ru, ferrous@isis.ru

Россия, 654007, Новокузнецк,
Кемеровская обл. – Кузбасс, ул. Кирова, зд. 42
Сибирский государственный индустриальный университет,
Тел.: +7 (3843) 74-86-28
E-mail: redjizvz@sibsiu.ru

Редакционная коллегия:

Алешин Н.П., академик РАН, д.т.н., профессор, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
г. Москва

Астахов М.В., д.т.н., профессор, НИТУ «МИСиС», г. Москва

Ашихмин Г.В., д.т.н., профессор, ОАО «Ин-Т Цветметобработка»,
г. Москва

Байсанов С.О., д.т.н., профессор, ХМИ им. Ж.Абишева, г. Караганда,
Республика Казахстан

Белов В.Д., д.т.н., профессор, НИТУ «МИСиС», г. Москва

Бродов А.А., к.экон.н., ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина»,
г. Москва

Волынкина Е.П., д.т.н., профессор, СибГИУ, г. Новокузнецк

Глезер А.М., д.ф.-м.н., профессор, НИТУ «МИСиС», г. Москва

Горбатько С.М., д.т.н., профессор, НИТУ «МИСиС», г. Москва

Григорьев К.В., академик РАН, д.т.н., ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН,
г. Москва

Громов В.Е., д.ф.-м.н., профессор, СибГИУ, г. Новокузнецк

Дмитриев А.Н., д.т.н., академик, профессор, ИМЕТ УрО РАН,
г. Екатеринбург

Дуб А.В., д.т.н., профессор, ЗАО «Наука и инновации», г. Москва

Жучков В.И., д.т.н., профессор, ИМЕТ УрО РАН, г. Екатеринбург

Зингер Р.Ф., д.т.н., профессор, Институт Фридриха-Александра,
Германия

Зиниград М., д.т.н., профессор, Институт Ариэля, Израиль

Золотухин В.И., д.т.н., профессор, ТулГУ, г. Тула

Колмаков А.Г., д.т.н., чл.-корр. РАН, ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН,
г. Москва

Колокольцев В.М., д.т.н., профессор, МГТУ им. Г.И. Носова,
г. Магнитогорск

Костина М.В., д.т.н., ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН, г. Москва

Косырев К.Л., д.т.н., профессор, АО «НПО «ЦНИИТМаш», г. Москва

Курганова Ю.А., д.т.н., профессор, МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва

Куринос В.В., к.ф.-м.н., доцент, НИТУ «МИСиС», г. Москва

Линн Х., ООО «Линн Хай Терм», Германия

Лысак В.И., академик РАН, д.т.н., профессор, ВолгГТУ, г. Волгоград

Мешалкин В.П., академик РАН, д.т.н., профессор, РХТУ
им. Д.И. Менделеева, г. Москва

Мулюков Р.Р., д.ф.-м.-н., профессор, чл.-корр. ФГБУН ИПСМ РАН,
г. Уфа

Мышляев Л.П., д.т.н., профессор, СибГИУ, г. Новокузнецк

Никулин С.А., д.т.н., профессор, чл.-корр. РАЕН, НИТУ «МИСиС»,
г. Москва

Нурумгалиев А.Х., д.т.н., профессор, КГИУ, г. Караганда, Республика
Казахстан

Островский О.И., д.т.н., профессор, Университет Нового Южного
Уэльса, Сидней, Австралия

Пиетрелли Лорис, д.т.н., Итальянское национальное агентство по
новым технологиям, энергетике и устойчивому экономическому
развитию, Рим, Италия

Подгородецкий Г.С., к.т.н., доцент, НИТУ «МИСиС», г. Москва

Пышминцев И.Ю., д.т.н., РосНИТИ, г. Челябинск

Рудской А.И., академик РАН, д.т.н., профессор, СПбПУ Петра
Великого, г. Санкт-Петербург

Сивак Б.А., к.т.н., профессор, АО АХК «ВНИИМТМаш», г. Москва

Симонов Л.М., д.т.н., профессор, НИТУ «МИСиС», г. Москва

Смирнов Л.А., академик РАН, д.т.н., профессор, ОАО «Уральский
институт металлов», г. Екатеринбург

Солодов С.В., к.т.н., НИТУ «МИСиС», г. Москва

Спирин Н.А., д.т.н., профессор, УрФУ, г. Екатеринбург

Танг Гуоц, Институт перспективных материалов университета
Циньхуа, г. Шеньжень, Китай

Темлянец М.В., д.т.н., профессор, СибГИУ, г. Новокузнецк

Филонов М.Р., д.т.н., профессор, НИТУ «МИСиС», г. Москва

Чуманов И.В., д.т.н., профессор, ЮУрГУ, г. Челябинск

Шеукоу О.Ю., д.т.н., профессор, УрФУ, г. Екатеринбург

Шпайдель М.О., д.т.н., профессор, Швейцарская академия
материаловедения, Швейцария

Юрьев А.Б., д.т.н., доцент, СибГИУ, г. Новокузнецк

Юсупов В.С., д.т.н., профессор, ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН, г. Москва

Индексирование: Scopus, Russian Science Citation Index
на платформе Web of Science, Research Bible, OCLC и Google Scholar

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору
в сфере связи и массовых коммуникаций ПИ № ФС77-35456.



Статьи доступны под лицензией Creative Commons
Attribution 4.0 License.

По решению ВАК журнал «Известия вузов. Черная
металлургия» входит в «Перечень ведущих
рецензируемых научных журналов и изданий,
в которых должны быть опубликованы основные
научные результаты диссертаций на соискание
ученой степени доктора и кандидата наук».

IZVESTIYA

FERROUS METALLURGY

www.fermet.misis.ru

ISSN 0368-0797 (Print) ISSN 2410-2091 (Online)

Alternative title:

Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya
Izvestiya. Ferrous Metallurgy

Founders:



National University of Science
and Technology "MISIS"



Siberian State Industrial University

Editor-in-Chief:

Leopold I. Leont'ev, Academician, Adviser of the Russian Academy of Sciences; Dr. Sci. (Eng.), Prof., National University of Science and Technology "MISIS"; Chief Researcher, Institute of Metallurgy UB RAS, Moscow

Deputy Editor-in-Chief:

Evgenii V. Protopopov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Siberian State Industrial University, Novokuznetsk

Editorial Addresses:

4 Leninskii Ave., Moscow 119991, Russian Federation
National University of Science and Technology "MISIS"
Tel.: +7 (495) 638-44-11

E-mail: fermet.misis@mail.ru, ferrous@sisu.ru

42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass
654007, Russian Federation
Siberian State Industrial University
Tel.: +7 (3843) 74-86-28
E-mail: redjizv@sibsiu.ru

Editorial Board:

Nikolai P. Aleshin, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Academician of RAS, Bauman STU, Moscow
German V. Ashikhmin, Dr. Sci. (Eng.), Prof., JSC "Institute Tsvetmetobrabotka", Moscow

Mikhail V. Astakhov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., NUST "MISIS", Moscow

Sailaubai O. Baisanov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Abishev Chemical-Metallurgical Institute, Karaganda, Republic of Kazakhstan

Vladimir D. Belov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., NUST "MISIS", Moscow

Anatolii A. Brodov, Cand. Sci. (Econ.), Bardin Central Research Institute for Ferrous Metallurgy, Moscow

Il'ya V. Chumanov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., South Ural State Research University, Chelyabinsk

Andrei N. Dmitriev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Academician, Institute of Metallurgy, Ural Branch of RAS, Ural Federal University, Yekaterinburg

Aleksei V. Dub, Dr. Sci. (Eng.), Prof., JSC "Science and Innovations", Moscow

Mikhail R. Filonov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., NUST "MISIS", Moscow

Aleksandr M. Glezer, Dr. Sci. (Phys.-math.), Prof., NUST "MISIS", Moscow

Sergei M. Gorbatyuk, Dr. Sci. (Eng.), Prof., NUST "MISIS", Moscow

Konstantin V. Grigorovich, Academician of RAS, Dr. Sci. (Eng.), Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of RAS, Moscow

Victor E. Gromov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Siberian State Industrial University, Novokuznetsk

Aleksei G. Kolmakov, Dr. Sci. (Eng.), Corresponding Member of RAS, Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of RAS, Moscow

Valerii M. Kolokol'tsev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk

Mariya V. Kostina, Dr. Sci. (Eng.), Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of RAS, Moscow

Konstantin L. Kosyrev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., JSC "NPO "TSNIITMash", Moscow

Yuliya A. Kurganova, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Bauman Moscow State Technical University, Moscow

Vladimir V. Kurnosov, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assist. Prof., NUST "MISIS", Moscow

Linn Horst, Linn High Therm GmbH, Hirschbach, Germany

Vladimir I. Lysak, Academician of RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Rector, Volgograd State Technical University, Volgograd

Valerii P. Meshalkin, Dr. Sci. (Eng.), Academician of RAS, Prof., D.I. Mendeleyev Russian Chemical-Technological University, Moscow

Radik R. Mulyukov, Dr. Sci. (Phys.-Chem.), Prof., Corresponding Member of RAS, Institute of Metals Superplasticity Problems of RAS, Ufa

Leonid P. Myshlyayev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Siberian State Industrial University, Novokuznetsk

Sergei A. Nikulin, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Corresponding Member of RAS, NUST "MISIS", Moscow

Asylbek Kh. Nurumgaliev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Karaganda State Industrial University, Karaganda, Republic of Kazakhstan

Oleg I. Ostrovski, Dr. Sci. (Eng.), Prof., University of New South Wales, Sidney, Australia

Loris Pietrelli, Dr., Scientist, Italian National Agency for New Technologies, Energy and Sustainable Economic Development, Rome, Italy

Gennadii S. Podgorodetskii, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof., NUST "MISIS", Moscow

Igor' Yu. Pyshmintsev, Dr. Sci. (Eng.), Russian Research Institute of the Pipe Industry, Chelyabinsk

Andrei I. Rudskoi, Academician of RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Rector, Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg

Oleg Yu. Sheshukov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Ural Federal University, Yekaterinburg

Laura M. Simonyan, Dr. Sci. (Eng.), Prof., NUST "MISIS", Moscow

Robert F. Singer, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Friedrich-Alexander University, Germany

Boris A. Sivak, Cand. Sci. (Eng.), Prof., VNIIMETMASH Holding Company, Moscow

Leonid A. Smirnov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Academician of RAS, OJSC "Ural Institute of Metals", Yekaterinburg

Sergei V. Solodov, Cand. Sci. (Eng.), NUST "MISIS", Moscow

Speidel Marcus, Dr. Natur. Sci., Prof., Swiss Academy of Materials, Switzerland

Nikolai A. Spirin, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Ural Federal University, Yekaterinburg

Tang Guoi, Institute of Advanced Materials of Tsinghua University, Shenzhen, China

Mikhail V. Temlyantsev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Siberian State Industrial University, Novokuznetsk

Ekaterina P. Volynkina, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Siberian State Industrial University, Novokuznetsk

Aleksei B. Yur'ev, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Siberian State Industrial University, Novokuznetsk

Vladimir S. Yusupov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of RAS, Moscow

Vladimir I. Zhuchkov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Institute of Metallurgy, Ural Branch of RAS, Ural Federal University, Yekaterinburg

Michael Zinigrad, Dr. Sci. (Physical Chemistry), Prof., Rector, Ariel University, Israel

Vladimir I. Zolotukhin, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Tula State University, Tula

Journal "Izvestiya. Ferrous metallurgy" is included in the "List of the leading peer-reviewed scientific journals and publications, in which should be published major scientific results of dissertations for the degree of doctor and candidate of sciences" by the decision of the Higher Attestation Commission.

Indexed: Scopus, Russian Science Citation Index (Web of Science), Research Bible, OCLC and Google Scholar

Registered in Federal Service for Supervision in the Sphere of Mass Communications **PI number FS77-35456.**



Articles are available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

Памяти Юрия Сергеевича Карабасова 862

In memory of Yurii Sergeevich Karabasov 862

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

METALLURGICAL TECHNOLOGIES

Козырев Н.А., Крюков Р.Е., Усольцев А.А., Кибко Н.В., Башченко Л.П. Разработка новой порошковой проволоки на основе пыли газоочистки силикомаганца 863

Kozyrev N.A., Kryukov R.E., Usol'tsev A.A., Kibko N.V., Bashchenko L.P. Development of a new cored wire based on silica manganese gas-cleaning dust 863

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

MATERIAL SCIENCE

Осколкова Т.Н., Глезер А.М., Симачев А.С. Поверхностное упрочнение твердосплавного инструмента на основе карбида вольфрама концентрированными потоками энергии 870

Oskolkova T.N., Glezer A.M., Simachev A.S. Surface hardening of carbide tools based on tungsten carbide by concentrated energy flows 870

Малущин Н.Н., Романов Д.А. Физическая природа упрочнения теплостойкого металла высокой твердости, сформированного плазмой в среде азота 877

Malushin N.N., Romanov D.A. Physical nature of hardening of heat-resistant metal of high hardness formed by plasma in nitrogen medium 877

Юрьев А.А., Кормышев В.Е., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Шлярова Ю.А. Физическая природа упрочнения поверхности рельсов при длительной эксплуатации 886

Yur'ev A.A., Kormyshev V.E., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Shlyarova Yu.A. Physical nature of rail surface hardening during long-term operation 886

ИННОВАЦИИ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ
ПРОМЫШЛЕННОМ И ЛАБОРАТОРНОМ
ОБОРУДОВАНИИ, ТЕХНОЛОГИЯХ
И МАТЕРИАЛАХ

INNOVATIONS IN METALLURGICAL
INDUSTRIAL AND LABORATORY
EQUIPMENT, TECHNOLOGIES
AND MATERIALS

Чиченев Н.А., Горбатьюк С.М., Горовая Т.Ю., Fortunatov А.Н. Снижение внеплановых простоев оборудования при проведении ремонтов и модернизации на основе прочностного анализа 895

Chichenev N.A., Gorbatyuk S.M., Gorovaya T.Yu., Fortunatov A.N. Reduction of equipment unplanned downtime during repairs and modernization based on strength analysis 895

Колмогоров Г.Л., Мельникова Т.Е. Гидродинамический эффект технологической смазки и формирование режимов трения при листовой прокатке 903

Kolmogorov G.L., Mel'nikova T.E. Hydrodynamic effect of technological lubrication and friction modes formation at sheet rolling 903

Никитин А.Г., Епифанцев Ю.А., Медведева К.С. Математическая модель определения количества упоров, расположенных на валке одновалковой дробильной машины 909

Nikitin A.G., Epifantsev Yu.A., Medvedeva K.S. Mathematical model for determining the number of stop blocks on the roll of a single-roll crushing machine 909

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

PHYSICO-CHEMICAL BASICS
OF METALLURGICAL PROCESSES

Протопопов Е.В., Темлянцев М.В., Якушевич Н.Ф., Солоненко В.В., Сафонов С.О. Исследование особенностей дожигания отходящих газов в конвертерах при использовании двухъярусных кислородных фурм 912

Protopopov E.V., Temlyantsev M.V., Yakushevich N.F., Solonenko V.V., Safonov S.O. Features of exhaust gases afterburning in a converter when using two-tier oxygen lances for refining 912

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Сайфуллаев С.Д., Албул С.В., Кобелев О.А., Левицкий И.А., Радюк А.Г., Титлянов А.Е. Исследование в среде ANSYS влияния конструкционных параметров на тепловые процессы в воздушной фурме доменной печи	921
К 90-летию Владимира Николаевича Перетятко	930
А.М. Глезер и В.Е. Громов в списке самых цитируемых ученых мира	932
Указатель статей, помещенных в 2021 г., том 64	933

INFORMATION TECHNOLOGIES AND AUTOMATIC CONTROL IN FERROUS METALLURGY

Saifullaev S.D., Albul S.V., Kobelev O.A., Levitskii I.A., Radyuk A.G., Titlyanov A.E. Investigation of the influence of design parameters on thermal processes in a blast furnace tuyere using ANSYS software	921
To the 90 th Anniversary of Vladimir Nikolaevich Peretyat'ko	930
A.M. Glezer and V.E. Gromov in the list of the most cited scientists	932
Index of articles "Izvestiya. Ferrous Metallurgy" for 2021, vol. 64	933



ПАМЯТИ ЮРИЯ СЕРГЕЕВИЧА КАРАБАСОВА



Коллектив НИТУ «МИСиС» постигла тяжелая, непоправимая утрата – ушел из жизни Юрий Сергеевич Карабасов, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки, депутат Государственной думы Российской Федерации, лауреат премии Прези-

дента РФ в области науки и образования, ректор Московского института стали и сплавов, президент НИТУ «МИСиС».

Впечатляет масштаб личности Юрия Сергеевича Карабасова, достигшего выдающихся результатов в научной, управленческой и общественной деятельности на благо Отечества. НИТУ «МИСиС» многим обязан созидательной деятельности Юрия Сергеевича Карабасова, который благодаря своему высокому профессионализму, ярким лидерским качествам, ответственности и авторитету не только сохранил МИСиС в тяжелые 90-е годы прошлого столетия, удерживая высокое качество подготовки специалистов ведущего металлургического института страны, но и придал своей alma mater тот импульс развития, который до сих пор во многом определяет деятельность всего коллектива НИТУ «МИСиС».

Память о Юрии Сергеевиче – талантливом руководителе, выдающемся ученом, прекрасном человеке и мудром Учителе навсегда останется в наших сердцах.

Выражаем глубокие соболезнования родным и близким Юрия Сергеевича Карабасова.

Ректор НИТУ «МИСиС» А.А. Черникова



Оригинальная статья

УДК 621.762.04:624.567.1:669

DOI 10.17073/0368-0797-2021-12-863-869



РАЗРАБОТКА НОВОЙ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКИ НА ОСНОВЕ ПЫЛИ ГАЗООЧИСТКИ СИЛИКОМАРГАНЦА

Н. А. Козырев, Р. Е. Крюков, А. А. Усольцев,
Н. В. Кибко, Л. П. Бащенко

Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. Изучена возможность применения порошковой проволоки для износостойкой наплавки, содержащей отходы (пыли газоочистки) производств силикомарганца и алюминия. Наплавку осуществляли с помощью сварочного трактора под флюсом, изготовленным из шлака силикомарганца производства Западно-Сибирского электрометаллургического завода. Скорость износа на образцах определяли на машине 2070 СМТ-1. Метод определения скорости износа основан на изменении массы образца при испытании диск – колодка. Химический состав наплавленного металла определяли рентгенофлуоресцентным методом на спектрометре XRF-1800 и атомно-эмиссионным методом на спектрометре ДФС-71. Твердость наплавленных слоев измеряли с помощью твердомера МЕТ-ДУ. Оценку количества неметаллических включений проводили по ГОСТ 1778 – 70 с помощью оптического микроскопа OLYMPUS GX-51. В работе показана возможность применения для износостойкой наплавки порошковой проволоки, содержащей техногенные отходы производства силикомарганца и алюминия. Определен коэффициент усвоения марганца при различных соотношениях компонентов. Коэффициент усвоения марганца связан с восстановлением оксида марганца из марганецсодержащего флюса (за счет содержащегося в порошковой проволоке углерода). При значительном избытке углерода в порошковой проволоке из марганецсодержащего флюса усвоение марганца превышает 100 %. Процесс усвоения марганца определяется коэффициентом заполнения порошковой проволоки, количеством углеродсодержащего материала, находящегося в составе шихты, и содержанием углерода в самом электродуговом покрытии. В наплавленном металле присутствуют силикаты недеформирующиеся и оксиды точечные. Загрязненность оксидными неметаллическими включениями наплавленного металла небольшая. Присутствие данных неметаллических включений не оказывает существенного влияния на эксплуатационные характеристики наплавленного слоя.

Ключевые слова: порошковая проволока, наплавка, образцы, неметаллические включения, микроструктура, твердость, скорость истирания

Для цитирования: Козырев Н.А., Крюков Р.Е., Усольцев А.А., Кибко Н.В., Бащенко Л.П. Разработка новой порошковой проволоки на основе пыли газоочистки силикомарганца // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 12. С. 863–869.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-12-863-869>

Original article

DEVELOPMENT OF A NEW CORED WIRE BASED ON SILICA MANGANESE GAS-CLEANING DUST

N. A. Kozyrev, R. E. Kryukov, A. A. Usol'tsev,
N. V. Kibko, L. P. Bashchenko

Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654007, Russian Federation)

Abstract. The paper describes the possibility of using cored wire for wear-resistant hardfacing containing waste (dust of gas-cleaners) from the production of silica manganese and aluminum. Hardfacing was carried out using a submerged welding tractor made of silica manganese slag produced by the West Siberian Electrometallurgical Plant. The wear rate on the samples was determined on 2070 CMT-1 machine. The method for it is based on change in the sample mass during the disc – pad test. Chemical composition of the deposited metal was determined by X-ray fluorescence method on XRF-1800 spectrometer and by the atomic emission method on DFS-71 spectrometer. The hardness of the deposited layers was measured using METH-DO hardness tester. Evaluation of the quantity of nonmetallic inclusions was made according to GOST 1778 – 70 using an OLYMPUS GX-51 optical microscope. The coefficient of manganese recovery was found at different ratios of components. This coefficient is associated with the reduction of manganese oxide from manganese-containing flux (due to the carbon contained in the cored wire). With a significant excess of carbon in the cored wire from manganese-containing flux, recovery of manganese exceeds 100 %. The process of manganese recovery was determined by filling coefficient of the cored wire, amount of the carbon-containing material in the charge, and carbon content in the electric-arc coating itself. The deposited metal contains non-deformable silicates and point oxides. Contamination by oxide nonmetallic inclusions of the deposited metal is small. The presence of these non-metallic inclusions does not significantly affect the operational characteristics of the deposited layer.

Keywords: cored wire, hardfacing, samples, nonmetallic inclusions, microstructure, hardness, abrasion rate

For citation: Kozyrev N.A., Kryukov R.E., Usol'tsev A.A., Kibko N.V., Bashchenko L.P. Development of a new cored wire based on silica manganese gas-cleaning dust. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 12, pp. 863–869. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-12-863-869>

ВВЕДЕНИЕ

В Российской Федерации и за рубежом большое внимание уделяется вопросам разработки новых материалов. Одним из направлений является разработка порошковых проволок для наплавки [1 – 4]. Представляют интерес [5 – 8] экономно легированные технологичные наплавочные материалы, которые обеспечивают получение в наплавленном металле структуры низкоуглеродистого мартенсита (наблюдается эффект самозакалки при охлаждении). При применении таких экономичных наплавочных материалов в наплавленном металле формируется бейнитно-аустенитная структура. Такая структура обладает более высокой износостойкостью, чем получаемая при наплавке широко применяемой порошковой проволоки ПП-Нп-18Х1Г1М, содержащей дорогостоящий молибден [9 – 12].

Проволоки на основе марганца и марганецсодержащих компонентов играют важную роль для износостойкости наплавки. Особенностью низкоуглеродистого марганцевого наплавленного металла мартенситного класса является увеличение абразивной износостойкости, несмотря на снижение твердости [13 – 16].

Одним из перспективных направлений в создании технологий формирования износостойких покрытий и наплавов электродуговым способом является применение порошковых проволок, содержащих в качестве флюсов техногенные отходы металлургических производств. Однако развитие рассматриваемого направления сдерживается из-за отсутствия данных о зависимостях и закономерностях влияния различных факторов на структуру и свойства покрытий. Именно поэтому исследования, в которых в качестве составляющих проволок используют отходы метал-

лургического производства [17 – 20], представляют особый интерес.

Целью настоящей работы являлась разработка новой порошковой проволоки на основе пыли газоочистки производства силикомарганца. Для этого изучали возможности применения для износостойкой наплавки порошковых проволок, содержащих пыль газоочисток производств силикомарганца (в качестве восстанавливаемого компонента – оксида марганца) и алюминия (в качестве восстановителя).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изготовление порошковой проволоки осуществляли на лабораторном станке, на котором производилось сворачивание ленты путем волочения через фильеру и намотка полученной порошковой проволоки на барабан. При переустановке фильер различных диаметров возможно уменьшение диаметра получаемой проволоки. От обычного волочильного барабана станок отличается измененной конструкцией захвата конца проволоки, малой скоростью волочения, наличием устройства для подачи смеси на ленту перед волокой и специальным приспособлением для смазки наружной поверхности ленты. Оболочка порошковой проволоки изготовлена из ленты мягкой малоуглеродистой стали марки Ст3 холодного проката (ширина ленты 20 мм, толщина 0,5 мм), диаметр проволоки 6 мм. Степень заполнения проволоки составляет (по объему): 68 – 70 % порошок, 30 – 32 % металлическая лента. В качестве наполнителя использовалась пыль газоочисток производства алюминия и силикомарганца. Химический состав пыли производства алюминия следующий, % (по массе): 21,00 – 46,23 Al_2O_3 ; 18 – 27 F; 8 – 15 % Na_2O ;

Т а б л и ц а 1

Параметры порошковых проволок

Table 1. Parameters of cored wires

Образец	Количество пыли газоочистки производства силикомарганца		Количество пыли газоочистки производства алюминия		Общая масса, г	Масса оболочки, г	Масса порошка, г	Коэффициент заполнения, %	Усвоение марганца, %
	г	%	г	%					
1	100	89,89	11,25	10,11	19,759	18,333	1,426	7,217	73
2	100	81,63	22,50	18,37	17,816	16,523	1,293	7,258	82
3	100	74,77	33,75	25,23	18,975	17,735	1,240	6,535	88
4	100	68,96	45,00	31,04	19,510	18,501	1,009	5,172	126
5	100	59,70	67,50	40,30	19,089	17,983	1,106	5,794	124
6	100	50,00	100,00	50,00	19,428	18,082	1,346	6,928	124

0,4 – 6,0 % K_2O ; 0,7 – 2,3 CaO ; 0,50 – 2,48 Si_2O_5 ; 2,10 – 3,27 Fe_2O_3 ; 12,5 – 30,2 $C_{общ}$; 0,07 – 0,90 MnO ; 0,06 – 0,90 MgO ; 0,09 – 0,19 S ; 0,10 – 0,18 P . Пыль газоочистки производства силикомарганца содержала, % (по массе): 2,43 Al_2O_3 ; 1,32 Na_2O ; 5,56 K_2O ; 6,4 CaO ; 29,19 SiO_2 ; 0,137 BaO ; 7,54 MgO ; 0,23 S ; 0,04 P ; 1,067 Fe ; 27,69 Mn ; 2,687 Zn ; 3,833 Pb . В табл. 1 приведены компонентные составы исследуемых проволок и полученные коэффициенты заполнения и усвоения марганца (используется погонная масса материалов, длина образца 0,25 м).

Наплавка проводилась с помощью сварочного трактора ASAW – 1250 на стальные пластины толщиной 14 – 16 мм размером 10×500 мм. Наплавку осуществляли под флюсом, изготовленным из шлака силикомарганца производства Западно-Сибирского электрометаллургического завода. Состав шлака следующий, % (по массе): 6,91 – 9,62 Al_2O_3 ; 22,85 – 31,70 CaO ; 46,46 – 48,16 SiO_2 ; 0,27 – 0,81 FeO ; 6,48 – 7,92 MgO ; 8,01 – 8,43 MnO ; 0,28 – 0,76 F ; 0,26 – 0,36 Na_2O ; 0,6 – 2,0 K_2O ; 0,15 – 0,17 S ; 0,01 P . Режим наплавки: сила тока 520 А; напряжение 28 В; скорость сварки 18 м/ч. Химический состав электродугового покрытия определяли рентгенофлуоресцентным методом на спектрометре XRF-

1800 и атомно-эмиссионным методом на спектрометре ДФС-71 (табл. 2). Твердость электродуговых покрытий измеряли с помощью твердомера МЕТ-ДУ [17, 18].

Для определения скорости износа использовался метод, основанный на изменении массы образца при испытании диск – колодка [17, 18]. Скорость износа образцов определяли на машине 2070 СМТ-1. Испытания на скорость износа проводились при нагрузке 78,4 Н и частоте 20 об/мин. Частоту вращения измеряли тахогенератором, установленным на валу двигателя. Количество оборотов вращения определяли бесконтактным способом. Образец при испытаниях взаимодействует с колодкой, которая изготовлена из стали марки Р18.

Неметаллические включения оценивались согласно ГОСТ 1778 – 70. С помощью оптического микроскопа OLYMPUS GX-51 были изучены микрошлифы без травления [17, 18].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящей работе рассмотрена возможность применения для износостойкой наплавки порошковых проволок, содержащих пыль газоочисток производств алюминия (в качестве восстановителя) и силикомарган-

Т а б л и ц а 2

Химический состав слоя наплавленного металла

Table 2. Chemical composition of the deposited metal layer

Образец	Содержание, % (по массе)												
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Ti	V	Mo	Al	Nb	S	P
1	0,08	0,38	1,31	0,03	0,08	0,11	0,001	0,003	0,02	0,001	0,006	0,079	0,017
2	0,08	0,57	1,35	0,05	0,06	0,19	–	0,004	–	0,052	0,012	0,074	0,014
3	0,08	0,40	1,19	0,04	0,07	0,01	–	–	–	0,011	0,009	0,063	0,015
4	0,09	0,49	1,25	0,03	0,08	0,09	0,001	0,003	0,01	0,011	0,006	0,076	0,017
5	0,16	0,46	1,19	0,02	0,07	0,07	0,001	0,003	0,01	0,011	0,006	0,073	0,016
6	0,22	0,50	1,19	0,03	0,07	0,07	0,001	0,003	0,01	0,006	0,006	0,083	0,014

Т а б л и ц а 3

Химический состав шлаковых корок

Table 3. Chemical composition of slag crusts

Образец	Содержание, % (по массе)													
	FeO	MnO	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	S	P	ZnO	Cr ₂ O ₂	F	TiO ₂
1	1,80	8,37	29,95	43,65	7,27	5,30	0,39	0,16	0,17	0,010	0,040	0,048	0,63	0,07
2	2,25	8,16	30,05	44,45	7,70	5,47	0,39	0,13	0,14	0,012	0,038	0,059	0,62	0,06
3	1,77	8,13	30,17	43,84	7,51	5,17	0,37	0,07	0,17	0,011	0,014	0,050	0,62	0,08
4	2,75	7,52	31,62	43,12	7,56	5,33	0,30	0,09	0,15	0,011	0,012	0,053	0,47	0,08
5	2,11	7,93	30,57	42,95	8,41	5,58	0,46	0,08	0,18	0,011	0,016	0,043	0,77	0,07
6	2,11	7,75	30,30	42,47	8,47	5,42	0,46	0,05	0,17	0,011	0,011	0,036	0,83	0,07

Таблица 4

Твердость НВ и износ образцов

Table 4. HB hardness and wear of the samples

Образец	Начальная масса, г	Масса после истирания, г	Количество бортов	Потеря массы образца, г	Износ, г/об.	НВ
1	82,587	82,139	3070	0,448	0,000146	126
2	92,395	91,960	3300	0,435	0,000132	136
3	89,288	88,780	4990	0,508	0,000102	132
4	84,935	84,495	3500	0,440	0,000126	133
5	113,299	112,974	3410	0,325	0,000095	143
6	115,758	115,338	3300	0,420	0,000127	167

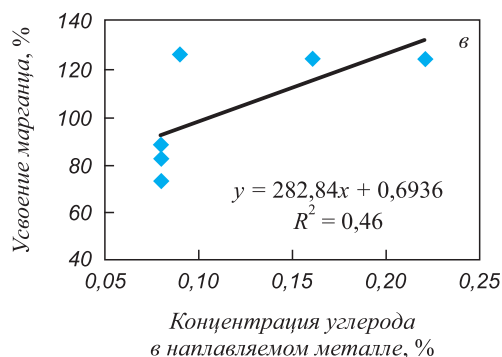
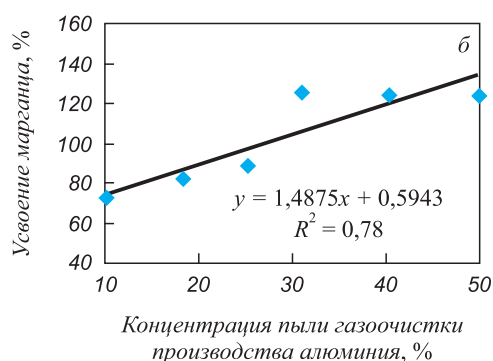
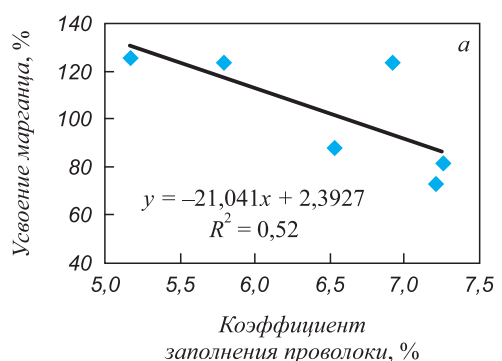


Рис. 1. Зависимость усвоения марганца от коэффициента заполнения порошковой проволоки (а), от концентрации пыли газоочистки производства алюминия (б) и от концентрации углерода в наплавляемом металле (в)

Fig. 1. Dependence of manganese recovery on the cored wire filling coefficient (a), on the concentration of dust from the gas-cleaning of aluminum production (b) and on carbon concentration in the deposited metal (v)

ца (в качестве восстанавливаемого компонента – оксида марганца).

В табл. 2, 3 приведены химический состав электродугового покрытия и состав шлаковых корок. Твердость и результаты испытания на скорость износа представлены в табл. 4.

Коэффициент усвоения марганца определяли как отношение содержания марганца в наплавленном металле к общему количеству введенного марганца. Этот коэффициент связан с восстановлением оксида марганца из марганецсодержащего флюса (за счет содержащегося в порошковой проволоке углерода). При значительном избытке углерода в порошковой проволоке из марганецсодержащего флюса усвоение марганца превышает 100 % (табл. 1). Процесс усвоения марганца определяется коэффициентом заполнения порошковой проволоки, количеством углеродсодержащего материала, находящегося в составе шихты, и содержанием углерода в самом электродуговом покрытии и содержанием марганца во флюсе (рис. 1). В качестве углеродсодержащего материала использовалась пыль газоочистки производства алюминия [17 – 20].

Таблица 5

Оценка неметаллических включений в зоне сварных швов

Table 5. Evaluation of non-metallic inclusions in the weld area

Образец	Неметаллические включения, балл	
	Силикаты недеформирующиеся	Оксиды точечные
1	16,26	1a, 2a, 3a
2	16	1a, 2a, 3a
3	26, редко 46	1a, 2a
4	26, 16	1a
5	26, 16	1a
6	16, редко 46	1a

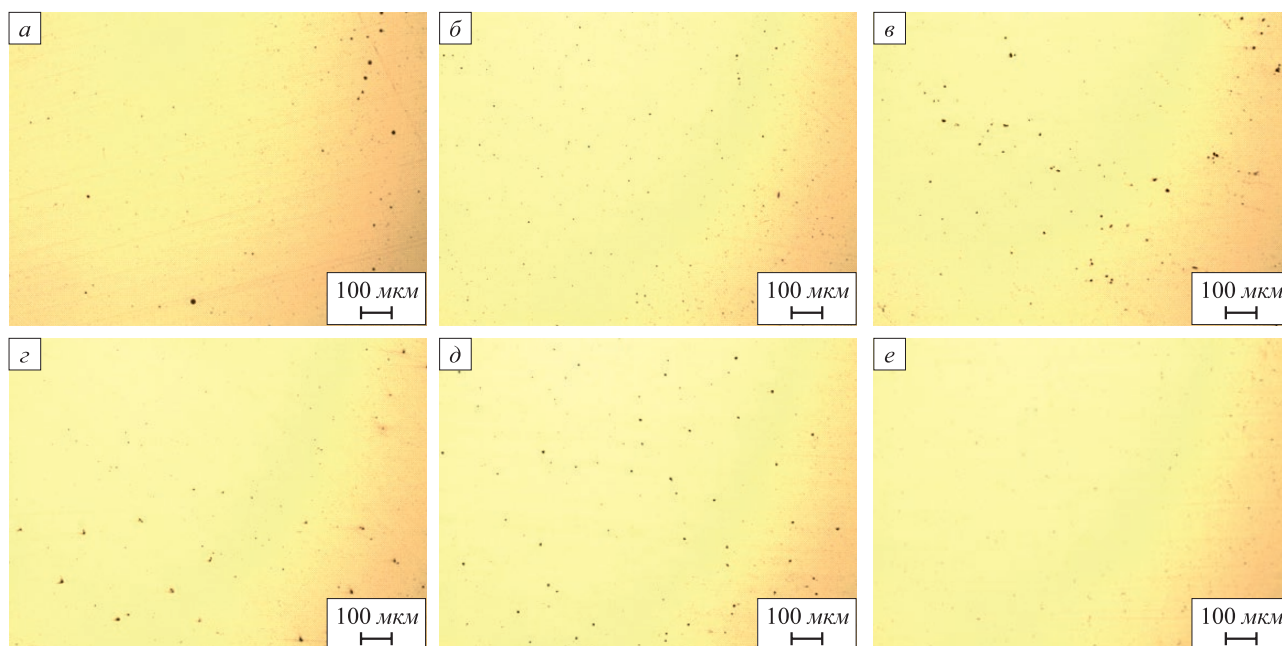


Рис. 2. Неметаллические включения в зоне наплавленных образцов 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г), 5 (д), 6 (е)

Fig. 2. Nonmetallic inclusions in the zone of deposited samples 1 (a), 2 (b), 3 (v), 4 (z), 5 (d), 6 (e)

Количество неметаллических включений в электродуговом покрытии определяли по ГОСТ 1778 – 70. Результаты оценки неметаллических включений представлены в табл. 5. На рис. 2 приведены неметаллические включения в электродуговом покрытии: присутствуют силикаты недеформирующиеся и оксиды точечные. Загрязненность оксидными неметаллическими включениями электродугового покрытия незначительная. Присутствие этих неметаллических включений не оказывает существенного влияния на эксплуатационные характеристики наплавленного слоя [16 – 20].

Для обработки результатов исследований были использованы методы статистической обработки экспериментальных данных, с помощью которых были построены зависимости влияния химического состава на свойства наплавленного слоя.

Выводы

Подтверждена возможность применения для износостойкой наплавки порошковых проволок, содержа-

щих пыль газоочисток производств алюминия (в качестве восстановителя) и силикомарганца (в качестве восстанавливаемого компонента – оксида марганца). Установлены параметры и режимы износостойкой наплавки. Определено усвоение марганца при различных соотношениях компонентов. В наплавленном металле выявлены силикаты недеформирующиеся и оксиды точечные. Загрязненность оксидными неметаллическими включениями наплавленного металла небольшая. Присутствие неметаллических включений не оказывает существенного влияния на эксплуатационные характеристики наплавленного слоя. Применение предлагаемой порошковой проволоки для износостойкой наплавки под слоем флюсом из шлака силикомарганца позволяет частично утилизировать техногенные отходы металлургического производства и уменьшить стоимость сварочных и наплавочных материалов, обеспечивая при этом хорошие эксплуатационные характеристики наплавленного слоя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Metlitskii V.A. Flux-cored wires for arc welding and surfacing of cast iron // *Welding International*. 2008. Vol. 22. No. 11. P. 796–800. <https://doi.org/10.1080/09507110802593646>
2. Filippov M.A., Shumyakov V.I., Balin S.A., Zhilin A.S., Lehchilo V.V., Rimer G.A. Structure and wear resistance of deposited alloys based on metastable chromium-carbon austenite // *Welding International*. 2015. Vol. 29. No. 10. P. 819–822. <https://doi.org/10.1080/09507116.2014.986891>
3. Liu D.S., Liu R.P., Wei Y.H. Influence of tungsten on microstructure and wear resistance of iron base hardfacing alloy // *Materials Science*
1. Metlitskii V.A. Flux-cored wires for arc welding and surfacing of cast iron. *Welding International*. 2008, vol. 22, no. 11, pp. 796–800. <https://doi.org/10.1080/09507110802593646>
2. Filippov M.A., Shumyakov V.I., Balin S.A., Zhilin A.S., Lehchilo V.V., Rimer G.A. Structure and wear resistance of deposited alloys based on metastable chromium-carbon austenite. *Welding International*. 2015, vol. 29, no. 10, pp. 819–822. <https://doi.org/10.1080/09507116.2014.986891>
3. Liu D.S., Liu R.P., Wei Y.H. Influence of tungsten on microstructure and wear resistance of iron base hardfacing alloy. *Materials Science*

- ce and Technology. 2013. Vol. 30. No. 3. P. 316–322.
<https://doi.org/10.1179/1743284713Y.0000000359>
4. Kejžar R., Grum J. Hardfacing of wear-resistant deposits by MAG welding with a flux-cored wire having graphite in its filling // *Materials and Manufacturing Processes*. 2005. Vol. 20. No. 6. P. 961–976.
5. Li R., He D.Y., Zhou Z., Wang Z.J., Song X.Y. Wear and high temperature oxidation behavior of wire arc sprayed iron based coatings // *Surface Engineering*. 2014. Vol. 30. P. 784–790.
<https://doi.org/10.1179/1743294414Y.0000000331>
6. Ma H.R., Chen X.Y., Li J.W., Chang C.T., Wang G., Li H., Wang X.M., Li R.W. Fe-based amorphous coating with high corrosion and wear resistance // *Surface Engineering*. 2017. Vol. 33. No. 1. P. 56–62. <https://doi.org/10.1080/02670844.2016.1176718>
7. Lim S.C., Gupta M., Goh Y.S., Seow K.C. Wear resistant WC–Co composite hard coatings // *Surface Engineering*. 1997. Vol. 13. No. 3. P. 247–250. <https://doi.org/10.1179/sur.1997.13.3.247>
8. Zhuk Yu. Super-hard wear-resistant coating systems // *Materials Technology*. 1999. Vol. 14. No. 3. P. 126–129.
<https://doi.org/10.1080/10667857.1999.11752827>
9. Hardell J., Yousfi A., Lund M., Pelcastre L., Prakash B. Abrasive wear behaviour of hardened high strength boron steel // *Tribology – Materials, Surfaces & Interfaces*. 2014. Vol. 8. No. 2. P. 90–97.
<https://doi.org/10.1179/1751584X14Y.0000000068>
10. Deng X.T., Fu T.L., Wang Z.D., Misra R.D.K., Wang G.D. Epsilon carbide precipitation and wear behaviour of low alloy wear resistant steels // *Materials Science and Technology*. 2016. Vol. 32. No. 4. P. 320–327. <https://doi.org/10.1080/02670836.2015.1137410>
11. Kirchgaßner M., Badisch E., Franek F. Behaviour of iron-based hardfacing alloys under abrasion and impact // *Wear*. 2008. Vol. 265. No. 5–6. P. 772–779. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.01.004>
12. Пацекин В.П., Рахимов К.З. Производство порошковой проволоки. М.: Металлургия, 1979. 80 с.
13. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Под ред. Б.Е. Патона. М.: Металлургия, 1974. 768 с.
14. Геллер Ю.А. Инструментальные стали. М.: Металлургия, 1975. 584 с.
15. Тепляшин М.В., Комков В.Г. Исследование влияния легирующих элементов на износостойкость в сплавах, предназначенных для электрошлаковой наплавки бил молотковых мельниц // *Ученые заметки ТОГУ*. 2013. Т. 4. № 4. С. 1554–1561.
16. Тепляшин М.В., Комков В.Г., Старенко В.А. Разработка экономнолегированного сплава для восстановления бил молотковых мельниц // *Ученые заметки ТОГУ*. 2013. Т. 4. № 4. С. 1543–1549.
17. Козырев Н.А., Крюков Р.Е., Кибко Н.В., Непомнящих А.С. Разработка новой износостойкой порошковой проволоки для наплавки брони ковшей горнодобывающего оборудования // *Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов*. 2018. № 4. С. 288–292.
18. Козырев Н.А., Усольцев А.А., Прудников А.Н., Крюков Р.Е. Изучение свойств порошковой проволоки на основе пыли газочистки феррохрома // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2019. Т. 75. № 3. С. 365–373. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2019-3-365-372>
19. Козырев Н.А., Крюков Р.Е., Усольцев А.А., Уманский А.А., Соколов П.Д. Разработка новых порошковых проволок для наплавки. Порошковые проволоки с использованием углерод-фторсодержащих материалов для ремонта прокатных валков // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2018. № 1. С. 77–86.
20. Osetkovsky I.V., Kozyrev N.A., Kryukov R.E., Usoltsev A.A., Gusev A.I. Development of a wear-resistant flux cored wire of Fe–C–Si–Mn–Cr–Ni–Mo–V system for deposit welding of mining equipment parts. In: *Int. Sci. and Research Conf. on Knowledge-based Technologies in Development and Utilization of Mineral Resources (KTDMUR2017)*, 6–9 June 2017, Novokuznetsk, Russian Federation. 2017. Vol. 84. Article 012017.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/84/1/012017>
- and Technology. 2013, vol. 30, no. 30, pp. 316–322.
<https://doi.org/10.1179/1743284713Y.0000000359>
4. Kejžar R., Grum J. Hardfacing of wear-resistant deposits by MAG welding with a flux-cored wire having graphite in its filling. *Materials and Manufacturing Processes*. 2005, vol. 20, no. 6, pp. 961–976.
5. Li R., He D.Y., Zhou Z., Wang Z.J., Song X.Y. Wear and high temperature oxidation behavior of wire arc sprayed iron based coatings. *Surface Engineering*. 2014, vol. 30, no. 11, pp. 784–790.
<https://doi.org/10.1179/1743294414Y.0000000331>
6. Ma H.R., Chen X.Y., Li J.W., Chang C.T., Wang G., Li H., Wang X.M., Li R.W. Fe-based amorphous coating with high corrosion and wear resistance. *Surface Engineering*. 2017, vol. 33, no. 1, pp. 56–62. <https://doi.org/10.1080/02670844.2016.1176718>
7. Lim S.C., Gupta M., Goh Y.S., Seow K.C. Wear resistant WC–Co composite hard coatings. *Surface Engineering*. 1997, vol. 13, no. 3, pp. 247–250. <https://doi.org/10.1179/sur.1997.13.3.247>
8. Zhuk Yu. Super-hard wear-resistant coating systems. *Materials Technology*. 1999, vol. 14, no. 3, pp. 126–129.
<https://doi.org/10.1080/10667857.1999.11752827>
9. Hardell J., Yousfi A., Lund M., Pelcastre L., Prakash B. Abrasive wear behaviour of hardened high strength boron steel. *Tribology – Materials, Surfaces & Interfaces*. 2014, vol. 8, no. 2, pp. 90–97.
<https://doi.org/10.1179/1751584X14Y.0000000068>
10. Deng X.T., Fu T.L., Wang Z.D., Misra R.D.K., Wang G.D. Epsilon carbide precipitation and wear behaviour of low alloy wear resistant steels. *Materials Science and Technology*. 2016, vol. 32, no. 4, pp. 320–327. <https://doi.org/10.1080/02670836.2015.1137410>
11. Kirchgaßner M., Badisch E., Franek F. Behaviour of iron-based hardfacing alloys under abrasion and impact. *Wear*. 2008, vol. 265, no. 5–6, pp. 772–779. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.01.004>
12. Patsek V.P., Rakhimov K.Z. *Production of Cored Wire*. Moscow: Metallurgiya, 1979, 80 p. (In Russ.).
13. *Technology of Electrical Welding of Metals and Alloys by Melting*. Paton B.E. ed. Moscow: Metallurgiya, 1974, 768 p. (In Russ.).
14. Geller Yu.A. *Tool Steel*. Moscow: Metallurgiya, 1975, 584 p. (In Russ.).
15. Teplyashin M.V., Komkov V.G. Effect of alloying elements on wear resistance in alloys for electric slag hardfacing of hammer mills. *Uchenye zametki TOGU*. 2013, vol. 4, no. 4, pp. 1554–1561. (In Russ.).
16. Teplyashin M.V., Komkov V.G., Starienko V.A. Development of a sparingly doped alloy for restoration of hammer mill bits. *Uchenye zametki TOGU*. 2013, vol. 4, no. 4, pp. 1543–1549. (In Russ.).
17. Kozyrev N.A., Kryukov R.E., Kibko N.V., Nepomnyashchikh A.S. Development of a new wear-resistant cored wire for hardfacing of armor buckets for mining equipment. *Naukoemkie tekhnologii razrabotki i ispol'zovaniya mineral'nykh resursov*. 2018, no. 4, pp. 288–292. (In Russ.).
18. Kozyrev N.A., Usol'tsev A.A., Prudnikov A.N., Kryukov R.E. Study of properties of cored wire based on ferrochrome gas-cleaning dust. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2019, vol. 75, no. 3, pp. 365–373. (In Russ.).
<https://doi.org/10.32339/0135-5910-2019-3-365-372>
19. Kozyrev N.A., Kryukov R.E., Usol'tsev A.A., Umanskii A.A., Sokolov P.D. The development of the new cored wires for surfacing. The new cored wires with the use of the carbon and fluorine containing materials for the repair of the mill. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2018, no. 1, pp. 77–86. (In Russ.).
20. Osetkovsky I.V., Kozyrev N.A., Kryukov R.E., Usoltsev A.A., Gusev A.I. Development of a wear-resistant flux cored wire of Fe–C–Si–Mn–Cr–Ni–Mo–V system for deposit welding of mining equipment parts. In: *Int. Sci. and Research Conf. on Knowledge-based Technologies in Development and Utilization of Mineral Resources (KTDMUR2017)*, 6–9 June 2017, Novokuznetsk, Russian Federation. 2017, vol. 84, article 012017.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/84/1/012017>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Николай Анатольевич Козырев, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой материаловедения, литейного и сварочного производства, Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0002-7391-6816

E-mail: kozyrev_na@mtsp.sibsiu.ru

Роман Евгеньевич Крюков, к.т.н., доцент кафедры материаловедения, литейного и сварочного производства, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: rek_nzrmk@mail.ru

Александр Александрович Усольцев, к.т.н., доцент кафедры материаловедения, литейного и сварочного производства, Сибирский государственный индустриальный университет

ORCID: 0000-0001-6220-7910

E-mail: a.us@rambler.ru

Наталья Валерьевна Кибко, к.т.н., доцент кафедры материаловедения, литейного и сварочного производства, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: krivicheva_nv@mail.ru

Людмила Петровна Бащенко, к.т.н., доцент кафедры теплоэнергетики и экологии, Сибирский государственный индустриальный университет

ORCID: 0000-0003-1878-909X

E-mail: luda.baschenko@gmail.com

Nikolai A. Kozyrev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Chair "Materials, Foundry and Welding Production", Siberian State Industrial University
ORCID: 0000-0002-7391-6816

E-mail: kozyrev_na@mtsp.sibsiu.ru

Roman E. Kryukov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair "Materials, Foundry and Welding Production", Siberian State Industrial University

E-mail: rek_nzrmk@mail.ru

Aleksandr A. Usol'tsev, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair "Materials, Foundry and Welding Production", Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0001-6220-7910

E-mail: a.us@rambler.ru

Natal'ya V. Kibko, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair "Materials, Foundry and Welding Production", Siberian State Industrial University

E-mail: krivicheva_nv@mail.ru

Lyudmila P. Bashchenko, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair "Thermal Power and Ecology", Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0003-1878-909X

E-mail: luda.baschenko@gmail.com

ВКЛАД АВТОРОВ

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Козырев Н.А. – формирование основной идеи исследований, разработка методологии работы, анализ результатов исследований.

Крюков Р.Е. – организация испытаний образцов, сбор данных исследований, анализ результатов исследований.

Усольцев А.А. – разработка плана исследований, постановка задач, анализ результатов исследований.

Кибко Н.В. – исследование образцов на электронном микроскопе, анализ результатов исследований.

Бащенко Л.П. – выполнение металлографических исследований, анализ результатов исследований, подготовка материалов для статьи.

Kozyrev N.A. – formation of the research main idea, development of the methodology, analysis of the research results.

Kryukov R.E. – organization of the sample tests, collection of the research data, analysis of the research results.

Usol'tsev A.A. – development of the research plan, tasks statement, analysis of the research results.

Kibko N.V. – samples examination with an electron microscope, analysis of the research results.

Bashchenko L.P. – performing the metallographic studies, analysis of the research results, preparing materials for the article.

Поступила в редакцию 30.06.2020

После доработки 08.07.2020

Принята к публикации 28.08.2021

Received 30.06.2020

Revised 08.07.2020

Accepted 28.08.2021



Оригинальная статья

УДК 621.793.184:621.762.8

DOI 10.17073/0368-0797-2021-12-870-876



ПОВЕРХНОСТНОЕ УПРОЧНЕНИЕ ТВЕРДОСПЛАВНОГО ИНСТРУМЕНТА НА ОСНОВЕ КАРБИДА ВОЛЬФРАМА КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ

Т. Н. Осколкова¹, А. М. Глезер^{2,3}, А. С. Симачев¹¹ Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)² Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (Россия, 119049, Москва, Ленинский пр., 4)³ Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина (Россия, 105005, Москва, ул. Радио, 23/9, стр. 2)

Аннотация. Представлены результаты проведенного с использованием концентрированных потоков энергии поверхностного упрочнения карбидовольфрамовых твердых сплавов. На твердый сплав ВК10КС способом электродной обработки наносится сплав ВК6-ОМ толщиной 20 мкм. При этом получается поверхностный упрочненный слой, состоящий из W_2C . Твердость получаемого слоя составляет 22 000 МПа, коэффициент трения 0,23 (по сравнению с коэффициентом трения исходного твердого сплава 0,41), сохраняется прочная, но недостаточно износостойкая основа. В работе способом однокомпонентного электровзрывного легирования титаном был получен поверхностный слой на твердом сплаве ВК10КС толщиной 40 мкм, фазовый состав TiC , W_2C . Нанотвердость данного слоя 25 000 МПа, коэффициент трения 0,14. На твердом сплаве ВК10КС способом многокомпонентного электровзрывного легирования титаном совместно с бором получен поверхностный слой толщиной 3 – 4 мкм фазовым составом TiB_2 , TiC , W_2C . Нанотвердость упрочненного слоя 27 500 МПа, коэффициент трения 0,10. Применяя методику отдельных катодов, на поверхность твердого сплава ВК10КС было нанесено ионно-плазменное $TiN + ZrN$ покрытие (50 % $Ti + 50$ % Zr) толщиной 20 мкм. В качестве реакционного газа использовался азот. Нанотвердость упрочненного таким способом поверхностного слоя составляет 38 500 МПа, коэффициент трения 0,07. Ионно-плазменное $TiN + ZrN$ покрытие обладает хорошей адгезией с основой. Использование предлагаемых способов поверхностного упрочнения твердого сплава ВК10КС дает возможность выбора одного из методов упрочнения исходя из условий эксплуатации твердосплавного инструмента, продлить его эксплуатационный срок; сэкономить дефицитные материалы (вольфрам и кобальт).

Ключевые слова: поверхностная обработка, сплав, микроструктура, нанотвердость, износ, коэффициент трения, трек износа, фазы

Для цитирования: Осколкова Т.Н., Глезер А.М., Симачев А.С. Поверхностное упрочнение твердосплавного инструмента на основе карбида вольфрама концентрированными потоками энергии // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 12. С. 870–876.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-12-870-876>

Original article

SURFACE HARDENING OF CARBIDE TOOLS BASED ON TUNGSTEN CARBIDE BY CONCENTRATED ENERGY FLOWS

T. N. Oskolkova¹, A. M. Glezer^{2,3}, A. S. Simachev¹¹ Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654007, Russian Federation)² National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS) (4 Leninskii Ave., Moscow 119049, Russian Federation)³ I.P. Bardin Central Research Institute for Ferrous Metallurgy (23/9, bld. 2 Radio Str., Moscow 105005, Russian Federation)

Abstract. The article presents the results of surface hardening of tungsten-carbide hard alloys carried out using concentrated energy flows. The VK6-OM alloy with a thickness of 20 μm is applied to the hard alloy VK10KS by the method of electric spark treatment. In this case, a surface hardened layer consisting of W_2C is obtained. The hardness of the resulting layer is 22,000 MPa and the friction coefficient is 0.23 (compared to the friction coefficient of the original hard alloy of 0.41); strong but insufficiently wear-resistant base is preserved. In the work, a surface layer on a hard alloy VK10KS with a thickness of 40 μm and phase composition of TiC and W_2C was obtained by the method of single-component electro-explosive alloying with titanium. The nanohardness of this layer is 25,000 MPa and the friction coefficient is 0.14. A surface layer with thickness of 3 – 4 μm and phase composition of TiB_2 , TiC , W_2C was obtained on the hard alloy VK10KS by the method of multicomponent electro-explosive alloying with titanium and boron. The nanohardness of the hardened layer is 27,500 MPa and the friction coefficient is 0.10. Applying the technique of separate cathodes, an ion-plasma $TiN + ZrN$ coating (50 % $Ti + 50$ % Zr) with a thickness of 20 μm was applied to the surface of the VK10KS hard alloy. Nitrogen was used as the reaction gas. The nanohardness of the surface layer hardened in this way is 38,500 MPa and the friction coefficient of is 0.07. Ion-plasma $TiN + ZrN$ coating has good adhesion to the substrate. The use of the proposed methods of surface hardening of VK10KS hard alloy makes it possible

to choose one of the hardening methods, based on operating conditions of the carbide tool, to extend its operational life, as well as to save scarce materials (tungsten and cobalt).

Keywords: surface treatment, alloy, microstructure, nanohardness, wear, friction coefficient, wear track, phases

For citation: Oskolkova T.N., Glezer A.M., Simachev A.S. Surface hardening of carbide tools based on tungsten carbide by concentrated energy flows. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 12, pp. 870–876. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-12-870-876>

ВВЕДЕНИЕ

Во многих производственных процессах (машиностроение, горнодобывающая, деревообрабатывающая промышленность и т.д.) применяются карбидовольфрамовые твердые сплавы. Однако эти сплавы подвержены износу и не всегда удовлетворяют требованиям по эксплуатационной стойкости.

В работах отечественных [1 – 5] и зарубежных [6 – 11] специалистов с целью создания износостойких поверхностных слоев твердых сплавов группы ВК предлагается использовать различные покрытия, применять обработку поверхности импульсным лазерным лучом, модифицировать поверхности твердых сплавов мощными ионными пучками и т.д. В настоящей работе рассматривается возможность повышения поверхностной твердости, износостойкости карбидовольфрамовых твердых сплавов с использованием концентрированных потоков энергии, что является актуальной научно-практической задачей. Новые знания позволят разобраться в процессах структурообразования при различных видах обработки и дадут возможность прогнозировать механические свойства твердых сплавов в целом.

Целью работы явилось поверхностное упрочнение карбидовольфрамовых твердых сплавов (применяемых для бурового, горно-режущего, штампового и металло-режущего инструментов) с использованием технологий поверхностного упрочнения способами электроискровой обработки, электровзрывного легирования (ЭВЛ) и ионно-плазменного напыления.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Структуры исследовали с помощью оптического микроскопа OLIMPUS-GX 50, растрового электронного микроскопа «Philips SEM 515» и просвечивающего электронного микроскопа Tescan 20 G2 TWIN.

Испытания на износостойкость проводили на установке «PC-Operated High Temperature Tribometer» при комнатной температуре. Износ образцов был оценен путем измерения глубины и площади трека, образованного в результате действия неподвижного алмазного индентора на вращающийся образец при нагрузке 3 Н, числе оборотов 4000 (при определении износостойкости ионно-плазменного покрытия число оборотов составляло 12 000), линейной скорости движения 2,5 см/с. Глубину, площадь трека износа, коэффициент трения определяли с помощью высокоточной измерительной установки «Micro Measure 3D station» с программным

обеспечением. Анализ полученных профилей осуществлен с использованием компьютерной программы Mountains Map Universal (версия 2.0.13). Результаты трибологических испытаний представлены как среднеарифметические значения, полученные от 10 испытаний по одному режиму обработки на трех образцах.

Наноиндентирование осуществляли на установке «Nano Hardness Tester».

Рентгенографические исследования проводились с помощью дифрактометра ДРОН-2,0 с железным K_{α} -излучением.

Адгезию ионно-плазменного TiN + ZrN покрытия на твердом сплаве ВК10КС изучали по методике «царапания» алмазным индентором на установке Micro Scratch Tester. На алмазный индентор действовала линейно-возрастающая нагрузка. За характеристику адгезионной прочности брали нагрузку в момент начала отслаивания покрытия, которое определяли с помощью акустического датчика и датчика глубины проникновения индентора.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Способом электроискровой обработки было проведено упрочнение поверхности твердого сплава ВК10КС. В процессе такой обработки при искровом разряде происходит эрозия электрода и перенос продуктов эрозии на деталь. В результате на поверхности детали образуется упрочненный слой с измененным химическим составом и структурой. Высокая (5000 – 10 000 °С) температура разряда, кратковременность действия (10^{-6} – 10^{-3} с), мгновенное охлаждение нагретых участков способствуют протеканию сверхскоростной закалки. Происходит капельный перенос легирующих элементов из упрочняющего электрода на обрабатываемую поверхность [12].

В качестве электрода использовали твердый сплав ВК6-ОМ, произведенный в соответствии с ГОСТ 3884 – 74. Обработку поверхности твердого сплава ВК10КС осуществляли с помощью переносной установки электроискрового легирования UR-121 производства «Инструментальный завод» ОАО «Концерн Подольск» по двойному технологическому режиму: 0,55 мин/1 см² по режиму Norma 3; 1,0 мин/1 см² по режиму Turbo.

На рис. 1, а представлена микроструктура сплава ВК10КС с упрочненным слоем из ВК6-ОМ после электроискровой обработки. Наблюдается плохо травящийся слой толщиной 20 мкм. На поверхности твердого

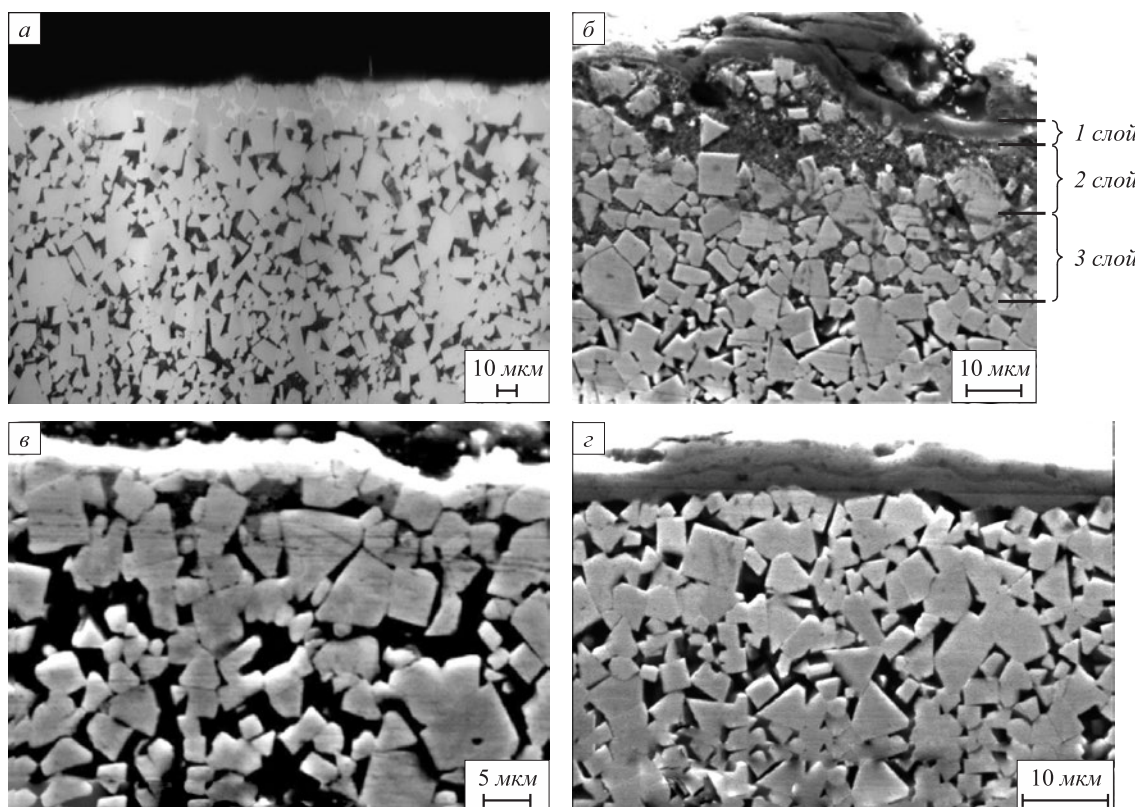


Рис. 1. Микроструктура сплава ВК10КС после различных обработок

Fig. 1. Microstructure of VK10KS alloy after various treatments

сплава после электроискровой обработки рентгенофазовыми исследованиями выявлено наличие мелкодисперсного карбида вольфрама W_2C (рис. 2) с более высокой твердостью по сравнению с твердостью карбида WC [13] (см. таблицу).

Упрочнение поверхности твердых сплавов группы ВК возможно при использовании импульсного плазменного воздействия, которым является ЭВЛ. При ЭВЛ плазменный ускоритель накапливает энергию батарей

импульсных конденсаторов до 10 кДж, а затем разряжается в течение 100 мкс через проводник, который испытывает взрывное разрушение. Источником тепла и легирующих элементов для обрабатываемой поверхности является импульсная многофазная плазменная струя, которая формируется из материала взрываемого проводника. Такой проводник закрепляется на электродах плазменного ускорителя [14]. В работе в качестве взрываемого проводника применяли титан (в виде фольги

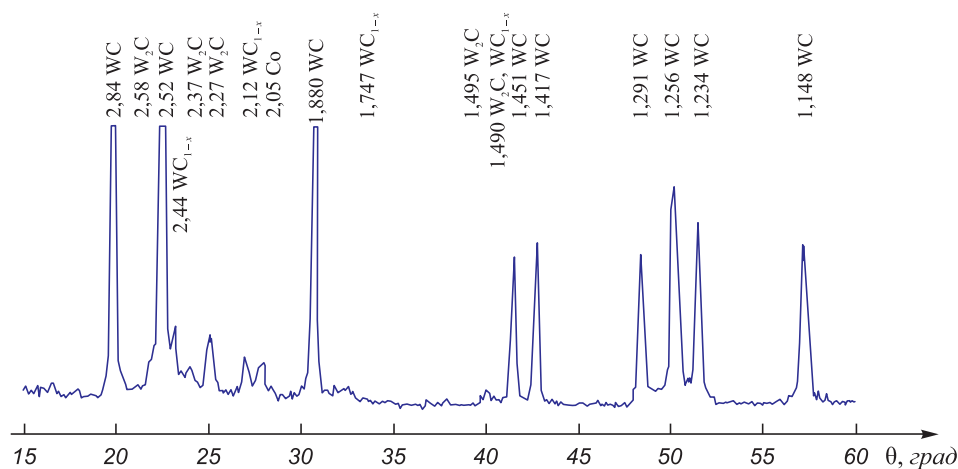


Рис. 2. Фрагмент дифрактограммы твердого сплава ВК10КС после электроискровой обработки

Fig. 2. Fragments of the diffractogram of VK10KS alloy after electric spark treatment

Свойства сплава ВК10КС после упрочняющей обработки

Properties of VK10KS alloy after hardening treatment

Способ обработки	Нанотвердость поверхностного слоя, МПа	Глубина трека износа, мкм	Площадь трека износа, мкм ²	μ	Фазовый состав поверхностного слоя
Электроискровая обработка	22 000	10,800	941,0	0,23	W ₂ C
ЭВЛ (титан)	25 000	5,400	243,0	0,14	TiC, W ₂ C
ЭВЛ (титан + бор)	27 500	242,000	155,0	0,10	TiB ₂ , TiC, W ₂ C
Ионно-плазменное покрытие (TiN + ZrN)	38 500	0,097	4,2	0,07	TiN + ZrN
Исходный сплав	–	58,000	12 921,0	0,41	WC, β-Co

толщиной 20 мкм массой 40 мг из расчета на 15 см² обрабатываемой поверхности).

Дополнительно упрочнить поверхность карбидовольфрамовых твердых сплавов можно путем совместного взрыва проводников с порошками тугоплавких соединений. В настоящей работе на поверхности твердого сплава ВК10КС за счет совместного электровзрыва титана с порошком бора был получен упрочненный слой [15]. Использовали порошок аморфного бора марки А с размерами частиц 5 мкм. Массу порошка аморфного бора выбирали из расчета 60 мг на 15 см² обрабатываемой поверхности.

Обработка поверхности твердого сплава ВК10КС проводилась при поглощаемой плотности мощности 6,0 ГВт/м² (диаметр d внутреннего электрода составлял 15 мм; диаметр d_0 канала сопла 10 мм; расстояние x от облучаемой поверхности до среза сопла 20 мм; величина зарядного напряжения U составляла 2,3 кВ). При облучении поверхность оплавляется, происходит интенсивное конвективное перемешивание расплава из-за неоднородного давления, оказываемого плазменной струей на поверхность.

На рис. 1, б, в представлены фотографии микроструктур после ЭВЛ титаном и титаном совместно с бором.

На поверхности при ЭВЛ титаном формируется плохо травящийся сплошной слой l толщиной 3 – 4 мкм (рис. 1, б). С помощью рентгенофазового анализа и растровой электронной микроскопии установлено, что данный слой состоит из карбида TiC. Под верхним слоем располагается слой 2 с мелкодисперсной структурой, состоящий из карбидов W₂C и WC. Глубже расположен слой 3, где с помощью растровой электронной микроскопии выявлены изменения химического состава только кобальтовой связующей, которая дополнительно легируется титаном, вольфрамом и углеродом [16]. Общая глубина зоны с измененной структурой составляет 30 – 40 мкм.

При изменении фазового состава поверхностного слоя повышаются твердость и износостойкость твердого сплава в целом (см. таблицу).

При поверхностной обработке твердого сплава электровзрывом титана с бором образуется плохо

травящийся упрочненный слой толщиной 2 – 3 мкм с выявленными электронной микроскопией скоплениями дислокаций (рис. 3). Этот слой плавно переходит в основу сплава без образования микротрещин (рис. 1, в). По данным рентгенофазового анализа этот слой состоит из легированного карбида титана (Ti, W)C (30 %), борида титана TiB₂ (15 %), карбидов W₂C (20 %) и WC (35 %) (рис. 4).

При наноиндентировании наблюдается увеличение поверхностной твердости при электровзрыве титана с бором до 27 500 МПа. Это связано с формированием борида титана TiB₂ (см. таблицу).

Изменение трибологических характеристик поверхностного слоя после ЭВЛ титаном совместно с бором по сравнению с исходным состоянием сплава ВК10КС показано в таблице.

Для металлообрабатывающей промышленности очень важно повышение срока службы режущего инструмента. Эффективным решением этой задачи является поверхностное упрочнение неперетачиваемых режущих пластин из твердых сплавов.

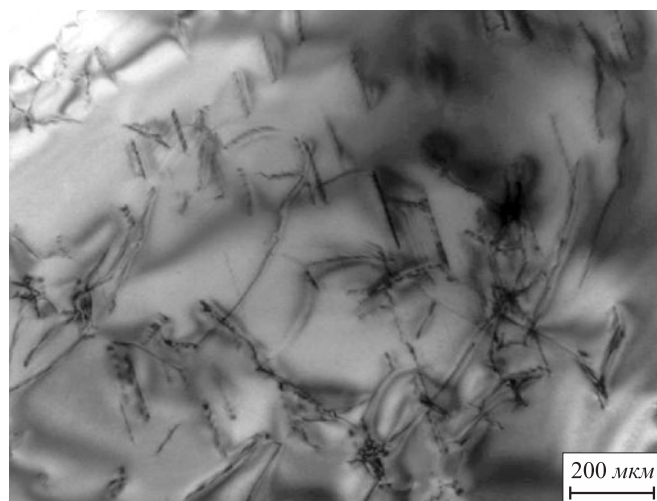


Рис. 3. Структура поверхности сплава ВК10КС после электровзрывной обработки титаном с бором

Fig. 3. Structure of the surface of VK10KS alloy after electro-explosive treatment by titanium and boron

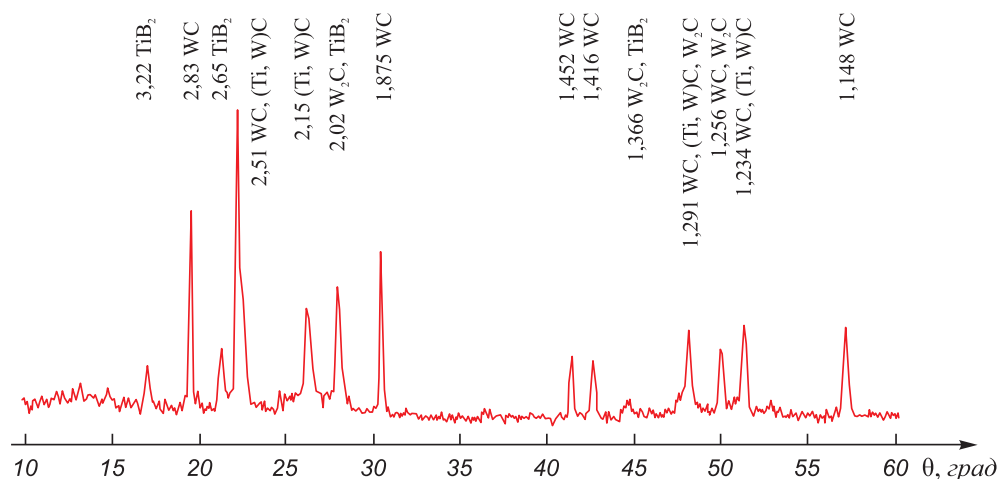


Рис. 4. Фрагмент дифрактограммы сплава BK10KC после электровзрывного легирования титаном совместно с бором

Fig. 4. Fragment of the diffractogram of VK10KS alloy after electro-explosive alloying by titanium and boron

Используются различные способы поверхностного упрочнения твердосплавного инструмента, одним из которых является ионно-плазменное напыление [17 – 20]. В современной практике поверхностного упрочнения твердосплавного инструмента применяются покрытия, содержащие TiC, TiN, которые обладают высокими температурой плавления и твердостью. Однако и такие покрытия не лишены недостатков, один из них – невозможность обработки титановых и других труднообрабатываемых сплавов. Также резко снижаются защитные свойства покрытий при высокой скорости резания из-за их невысокой трещиностойкости. Вызывает интерес введение в состав покрытия TiN циркония, так как предположительно именно цирконий должен повышать теплостойкость, снижать хрупкость при одновременном повышении твердости покрытия [3, 17].

По методике раздельных катодов на поверхность твердого сплава BK10KC в камере установ-

ки «Квант-6» с рабочим давлением $6,0 \cdot 10^{-3}$ Па было нанесено ионно-плазменное TiN + ZrN покрытие (50 % Ti + 50 % Zr) толщиной 20 мкм (рис. 5). В качестве реакционного газа использовали азот. Ионное осаждение осуществляли при энергии ионных потоков 100 эВ, отрицательном напряжении 160 В и токе фокусирующей катушки 0,3 – 0,4 А. Два катода из титанового сплава располагали в камере установки друг против друга, а катод из циркониевого сплава – между ними.

Микроструктура сплава BK10KC с ионно-плазменным покрытием TiN + ZrN толщиной 20 мкм представлена на рис. 1, 2. В покрытии наблюдается явно выраженная микрослоистость. Введение в состав покрытия TiN циркония приводит к увеличению нанотвердости до 38 500 МПа (см. таблицу).

При исследовании адгезионной прочности нанесенного ионно-плазменного покрытия TiN + ZrN с основной определено, что при приложении нагрузки 56,6 Н

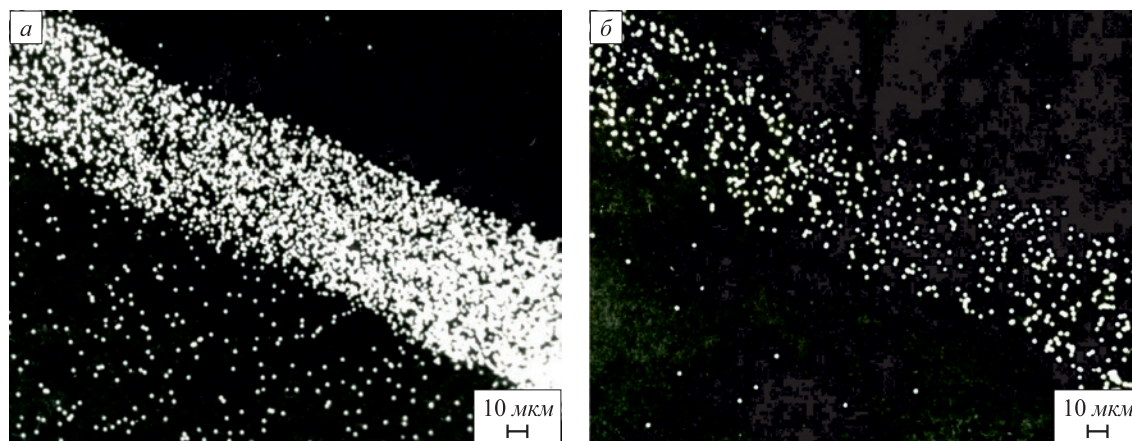


Рис. 5. Микроструктура сплава BK10KC с ионно-плазменным TiN + ZrN покрытием в характеристических рентгеновских излучениях титана (а) и циркония (б)

Fig. 5. Microstructure of VK10KS alloy with ion-plasma TiN + ZrN coating in characteristic X-rays of titanium (a) and zirconium (b)

наблюдается одновременный скачок сигналов акустической эмиссии и силы трения, соответствующий моменту начала отслоения покрытия. Такие показатели нагрузки свидетельствуют о высокой адгезионной прочности ионно-плазменного TiN + ZrN покрытия с твердосплавной основой, которая объясняется микро-слоистостью самого покрытия: граница между микро-слоями покрытия тормозит рост трещины при внедрении в него индентора.

Выводы

Использование предлагаемых способов поверхностного упрочнения твердого сплава BK10KC дает возможность выбора одного из методов упрочнения, исходя из условий эксплуатации твердосплавного инструмента. Возможны продление эксплуатационного срока инструмента и экономия дефицитных материалов (вольфрама и кобальта).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Табаков В.П. Формирование износостойких ионно-плазменных покрытий режущего инструмента. М.: Машиностроение, 2008. 311 с.
2. Богодухов С.И., Козик Е.С., Свиденко Е.В. Упрочнение твердых сплавов (обзор) // Упрочняющие технологии и покрытия. 2015. Т. 131. № 11. С. 3–11.
3. Иванов А.Н., Хмелевская В.С., Антошина И.А., Коршунов А.Б. Структурные изменения в твердом сплаве BK8 при ионном облучении // Перспективные материалы. 2003. № 1. С. 89–92.
4. Петренко П.В., Грабовский Ю.Е., Грицкевич А.Л., Кулиш Н.П. Структурно-фазовые превращения в твердых сплавах WC–Co при облучении низкотоковым электронным пучком // Физика и химия обработки материалов. 2003. № 3. С. 29–39.
5. Тимошников Ю.А., Клопотов А.А., Иванов Ю.Ф. Изменение структурно-фазового состояния сплава BK8 под воздействием потока гамма-квантов // Известия вузов. Черная металлургия. 2001. № 4. С. 40–43.
6. Liu S.R., Hao J.M., Chu L.G., Song J.T. Mechanism of hard-facing alloys WC–Co boronizing with rare-earth metals // Xiyou Jinshu Cailiao Yu Gongcheng. Rare Metal Materials and Engineering. 2003. Vol. 32. No. 4. P. 305–308.
7. Liu S.R., Hao J.M., Chu L.G., Song J.T. Phase analysis of cemented carbide WC–Co boronized with yttrium // Journal of Rare Earths. 2002. Vol. 40. No. 4. P. 287–290.
8. Liu Y., Vid Q., Li Y. Synthesis and tribological behavior of electrodeless Ni–P–WC nanocomposite coatings // Surface & Coatings Technology. 2007. Vol. 201. No. 16–17. P. 7246–7251. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2007.01.035>
9. Veprek S., Veprek-Hejman M.G.J., Kavrankova P., Prohazka J. Different approaches to superhard coatings and nanocomposition // Thin Solid Films. 2005. Vol. 476. P. 1–29. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2004.10.053>
10. Jedrzejowski P., Klemberg-Sapieha J.E., Martinu L. Relationship between the mechanical properties and the microstructure of nanocomposite, TiN/SiN₃ coatings prepared by low temperature plasma enhanced chemical vapor deposition // Thin Solid Films. 2003. Vol. 426. P. 150–159. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(03\)00028-2](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(03)00028-2)
11. Mayrhofer P.H., Kunc F., Musil J., Mitterer C. A comparative study on reactive and non-reactive unbalanced magnetron sputter deposition of TiN coatings // Thin Solid Films. 2002. Vol. 415. No. 1–2. P. 151–159. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(02\)00511-4](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(02)00511-4)
12. Oskolkova T.N. A new technology for producing carbide alloys with gradient structure // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2015. Vol. 91. No. 1. Article 012019. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/91/1/012019>
13. Тюрин Ю.Н., Кульков С.Н., Колисниченко О.В., Дуда И.М. Импульсно-плазменное модифицирование поверхности изделия из сплава WC + 20 % Co // Физическая инженерия поверхности. 2009. Т. 7. № 3. С. 262–267.
14. Oskolkova T.N., Budovskikh E.A., Goryushkin V.F. Features of structure formation of the surface layer in the course of electroexplosive alloying tungsten carbide hard alloy // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 2014. Vol. 55. No. 2. P. 196–200. <https://doi.org/10.3103/S1067821214020138>
1. Tabakov V.P. Formation of Wear-Resistant Ion-Plasma Coatings of Cutting Tools. Moscow: Mashinostroyeniye, 2008, 311 p. (In Russ.).
2. Bogodukhov S.I., Kozik E.S., Svidenko E.V. Hardening of hard alloys (Review). Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya. 2015, vol. 131, no. 11, pp. 3–11. (In Russ.).
3. Ivanov A.N., Khmelevskaya V.S., Antoshina I.A., Korshunov A.B. Structural changes in hard alloy VK8 under ion irradiation. Perspektivnye materialy. 2003, no. 1, pp. 89–92. (In Russ.).
4. Petrenko P.V., Grabovskii Yu.E., Gritskovich A.L., Kulish N.P. Structural-phase transformations in WC–Co hard alloys under irradiation with a low-current electron beam. Fizika i khimiya obrabotki materialov. 2003, no. 3, pp. 29–39. (In Russ.).
5. Timoshnikov Yu.A., Klopotov A.A., Ivanov Yu.F. Variation of structure-phase state of VK8 alloy under action of gamma quanta. Izvestiya. Ferrous Metallurgy. 2001, no. 4, pp. 40–43. (In Russ.).
6. Liu S.R., Hao J.M., Chu L.G., Song J.T. Mechanism of hard-facing alloys WC–Co boronizing with rare-earth metals. Xiyou Jinshu Cailiao Yu Gongcheng. Rare Metal Materials and Engineering. 2003, vol. 32, no. 4, pp. 305–308.
7. Liu S.R., Hao J.M., Chu L.G., Song J.T. Phase analysis of cemented carbide WC–Co boronized with yttrium. Journal of Rare Earths. 2002, vol. 40, no. 4, pp. 287–290.
8. Liu Y., Vid Q., Li Y. Synthesis and tribological behavior of electrodeless Ni–P–WC nanocomposite coatings. Surface & Coatings Technology. 2007, vol. 201, no. 16–17, pp. 7246–7251. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2007.01.035>
9. Veprek S., Veprek-Hejman M.G.J., Kavrankova P., Prohazka J. Different approaches to superhard coatings and nanocomposition. Thin Solid Films. 2005, vol. 476, pp. 1–29. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2004.10.053>
10. Jedrzejowski P., Klemberg-Sapieha J.E., Martinu L. Relationship between the mechanical properties and the microstructure of nanocomposite, TiN/SiN₃ coatings prepared by low temperature plasma enhanced chemical vapor deposition. Thin Solid Films. 2003, vol. 426, pp. 150–159. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(03\)00028-2](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(03)00028-2)
11. Mayrhofer P.H., Kunc F., Musil J., Mitterer C. A comparative study on reactive and non-reactive unbalanced magnetron sputter deposition of TiN coatings. Thin Solid Films. 2002, vol. 415, no. 1–2, pp. 151–159. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(02\)00511-4](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(02)00511-4)
12. Oskolkova T.N. A new technology for producing carbide alloys with gradient structure. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2015, vol. 91, no. 1, article 012019. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/91/1/012019>
13. Tyurin Yu.N., Kul'kov S.N., Kolisnichenko O.V., Duda I.M. Pulsed plasma modification of the surface of a WC + 20 % Co alloy product. Fizicheskaya inzheneriya poverkhnosti. 2009, vol. 7, no. 3, pp. 262–267. (In Russ.).
14. Oskolkova T.N., Budovskikh E.A., Goryushkin V.F. Features of structure formation of the surface layer in the course of electroexplosive alloying tungsten carbide hard alloy. Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 2014, vol. 55, no. 2, pp. 196–200. <https://doi.org/10.3103/S1067821214020138>

15. Oskolkova T.N., Glezer A.M. Wear-resistant coatings on WC–Co hard alloys synthesized by concentrated energy flows // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2019. Vol. 10. No. 1. P. 146–154. <https://doi.org/10.1134/S2075113319010258>
16. Oskolkova T.N., Budovskikh E.A. Pulse plasma treatment of the surface of alloy VK10KS // *Metal Science and Heat Treatment*. 2012. Vol. 53. No. 11–12. P. 608–610. <https://doi.org/10.1007/s11041-012-9443-1>
17. Панов В.С., Чувилин А.М., Фальковский В.А. Технология и свойства спечённых твердых сплавов и изделий из них. М.: МИСиС, 2004. 464 с.
18. Верещака А.С., Верещака А.А. Повышение эффективности инструмента путем управления составом, структурой и свойствами покрытий // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2005. № 9. С. 9–18.
19. Яценко А.С., Марчук С.И. Изучение коррозионной стойкости твердых сплавов с покрытием нитрид титана. В кн.: *Металловедение черных и цветных сплавов*. Сб. науч. тр. Вып. 9. Донецк: Донецкий нац. техн. ун-т, 2003. С. 29–33.
20. Патент № 2270270 РФ, МПК С 23 С 14/06, С 23 С 14/48. Режущий инструмент с многослойным покрытием / В.П. Табаков, А.В. Циркин, А.В. Чихранов. Заявл. 25.05.2004; опубли. 20.02.2006. Бюл. № 5.
15. Oskolkova T.N., Glezer A.M. Wear-resistant coatings on WC–Co hard alloys synthesized by concentrated energy flows. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2019, vol. 10, no. 1, pp. 146–154. <https://doi.org/10.1134/S2075113319010258>
16. Oskolkova T.N., Budovskikh E.A. Pulse plasma treatment of the surface of alloy VK10KS. *Metal Science and Heat Treatment*. 2012, vol. 53, no. 11–12, pp. 608–610. <https://doi.org/10.1007/s11041-012-9443-1>
17. Panov V.S., Chuvilin A.M., Fal'kovskii V.A. *Technology and Properties of Special Hard Alloys and Products from Them*. Moscow: MISiS, 2004, 464 p. (In Russ.).
18. Vereshchaka A.S., Vereshchaka A.A. Improving the tool efficiency by controlling the composition, structure and properties of coatings. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*. 2005, no. 9, pp. 9–18. (In Russ.).
19. Yatsenko A.S., Marchuk S.I. Study of corrosion resistance of hard alloys coated with titanium nitride. In: *Metal Science of Ferrous and Non-Ferrous Alloys. Transactions*. Issue 9. Donetsk: Donetskii nats. tekhn. un-t, 2003, pp. 29–33. (In Russ.).
20. Tabakov V.P., Tsirkin A.V., Chikhranov A.V. *Cutting tool with multilayer coating*. Patent RF no. 2270270. *Bulleten' izobretenii*. 2006, no. 5. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Татьяна Николаевна Осколкова, д.т.н., профессор кафедры «Обработка металлов давлением и металловедение. ЕВРАЗ ЗСМК», Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0003-1310-1284
E-mail: oskolkova@kuz.ru

Tat'yana N. Oskolkova, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair "Metal Forming and Metal Science. "EVRAZ ZSMK", Siberian State Industrial University
ORCID: 0000-0003-1310-1284
E-mail: oskolkova@kuz.ru

Александр Маркович Глезер, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», директор научного центра «Металловедение и физика материалов», Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина
E-mail: a.glezer@mail.ru

Aleksandr M. Glezer, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Chief Researcher, National University of Science and Technology "MISIS" (MISIS), Director of the Scientific Center "Metal Science and Physics of Materials", I.P. Bardin Central Research Institute for Ferrous Metallurgy
E-mail: a.glezer@mail.ru

Артём Сергеевич Симачев, к.т.н., доцент кафедры «Обработка металлов давлением и металловедение. ЕВРАЗ ЗСМК», Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0002-9712-3757
E-mail: simachev_as@mail.ru

Artem S. Simachev, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair "Metal Forming and Metal Science. "EVRAZ ZSMK", Siberian State Industrial University
ORCID: 0000-0002-9712-3757
E-mail: simachev_as@mail.ru

Поступила в редакцию 11.10.2021
 После доработки 21.10.2021
 Принята к публикации 25.10.2021

Received 11.10.2021
 Revised 21.10.2021
 Accepted 25.10.2021



Оригинальная статья

УДК 621.791.92

DOI 10.17073/0368-0797-2021-12-877-885



ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА УПРОЧНЕНИЯ ТЕПЛОСТОЙКОГО МЕТАЛЛА ВЫСОКОЙ ТВЕРДОСТИ, СФОРМИРОВАННОГО ПЛАЗМОЙ В СРЕДЕ АЗОТА

Н. Н. Малущин, Д. А. Романов

Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. Методами растровой электронной микроскопии и микрорентгеноспектрального анализа исследованы структура, фазовый и химический составы теплостойкого сплава, сформированного плазмой в среде азота с последующим высокотемпературным отпуском. Установлено, что в наплавленном сплаве основными фазами являются твердый раствор α -железа и карбонитриды на основе железа, вольфрама, хрома, молибдена, алюминия ($\text{Fe}_6\text{W}_6\text{NC}$ и AlN). Высокотемпературная обработка (четырёхкратный высокотемпературный отпуск при температуре нагрева 580°C и времени выдержки 1 ч) наплавленного покрытия приводит к росту параметра кристаллической решетки (с 2,866 до 2,89 Å) и размеров областей когерентного рассеяния (с 25 до 100 нм), уменьшению внутренних упругих напряжений (с 1000 до 600 МПа). На поверхности наплавки наблюдается явно выраженная ориентированная дендритная структура. После наплавки и высокотемпературного отпуска ориентированная дендритная структура практически не просматривается. Распределение микротвердости по глубине наплавленного слоя в состоянии после наплавки характеризуется значительным разбросом значений при ее высоком среднем значении на поверхности 4,142 ГПа (дисперсия 1,0956) и средней части наплавки 5,153 ГПа (дисперсия 1,5697). Разброс значений микротвердости связан со сложным тепловым воздействием многослойной плазменной наплавки по винтовой линии и перемешиванием материала подложки с наплавляемым покрытием. Высокотемпературный отпуск приводит к выравниванию значений микротвердости и повышению ее среднего значения до 5,7 – 6,5 ГПа. Уточнена природа упрочнения наплавленного теплостойкого металла высокой твердости, дополнительно легированного азотом и алюминием. Основное упрочнение наплавленного металла происходит при высокотемпературном отпуске за счет увеличения количества карбидных и карбонитридных фаз и образования мелкодисперсного нитрида алюминия.

Ключевые слова: плазменная наплавка, теплостойкий наплавленный металл высокой твердости, структура, фазовый состав, свойства, твердость, микротвердость

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке Гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – докторов наук МД-486.2020.8 и кандидатов наук МК-5585.2021.4, а также при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-08-00044.

Для цитирования: Малущин Н.Н., Романов Д.А. Физическая природа упрочнения теплостойкого металла высокой твердости, сформированного плазмой в среде азота // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 12. С. 877–885.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-12-877-885>

Original article

PHYSICAL NATURE OF HARDENING OF HEAT-RESISTANT METAL OF HIGH HARDNESS FORMED BY PLASMA IN NITROGEN MEDIUM

N. N. Malushin, D. A. Romanov

Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654007, Russian Federation)

Abstract. The structure, phase and chemical composition of a heat-resistant alloy formed by plasma in a nitrogen medium with subsequent high-temperature tempering have been studied by scanning electron microscopy and microrentgenospectral analysis. It was found that in the deposited alloy, the main phases are a solid solution of α -iron and carbonitrides based on iron, tungsten, chromium, molybdenum, and aluminum ($\text{Fe}_6\text{W}_6\text{NC}$ and AlN). High-temperature treatment (four-fold high-temperature tempering at a temperature of 580°C for 1 h) of the deposited coating leads to an increase in the crystal lattice parameters (from 2.866 to 2.89 Å) and in the sizes of coherent scattering regions (from 25 to 100 nm), and to a decrease in internal elastic stresses (from 1000 to 600 MPa). A pronounced oriented dendritic structure is observed on the deposited surface. After surfacing and

high-temperature tempering, the oriented dendritic structure is practically not visible. The distribution of microhardness over the depth of the deposited layer in the state after surfacing is characterized by a significant spread at its high average value on the surface of 4.142 GPa (dispersion 1.0956) and the middle part of the surfacing – 5.153 GPa (dispersion 1.5697). The spread of microhardness values is associated with the complex thermal effect of multilayer plasma surfacing along a helical line and mixing of the substrate material with the surfacing coating. High-temperature tempering leads to an equalization of the microhardness values and an increase in its average value to 5.7 – 6.5 GPa. The nature of hardening of the deposited heat-resistant metal of high hardness, additionally alloyed with nitrogen and aluminum, was clarified. The main hardening of the deposited metal occurs at high temperature tempering due to an increase in the carbide and carbonitride phases and the formation of fine aluminum nitride.

Keywords: plasma surfacing, heat-resistant deposited metal of high hardness, structure, phase composition, properties, hardness, microhardness

Funding: The work was supported by the Grant from the President of the Russian Federation for state support of young Russian scientists – MD-486.2020.8 doctors of Sciences and MK-5585.2021.4 Candidates of Sciences, and by RFBR in framework of scientific project No. 20-08-00044.

For citation: Malushin N.N., Romanov D.A. Physical nature of hardening of heat-resistant metal of high hardness formed by plasma in nitrogen medium. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 12, pp. 877–885. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-12-877-885>

ВВЕДЕНИЕ

Одной из приоритетных задач при производстве металлопроката является повышение качества основного инструмента прокатных станов – их рабочих валков [1]. Материал рабочих валков холодной прокатки и технология их изготовления должны обеспечить высокую (95 – 102 HSh (64 – 66 HRC)) твердость активного слоя, достаточную его глубину, хорошее качество поверхности после обработки [2].

Комплекс высоких требований, предъявляемых к валкам холодной прокатки, относится преимущественно к активному слою валков, а свойства сердцевин валка не оказывают решающего влияния на его эксплуатационные характеристики [3]. Оптимальным по конструкции является наплавленный валок, у которого только активный слой выполнен из теплостойких быстрорежущих сталей, а сердцевина – из высокопрочной конструкционной стали [4]. Изучены различные способы упрочнения валков: применение электрошлакового переплава [5], высокотемпературная термомеханическая поверхностная обработка [6], изготовление валков из металлокерамических твердых сплавов [7], применение составных (бандажированных) валков [8] и др. Выполненный анализ показывает, что одним из эффективных и высокопроизводительных способов изготовления валков может стать плазменная наплавка в защитно-легирующей среде азота [9, 10].

Наиболее полно требованиям, предъявляемым к наплавленному металлу для упрочнения деталей, которые работают в условиях абразивного износа, соответствуют теплостойкие стали высокой твердости (например, P18, P6M5, P9, P2M8, 3X2B8 и др.). Однако эти стали обладают (наряду с высокими служебными свойствами) неудовлетворительной свариваемостью из-за повышенной чувствительности к образованию холодных трещин [11, 12]. Обычно для предотвращения образования таких трещин традиционная технология наплавки предусматривает обязательное применение высокотемпературного предварительного и сопутствующего подогрева ($T_{\text{под}} = 400 \div 700 \text{ }^{\circ}\text{C}$) и замедленного охла-

ждения изделия [13]. При этом происходит образование пластичных продуктов распада аустенита, которые обладают низкой твердостью и износостойкостью, что, в свою очередь, вызывает необходимость проведения сложной термической обработки (отжига, закалки и отпуска). В процессе термической обработки биметаллического изделия не всегда удастся полностью использовать свойства высоколегированного металла и обеспечить максимальные твердость и износостойкость, необходимые для активного слоя рабочих валков холодной прокатки.

В настоящее время в литературе недостаточно данных, полученных современными методами исследований, о структуре, фазовом и химическом составе, напряжениях в теплостойком металле высокой твердости, сформированном плазменной наплавкой в защитно-легирующей среде азота и термообработкой в виде высокотемпературного отпуска. Недостаточно ясна физическая сущность наблюдаемых повышенных твердости и износостойкости наплавленного теплостойкого металла.

Целью настоящей работы является исследование структуры, фазового и химического составов, напряжений в теплостойком металле высокой твердости, сформированном плазмой в среде азота и высокотемпературным отпуском, а также уточнение физической природы повышенных твердости и износостойкости наплавленного материала.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

В работе исследовали наплавленные теплостойкие стали высокой твердости на примере сплава P18, дополнительно легированного алюминием и азотом. Химический состав исследуемого сплава, % (по массе): 0,86 C; 4,84 Cr; 17,0 W; 5,40 Mo; 0,50 V; 0,65 Al; 0,06 N; 70,69 Fe. В качестве подложки использовали сталь 30ХГСА следующего химического состава, % (по массе): 0,3 C; 0,9 Cr; 0,8 Mn; 0,9 Si; 97,1 Fe.

Наплавка заготовки осуществлялась на установке для плазменной наплавки тел вращения [14]. Валки на-

плавляли плазменной дугой с подачей в сварочную ванну нетоковедущей присадочной порошковой проволоки ПП–P18Ю. В качестве плазмообразующего газа использовался аргон, защитного – азот. Заготовку с припусками под наплавку 5 – 10 мм на сторону устанавливали в центре наплавочной установки, проводили предварительный подогрев до температуры 230 °С, далее охлаждали шейки валка (расход холодной воды до 2 л/мин). После завершения подготовительных операций проводили пяти- или шестислойную наплавку. Режим наплавки: сила тока $I_{\text{св}}$ 150 – 160 А; напряжение $U_{\text{д}}$ 50 – 55 В; скорость наплавки $v_{\text{н}}$ 18 м/ч; скорость подачи порошковой проволоки $v_{\text{п.пр}}$ 60 м/ч; смещение с зенита 10 – 12 мм; длина дуги $l_{\text{д}}$ 20 мм; расход $Q_{\text{защ}}$ защитного газа (азота) 20 – 22 л/мин; расход $Q_{\text{плазм}}$ плазмообразующего газа (аргона) 6 – 8 л/мин; диаметр проволоки 3,7 мм. После окончания наплавки заготовку охлаждали на воздухе. Плазменную наплавку осуществляли по термическому циклу с низкотемпературным подогревом [14].

Из верхних слоев наплавленного металла вырезали образцы на станке электроискровой резки. Половину образцов от партии подвергали термической обработке, режимы которой в случае наплавленных образцов выбирали по рекомендациям для кованных сталей, близких по составу стали P18 (температура нагрева 580 °С, время выдержки 1 ч, количество отпусков 4) [15]. Проводились исследования образцов в двух состояниях: 1 – после наплавки; 2 – после наплавки и высокотемпературного отпуска. Для исследований образцы разрезали на электроискровом станке в керосине на несколько частей, затем механически выравнивали на мелкой наждачной бумаге и алмазной пасте, а после этого электролитическим способом стравливали деформированный слой и выравнивали поверхность. Электрополировка осуществлялась при напряжении на электродах 10 – 70 В. Использовали электролит следующего состава: 80 мл H_3PO_4 + 6 г Cr_2O_3 + 14 мл H_2O . Травление поверхности образцов проходило в 2 %-ном растворе азотной кислоты.

Анализ поверхности образцов проводили на растровом электронном микроскопе Tescan VEGA 3 LMN, оснащенный приставкой X-Act ADD (Oxford Instruments Standard AZtec Energy). Состав определяли локально в отдельных частицах и в режиме картирования. Исследования также осуществлялись методом микрорентгеноспектрального анализа на приборе Leo EVO 50XVP (Карл Цейс, Германия).

Исследования структурно-фазового состояния наплавленного металла проходили по схеме: 1 и 2 – зона сплавления основного металла с наплавленным со стороны основного металла и со стороны наплавки; 3 – центральная часть наплавки; 4 – поверхность наплавки. Структурно-фазовое состояние исследовали методом рентгеноструктурного анализа на дифрактометре ДРОН-3. Съемку дифрактограмм исследуемых наплавленных образцов проводили при непрерывном

2 θ -сканировании с фокусировкой по Брэггу-Брентано в излучении медного анода (длина волны излучения $\text{Cu } K_{\alpha} = 1,54051 \text{ \AA}$). Кристаллические фазы идентифицировали с использованием базы данных JCPDS PDF-2 структурного банка данных ICDD. Определяли фазовый состав, параметры кристаллической решетки, микродеформацию кристаллической решетки, размер областей когерентного рассеяния.

Исследования микротвердости проводили по методу Виккерса на приборе ПМТ-3. Индентором служила четырехгранная алмазная пирамида, нагрузка на которую составляла 1 Н. Образцы разрезали на электроискровом станке на параллельные пластинки толщиной 0,25 – 0,30 мм (измерения проводили микрометром с точностью $\pm 0,01$ мкм). Образцы вырезались из всех зон в направлении, параллельном поверхности. Также проводили измерения твердости по методу Роквелла.

Дальнейшая подготовка поверхности образцов проходила в несколько этапов. Сначала пластинки химически очищали от следов резки при комнатной температуре в растворе перекиси водорода с добавлением нескольких капель плавиковой кислоты. Затем пластинки подвергали электролитическому полированию в пересыщенном растворе хромового ангидрида в ортофосфорной кислоте до образования зеркальной поверхности (также при комнатной температуре). В ходе исследований поперечных шлифов проводили по пять замеров микротвердости в направлении от поверхности наплавки в глубь к основному металлу. Расстояние между точками замеров составляло 200 мкм. По результатам измерений были построены зависимости микротвердости по глубине слоев.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На первом этапе работы было определено распределение микротвердости наплавленного металла высокой твердости в направлении от поверхности наплавки в глубь к основному металлу. Показано распределение микротвердости HV по глубине слоев наплавленного металла в состоянии после наплавки (рис. 1, а) и после наплавки и высокотемпературного отпуска (рис. 1, б).

Распределение микротвердости по глубине наплавленного слоя в состоянии после наплавки характеризуется значительным разбросом значений при высоком среднем значении на поверхности 4,142 ГПа (дисперсия 1,0956) и средней части наплавки 5,153 ГПа (дисперсия 1,5697). Разброс значений микротвердости связан со сложным тепловым воздействием многослойной плазменной наплавки по винтовой линии и перемешиванием основного металла с наплавляемым.

Высокотемпературный отпуск привел к выравниванию микротвердости и повышению ее среднего значения до 5,689 ГПа на поверхности (дисперсия 1,626) и в центре наплавки до 6,468 ГПа (дисперсия 1,854).

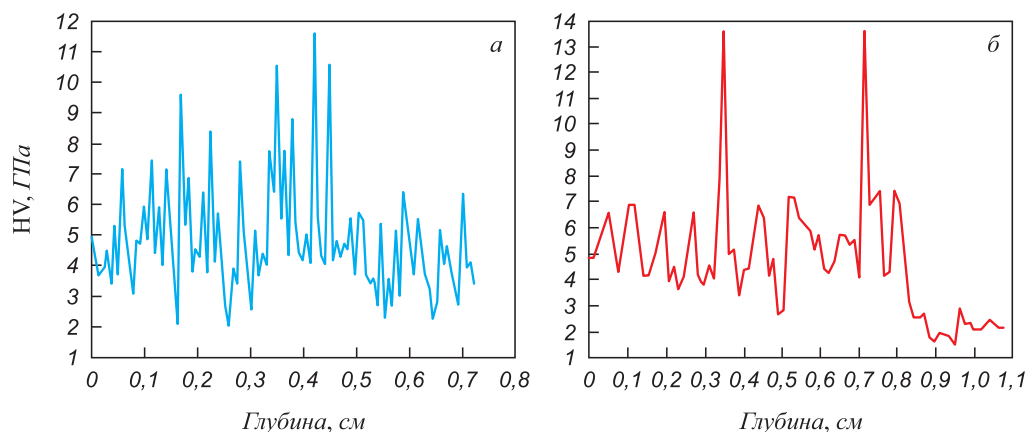


Рис. 1. Изменение микротвердости образцов после наплавки (а) и после наплавки и высокотемпературного отпуска (б) по глубине слоя наплавки

Fig. 1. Changes in microhardness of the samples after surfacing (a) and after surfacing and high-temperature tempering (b) by the depth of the surfacing layer

Термический цикл наплавки позволяет получить наплавленный металл в закаленном состоянии с твердостью по Роквеллу 54–58 HRC, высокотемпературный отпуск повышает твердость наплавленного металла до 62–64 HRC. Большой разброс значений свидетельствует о неравновесном структурно-фазовом состоянии наплавленного металла и о его сложном составе.

На рис. 2, а приведены участки рентгенограмм образцов после наплавки. Видно, что рентгенограммы имеют достаточно сложный характер: это свидетельствует о неравновесном состоянии материала. Материал во всех четырех состояниях имеет один и тот же фазовый состав: твердый раствор α -железа и карбонитриды на основе железа, вольфрама, хрома, молибдена, алюминия. Соотношение фаз в наплавленном материале различно, что объясняется уменьшением доли присутствия основного металла в наплавленном. Нанесение 3–5 слоев при многослойной плазменной наплавке достаточно для обеспечения заданного химического состава металла в поверхностном рабочем слое.

В случае наплавленных образцов с последующим высокотемпературным отпуском (рис. 2, б) существенно уменьшилось количество линий на рентгенограмме, они стали более сглаженными, без резких скачков и пиков. Это свидетельствует о том, что уменьшилось количество метастабильных неравновесных фаз. Основными фазами являются твердый раствор α -железа и сложный карбонитрид на основе соединений состава Me_6NC , в который входят хром, алюминий, вольфрам, молибден $(Fe, Cr, Al, W, Mo)_6C$. Это соединение имеет кубическую структуру $Fd-3m$, параметр кристаллической решетки составляет 10,96 Å.

Все наплавленные образцы имеют в своем составе твердый раствор α -железа и соединения на основе железа, вольфрама и молибдена, по всей видимости, переменного состава Fe_4W_2N , $FeWN_2$, Fe_4W_2C . Все эти соединения имеют кубическую структуру $Fd-3m$, па-

раметр кристаллической решетки составляет примерно 11 Å. Соединения на основе углерода и азота, как правило, изоморфны, различить их достаточно трудно. Скорее всего оба эти соединения присутствуют, судя по химическому составу исходных сталей. Как правило, это метастабильные фазы. Оба эти элемента образуют твердые растворы внедрения. Присутствуют также твердые растворы на основе алюминия и фаза AlN.

Ошибка измерений параметра кристаллической решетки основной фазы $\pm 0,001$ Å. Табличное значение параметра кристаллической решетки составляет 2,866 Å. Для основной фазы в поверхностном слое наплавленного образца параметр кристаллической решетки находится в пределах ошибки эксперимента, значения одинаковы для наплавки без отпуска и для наплавки с высокотемпературным отпуском (то есть на поверхности наплавки сохраняется дополнительное количество легирующих элементов, которые увеличивают параметр решетки α -железа почти до 2,89 Å). Для остальных состояний в исходном наплавленном материале (в центральной части образца и зоне сплавления основного металла с наплавленным) параметр кристаллической решетки примерно один и тот же и близок табличному значению для α -железа. При наплавке с последующим отпуском завышенное значение параметра кристаллической решетки наблюдается у образцов во всех четырех состояниях. Это свидетельствует о перераспределении легирующих элементов по объему материала и насыщению его элементами внедрения (такими, как углерод и азот) в процессе высокотемпературного отпуска.

Значение областей когерентного рассеяния изменяется в пределах 25–100 нм, а $\frac{\Delta d}{d}$ – в пределах 3–5. Это соответствует внутренним упругим напряжениям $\tau = \frac{\Delta d}{d} E$ (где E – модуль Юнга), в среднем равным

600 – 1000 МПа. В наплавленном материале внутренние упругие напряжения достаточно высокие, что связано с особенностями термического цикла многослойной плазменной наплавки. В образцах с последующим высокотемпературным отпуском напряжения меньше примерно в два раза (600 МПа): они снимаются при высокотемпературной обработке. Расстояние между дефектами также невелико и составляет 25 – 50 нм в исходном материале и около 100 нм после термообработки. Высокотемпературный отпуск приводит к существенному уменьшению дефектов в материале и ведет к значительному (в 1,5 – 2,0 раза) снижению внутренних упругих напряжений.

Установлено, что в наплавленном материале основными фазами являются твердый раствор α -железа и карбонитриды на основе железа, вольфрама, хрома, молибдена, алюминия. Высокотемпературная об-

работка (отпуск) наплавленного материала приводит к изменению фазового состава, к изменению параметра кристаллической решетки, размеров областей когерентного рассеяния, внутренних упругих напряжений. Проведенные исследования позволяют объяснить наблюдаемые ранее в работе [16] повышенные твердость и микротвердость наплавленного в среде азота теплоустойчивого металла дополнительным упрочнением за счет образования карбонитридов на основе железа, вольфрама, хрома, молибдена и алюминия ($\text{Fe}_6\text{W}_6\text{NC}$ и AlN) [17, 18].

На рис. 3 показаны изображения травленных шлифов, приготовленных после плазменной наплавки без термообработки. На поверхности наплавки (рис. 3, а) наблюдается явно выраженная ориентированная дендритная структура. Основная часть поверхности материала представляет собой перлитные зерна. В стыках

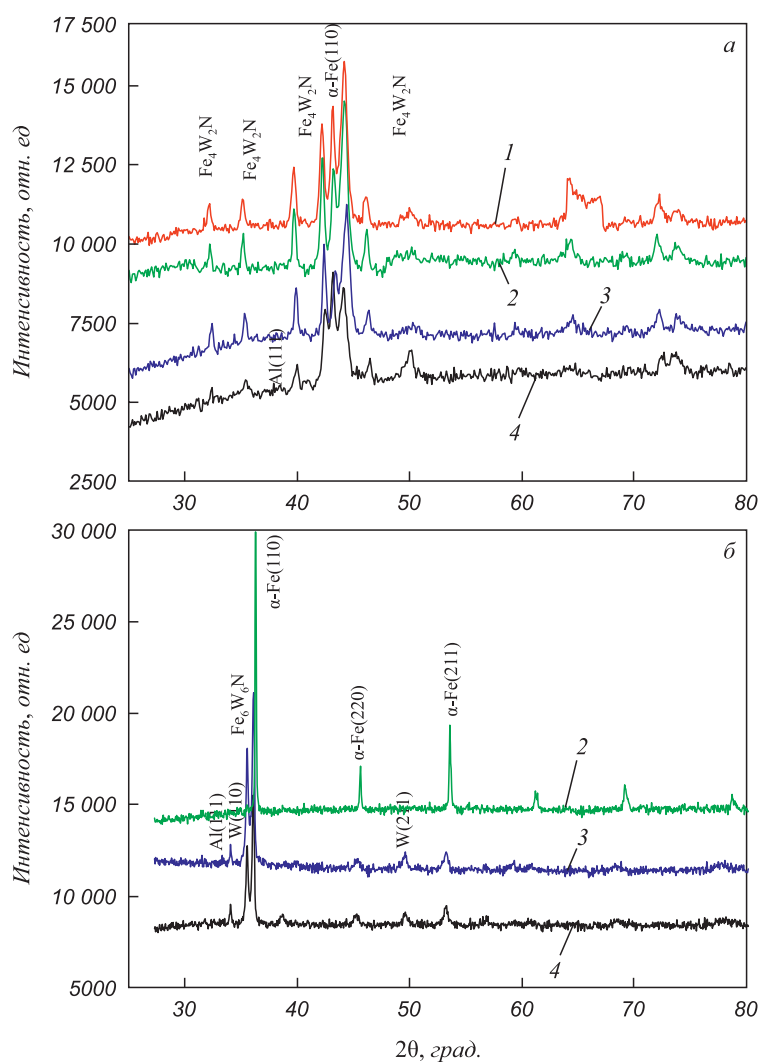


Рис. 2. Участки дифрактограмм образцов с наплавленным теплоустойчивым металлом:

а – после наплавки; б – после наплавки и высокотемпературного отпуска;

1 – стык со стороны металла с зазором; 2 – стык со стороны металла; 3 – центральная часть наплавки; 4 – поверхность

Fig. 2. Sections of diffractograms of the samples with deposited heat-resistant metal:

а – after surfacing; б – after surfacing and high temperature tempering;

1 – joint from the metal side with a gap; 2 – joint from the metal side; 3 – central part of the surfacing; 4 – surface

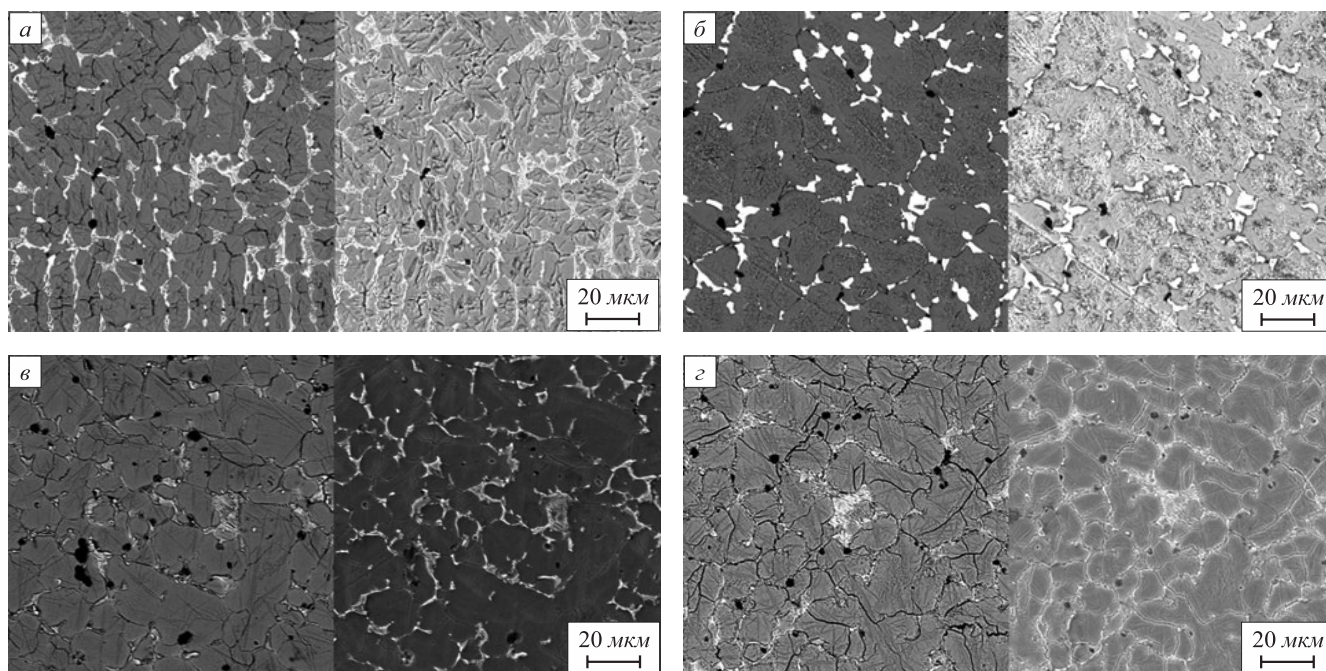


Рис. 3. Структура поверхности теплостойкого наплавленного металла после наплавки (а, б) и высокотемпературного отпуска (в, з): а, в – поверхность; б, з – центральная часть наплавки

Fig. 3. Structure of the surface of the heat-resistant deposited metal after surfacing (а, б) and high-temperature tempering (в, з): а, в – surface; б, з – central part of the surfacing

и по границам зерен располагаются карбонитриды на основе железа, вольфрама, хрома, молибдена и алюминия ($\text{Fe}_6\text{W}_6\text{NC}$ и AlN) переменного состава $\text{Fe}_4\text{W}_2\text{N}$, FeWN_2 и $\text{Fe}_4\text{W}_2\text{C}$. Присутствуют также твердые растворы на основе алюминия и фаза AlN . Центральная часть наплавленного металла (рис. 3, б) по своей структуре существенно не отличается от поверхности, но ориентированность дендритной структуры менее выражена.

После наплавки и высокотемпературного отпуска ориентированная дендритная структура практически не просматривается (рис. 3, в, з). Видны более четкие границы перлитных зерен. В стыках и по границам зерен располагаются карбонитриды на основе железа, вольфрама, хрома, молибдена и алюминия ($\text{Fe}_6\text{W}_6\text{NC}$ и AlN). Центральная часть наплавки, зона сплавления со стороны наплавки и зона сплавления со стороны металла существенно не отличаются по морфологии от поверхности. Количество зерен сложного цемента в стыках зерен и по их границам существенно меньше.

В образцах после наплавки и высокотемпературного отпуска наблюдается равномерное распределение практически всех легирующих элементов (углерода, азота, алюминия, кремния, ванадия, хрома, молибдена, вольфрама) (рис. 4). Это подтверждает предположение о наличии сложного состава цемента типа $(\text{Fe}, \text{Cr}, \text{Al}, \text{W})_3\text{NC}$, что характерно для всех образцов. Количество легирующих элементов (Cr, Mo, W, V, Al, N) колеблется около значения для исходной стали Р18Ю для всех образцов.

Результаты испытаний партии наплавленных валков подтверждают, что выполняются все основные требования к поверхности рабочих валков холодной прокатки.

Говоря о природе упрочнения теплостойких сталей высокой твердости (быстрорежущих сталей), легированных азотом, необходимо отметить, что такие стали еще не получили широкого применения и отсутствуют достаточно полные результаты промышленных испытаний [15]. Содержание азота в быстрорежущих сталях может быть повышено от 0,02 – 0,03 % при выплавке в открытой печи на обычной шихте до 0,08 % в случае плавки с использованием азотистого феррохрома. Роль азота зависит от того, присутствует ли он преимущественно в малорастворимых нитридах или же главным образом в карбонитридных фазах, частично растворяющихся при высоком нагреве. В случае плазменной наплавки в среде азота порошковой проволокой, содержащей алюминий, одновременно с легированием азотом (до 0,06 % N) в наплавленном металле увеличивается содержание алюминия (до 0,65 % Al). Образующиеся дисперсные нитриды алюминия (и возможно нитриды вольфрама, молибдена и хрома) не растворяются даже при высоком нагреве при плазменной наплавке и дополнительно задерживают рост зерна. При отпуске азот выделяется из мартенсита, переходя как в цементитный карбид, так и в карбиды легирующих элементов, возможно, и в виде дисперсных нитридов. Вторичная твердость и теплостойкость немного возрастают, улучшается износостойкость из-за увеличения количества выделяющихся фаз – упрочнителей. При несколь-

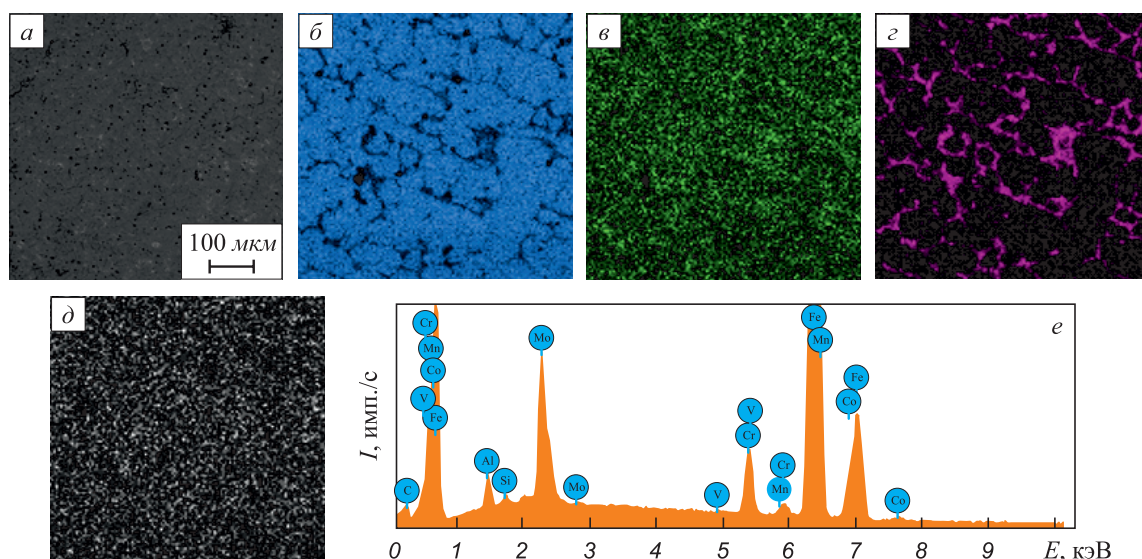


Рис. 4. Электронно-микроскопическое изображение структуры наплавленного покрытия (а – д) и суммарный энергетический спектр (е): а – анализируемая область; б – д – изображения анализируемой области, полученные в характеристических рентгеновских излучениях атомов железа, хрома, молибдена и вольфрама соответственно

Fig. 4. Electron microscopic image of the deposited coating structure (a – d) and total energy spectrum (e): a – analyzed area; б – d – images of the analyzed area obtained in characteristic X-rays of iron, chromium, molybdenum and tungsten atoms, respectively

ко различном механизме влияние азота и углерода на превращения в сталях их воздействие на свойства близко. Углерод и азот, увеличивая количество карбидных и карбонитридных фаз и устойчивость против обратного разупрочнения, повышают преимущественно износостойкость [15, 19, 20].

Проведение высокотемпературного отпуска после многослойной плазменной наплавки по винтовой линии улучшает свойства наплавленного металла (повышается микротвердость, выравнивается ее разброс, ориентированная дендритная структура практически не просматривается, наблюдается равномерное распределение легирующих элементов, уменьшаются внутренние упругие напряжения). Природа упрочнения наплавленного металла высокой твердости достаточно хорошо согласуется с механизмом упрочнения быстрорежущих сталей азотом, изложенной в классической работе Ю.А. Геллера [15].

Выводы

Проведены исследования структурно-фазового состояния наплавленного теплостойкого металла, допол-

нительно легированного алюминием и азотом, в состоянии после многослойной плазменной наплавки и наплавки с высокотемпературным отпуском. Установлено, что в наплавленном материале основными фазами являются твердый раствор α -железа и карбонитриды на основе железа, вольфрама, хрома, молибдена, алюминия ($\text{Fe}_6\text{W}_6\text{NC}$ и AlN). Проведение высокотемпературного отпуска после многослойной плазменной наплавки по винтовой линии улучшает свойства наплавленного металла (повышается микротвердость, выравнивается ее разброс, ориентированная дендритная структура практически не просматривается, наблюдается равномерное распределение легирующих элементов, уменьшаются внутренние упругие напряжения). Уточнена природа упрочнения наплавленного теплостойкого металла высокой твердости, дополнительно легированного азотом и алюминием. Основной эффект упрочнения связан с превращениями при высокотемпературном отпуске. Дополнительное легирование увеличивает количество карбидных и карбонитридных фаз, приводит к образованию мелкодисперсного нитрида алюминия, что, в свою очередь, приводит к увеличению твердости и износостойкости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Mazur I.P. Improvement of consumer properties and stability of the technological process of hot rod stock production // *Materials Science Forum*. 2008. Vol. 575–578. P. 379–384. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.575-578.379>
2. Gonçalves J.L., De Mello J.D.B., Costa H.L. Wear in cold rolling milling rolls: A methodological approach // *Wear*. 2019. Vol. 426–427. Part B. P. 1523–1535. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.12.005>
1. Mazur I.P. Improvement of consumer properties and stability of the technological process of hot rod stock production. *Materials Science Forum*. 2008, vol. 575–578, pp. 379–384. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.575-578.379>
2. Gonçalves J.L., De Mello J.D.B., Costa H.L. Wear in cold rolling milling rolls: A methodological approach. *Wear*. 2019, vol. 426–427, part B, pp. 1523–1535. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.12.005>

3. Gonçalves J.L., De Mello J.D.B., Costa H.L. Tribological behaviour of alternative surface modifications for cold rolling mill rolls // *Wear*. 2021. Vol. 470–471. Article 203614. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203614>
4. De Mello J.D.B., Gonçalves J.L., Costa H.L. Influence of surface texturing and hard chromium coating on the wear of steels used in cold rolling mill rolls // *Wear*. 2013. Vol. 302. No. 1–2. P. 1295–1309. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.02.006>
5. Hou Z.-W., Dong Y.-W., Jiang Z.-H., Yao K.-A., Li Y.-S., Cao Y.-L. Transient simulations and experiments on compound roll produced by electrosag remelting cladding // *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*. 2021. Vol. 52. No. 2. P. 598–610. <https://doi.org/10.1007/s11663-020-02019-z>
6. Kim M.-S., Park K.-S., Kim D.-I., Suh J.-Y., Shim J.-H., Hong K.T., Choi S.-H. Heterogeneities in the microstructure and mechanical properties of high-Cr martensitic stainless steel produced by repetitive hot roll bonding // *Materials Science and Engineering: A*. 2021. Vol. 801. Article 140416. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140416>
7. Barkov L.A., Samodurova M.N., Galkina D.P. Rolling of refractory metals on four-roll passes rolling mills // *International Conference on Industrial Engineering*. 2019. P. 1929–1935. https://doi.org/10.1007/978-3-319-95630-5_207
8. Colombini R., Molinaroli L., Simonetti R., Colombo L.P.M., Manzolini G. Numerical analysis of different designs of roll-bond absorber on PV/T module and performance assessment // *Applied Thermal Engineering*. 2021. Vol. 192. Article 116873. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116873>
9. Aushev A.F., Bedrin A.G., Mironov I.S., Porozhnetov P.N. Device for plasma marking of metal items // *Journal of Optical Technology*. 2003. Vol. 70. No. 4. P. 257–260. <https://doi.org/10.1364/JOT.70.000257>
10. Kartsev S.V. Mathematical model of optimization of controlled parameters of the plasma surfacing technological process of wear-resistant coatings // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2020. Vol. 49. P. 823–828. <https://doi.org/10.3103/S1052618820090095>
11. Konstantinov D., Pustovoytov D., Pesin A. Influence of microstructure on inhomogeneity of stress and strain in the deformation zone during asymmetric cold rolling of ferritic-pearlitic steels // *Procedia Manufacturing*. 2020. Vol. 50. P. 514–519. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.08.093>
12. Konstantinov D., Pesin A., Pustovoytov D. Multiscale simulation of the stress-strain state of low carbon steel strip processed by asymmetric rolling // *Solid State Phenomena*. 2020. Vol. 304. P. 107–112. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.304.107>
13. Neulybin S.D., Schitsyn Y.D., Belinin D.S., Permyakov G.L. Prospects of using plasma surfacing to producing of layered materials // *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*. 2020. Vol. 8. No. 7. P. 3562–3568. <https://doi.org/10.30534/ijeter/2020/111872020>
14. Малушин Н.Н., Валуев Д.В. Обеспечение качества деталей металлургического оборудования на всех этапах их жизненного цикла путем применения плазменной наплавки теплостойкими сталями высокой твердости. Томск: изд. Томского политехнического университета, 2013. 358 с.
15. Геллер Ю.А. Инструментальные стали. М.: Металлургия, 1975. 584 с.
16. Малушин Н.Н., Ковалев А.П., Осетковский В.Л., Никоненко Е.Л., Осетковский И.В. Влияние высокотемпературного отпуска на свойства хромовольфрамового металла высокой твердости, наплавленного плазменной наплавкой в защитно-легирующей среде азота // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2017. Т. 15. № 12. С. 541–546.
17. Малушин Н.Н., Романов Д.А., Ковалев А.П., Осетковский В.Л., Башченко Л.П. Структурно-фазовое состояние теплостойкого сплава высокой твердости, сформированного плазменной на-
3. Gonçalves J.L., De Mello J.D.B., Costa H.L. Tribological behaviour of alternative surface modifications for cold rolling mill rolls. *Wear*. 2021, vol. 470–471, article 203614. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203614>
4. De Mello J.D.B., Gonçalves J.L., Costa H.L. Influence of surface texturing and hard chromium coating on the wear of steels used in cold rolling mill rolls. *Wear*. 2013, vol. 302, no. 1–2, pp. 1295–1309. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.02.006>
5. Hou Z.-W., Dong Y.-W., Jiang Z.-H., Yao K.-A., Li Y.-S., Cao Y.-L. Transient simulations and experiments on compound roll produced by electrosag remelting cladding. *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*. 2021, vol. 52, no. 2, pp. 598–610. <https://doi.org/10.1007/s11663-020-02019-z>
6. Kim M.-S., Park K.-S., Kim D.-I., Suh J.-Y., Shim J.-H., Hong K.T., Choi S.-H. Heterogeneities in the microstructure and mechanical properties of high-Cr martensitic stainless steel produced by repetitive hot roll bonding. *Materials Science and Engineering: A*. 2021, vol. 801, article 140416. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140416>
7. Barkov L.A., Samodurova M.N., Galkina D.P. Rolling of refractory metals on four-roll passes rolling mills. *International Conference on Industrial Engineering*. 2019, pp. 1929–1935. https://doi.org/10.1007/978-3-319-95630-5_207
8. Colombini R., Molinaroli L., Simonetti R., Colombo L.P.M., Manzolini G. Numerical analysis of different designs of roll-bond absorber on PV/T module and performance assessment. *Applied Thermal Engineering*. 2021, vol. 192, article 116873. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116873>
9. Aushev A.F., Bedrin A.G., Mironov I.S., Porozhnetov P.N. Device for plasma marking of metal items. *Journal of Optical Technology*. 2003, vol. 70, no. 4, pp. 257–260. <https://doi.org/10.1364/JOT.70.000257>
10. Kartsev S.V. Mathematical model of optimization of controlled parameters of the plasma surfacing technological process of wear-resistant coatings. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2020, vol. 49, pp. 823–828. <https://doi.org/10.3103/S1052618820090095>
11. Konstantinov D., Pustovoytov D., Pesin A. Influence of microstructure on inhomogeneity of stress and strain in the deformation zone during asymmetric cold rolling of ferritic-pearlitic steels. *Procedia Manufacturing*. 2020, vol. 50, pp. 514–519. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.08.093>
12. Konstantinov D., Pesin A., Pustovoytov D. Multiscale simulation of the stress-strain state of low carbon steel strip processed by asymmetric rolling. *Solid State Phenomena*. 2020, vol. 304, pp. 107–112. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.304.107>
13. Neulybin S.D., Schitsyn Y.D., Belinin D.S., Permyakov G.L. Prospects of using plasma surfacing to producing of layered materials. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*. 2020, vol. 8, no. 7, pp. 3562–3568. <https://doi.org/10.30534/ijeter/2020/111872020>
14. Malushin N.N., Valuev D.V. *Ensuring the Quality of Metallurgical Equipment Parts at all Stages of their Life Cycle by Applying Plasma Surfacing with Heat-Resistant Steels of High Hardness*. Tomsk: Tomsk Polytechnic University, 2013, 358 p. (In Russ.).
15. Geller Yu.A. *Tool Steels*. Moscow: Metallurgiya, 1975, 584 p. (In Russ.).
16. Malushin N.N., Kovalev A.P., Osetkovskii V.L., Nikonenko E.L., Osetkovskii I.V. Influence of high-temperature tempering on the properties of chromium-tungsten metal of high hardness deposited by plasma surfacing in a protective alloying nitrogen medium. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroyenii*. 2017, vol. 15, no. 12, pp. 541–546. (In Russ.).
17. Malushin N.N., Romanov D.A., Kovalev A.P., Osetkovskii V.L., Bashchenko L.P. Structural-phase state of heat-resistant alloy of high hardness is formed by plasma welding in the environment of

плавкой в среде азота и высокотемпературным отпуском // Известия вузов. Физика. 2019. Т. 62. № 10. С. 106–111.

<https://doi.org/10.17223/00213411/62/10/106>

18. Малушин Н.Н., Романов Д.А., Ковалев А.П., Будовских Е.А., Чен Х. Структура быстрорежущего сплава после плазменной наплавки в среде азота и термообработки // Известия вузов. Черная металлургия. 2020. Т. 63. № 9. С. 707–715.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-9-707-715>

19. Батаев В.А., Батаев А.А. Композиционные материалы: строение, получение, применение. Новосибирск: Изд-во Новосибирского государственного технического университета, 2002. 383 с.
20. Кульков С.Н., Гнусов С.Ф. Карбидостали на основе карбидов титана и вольфрама. Томск: НТЛ, 2006. 240 с.

nitrogen and high temperature tempering. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 2019, vol. 62, no. 10, pp. 106–111. (In Russ.).

<https://doi.org/10.17223/00213411/62/10/106>

18. Malushin N.N., Romanov D.A., Kovalev A.P., Budovskikh E.A., Chen X. Structure of high-speed alloy after plasma surfacing in nitrogen and heat treatment. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2020, vol. 63, no. 9, pp. 707–715. (In Russ.).

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-9-707-715>

19. Bataev V.A., Bataev A.A. *Composite Materials: Structure, Production, Application*. Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University, 2002, 383 p. (In Russ.).
20. Kul'kov S.N., Gnyusov S.F. *Carbide Steels Based on Titanium and Tungsten Carbides*. Tomsk: NTL, 2006, 240 p. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Николай Николаевич Малушин, к.т.н, доцент, ведущий инженер кафедры естественнонаучных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет

ORCID: 0000-0003-0762-1793

E-mail: nmalushin@mail.ru

Денис Анатольевич Романов, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник управления научных исследований, Сибирский государственный индустриальный университет

ORCID: 0000-0002-6880-2849

E-mail: romanov_da@physics.sibsiu.ru

Nikolai N. Malushin, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Leading Engineer of the Chair of Science named after V.M. Finkel, Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0003-0762-1793

E-mail: nmalushin@mail.ru

Denis A. Romanov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Chief Researcher of Department of Scientific Researches, Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0002-6880-2849

E-mail: romanov_da@physics.sibsiu.ru

Поступила в редакцию 29.04.2021

После доработки 02.09.2021

Принята к публикации 20.10.2021

Received 29.04.2021

Revised 02.09.2021

Accepted 20.10.2021



Оригинальная статья

УДК 669.535.382:669.17:625.7

DOI 10.17073/0368-0797-2021-12-886-894



ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ РЕЛЬСОВ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

А. А. Юрьев¹, В. Е. Кормышев², В. Е. Громов²,
Ю. Ф. Иванов³, Ю. А. Шлярова²

¹ АО «ЕВРАЗ объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» (Россия, 654043, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, Космическое шоссе, 16)

² Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

³ Институт сильноточной электроники СО РАН (Россия, 634055, Томск, пр. Академический, 2/3)

Аннотация. Выполнен сравнительный количественный анализ физических механизмов упрочнения поверхностных слоев рельсов после экстремально длительной эксплуатации. В основе метода находятся ранее установленные закономерности формирования структурно-фазовых состояний и механических свойств дифференцированно закаленных длинномерных рельсов производства АО «ЕВРАЗ ЗСМК» на глубине до 10 мм в головке рельсов по центральной оси и выкружке после пропущенного тоннажа 1411 млн т. В расчетах были учтены объемные доли и характеристики того или иного типа субструктуры. Увеличение микротвердости и твердости поверхностных слоев рельсов, подвергнутых сверхдлительной эксплуатации на экспериментальном кольце РЖД, носит многофакторный характер и определяется суперпозицией ряда физических механизмов. Оценены вклады, обусловленные трением решетки матрицы, внутрифазными границами, дислокационной субструктурой, присутствием карбидных частиц, внутренними полями напряжений, твердорастворным упрочнением, перлитной составляющей структуры стали. Независимо от направления анализа (вдоль центральной оси головки или вдоль оси симметрии выкружки) прочность металла рельсов зависит от расстояния до поверхности: увеличивается по мере приближения к поверхности головки. Установлены наиболее значимые физические механизмы, которые обеспечивают высокие прочностные свойства металла головки рельсов, подвергнутых экстремально длительной эксплуатации. В подповерхностном слое (расположенном на глубине 2 – 10 мм) головки рельсов наиболее значимым физическим механизмом является дислокационный, обусловленный взаимодействием движущихся дислокаций с неподвижными дислокациями (дислокациями «леса»), а в поверхностном слое головки рельсов – субструктурный, обусловленный взаимодействием дислокаций с малоугловыми границами фрагментов и субзерен нанометрового диапазона. Проведено сравнение с количественными значениями механизмов упрочнения рельсов после пропущенного тоннажа 691,8 млн т. Показано, что увеличение пропущенного тоннажа в интервале 691,8 – 1411 млн т приводит к существенному (в 1,5 – 2,0 раза) повышению прочности.

Ключевые слова: рельсы, поверхностные слои, механизмы упрочнения, длительная эксплуатация, структура, фазовый состав, поверхность катания, выкружка

Финансирование: Анализ структурно-фазового состояния стали выполнен при финансовой поддержке гранта РФФИ (проект № 19-32-60001), анализ механизмов упрочнения выполнен при финансовой поддержке гранта РНФ (проект № 19-19-00183).

Благодарности: Выражаем благодарность Н.А. Поповой за помощь в проведении количественных расчетов механизмов упрочнения.

Для цитирования: Юрьев А.А., Кормышев В.Е., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Шлярова Ю.А. Физическая природа упрочнения поверхности рельсов при длительной эксплуатации // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 12. С. 886–894.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-12-886-894>

Original article

PHYSICAL NATURE OF RAIL SURFACE HARDENING DURING LONG-TERM OPERATION

A. A. Yur'ev¹, V. E. Kormyshev², V. E. Gromov²,
Yu. F. Ivanov³, Yu. A. Shlyarova²

¹ JSC “EVRAZ – Joint West Siberian Metallurgical Plant” (16 Kosmicheskoe Route, Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654043, Russian Federation)

² Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654007, Russian Federation)

³ Institute of High-Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (2/3 Akademicheskii Ave., Tomsk 634055, Russian Federation)

Abstract. A comparative quantitative analysis of the physical mechanisms of hardening of rails surface layers after extremely long-term operation has been performed. The method is based on previously established patterns of formation of structural-phase states and mechanical properties of differentially hardened long-length rails produced by JSC “EVRAZ ZSMK” at a depth of up to 10 mm in the cutting of rails along the central axis and cutting out after the missed tonnage of 1411 million tons. The calculations took into account the volume fractions and characteristics of a particular type of substructure. Increase in microhardness and hardness of the surface layers of the rails subjected to ultra-long operation on the experimental ring of the Russian Railways is multifactorial and is determined by superposition of a number of physical mechanisms. The contributions are estimated due to friction of the matrix lattice, internal phase boundaries, dislocation substructure, presence of carbide particles, internal stress fields, solid hardening, and pearlitic component of the steel structure. Regardless of the analysis direction (along the central axis of the head or along the axis of symmetry of the chip), strength of the rails metal depends on the distance to the surface: it increases as it approaches the top of the head. The most significant physical mechanisms have been established, which provide high strength properties of the metal of the rail head subjected to extremely long-term operation. In the subsurface layer (located at a depth of 2 – 10 mm) of the rail head, the most significant physical mechanisms are dislocation mechanism, due to the interaction of moving dislocations with stationary dislocations (dislocations of the “forest”); in the surface layer of the rail head, substructural mechanism, due to the interaction of dislocations with small-angle boundaries of fragments and subgrains of a nanometer-sized polygon. A comparison with the quantitative values of the rail hardening mechanisms after the missed tonnage of 691.8 million tons was carried out. It is shown that an increase in the missed tonnage in the range of 691.8 – 1411 million tons leads to a significant (1.5 – 2.0 times) increase in strength.

Keywords: rails, surface layers, hardening mechanisms, long-term operation, structure, phase composition, rolling surface, cutting

Funding: The analysis of the structural and phase state of steel was supported by the RFBR grant (project No. 19-32-60001), the analysis of hardening mechanisms was supported by the RNF grant (project No. 19-19-00183).

Acknowledgements: The authors express their gratitude to N.A. Popova for her help in quantitative calculations of hardening mechanisms.

For citation: Yur'ev A.A., Kormyshev V.E., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Shlyarova Yu.A. Physical nature of rail surface hardening during long-term operation. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 12, pp. 887–894. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-12-886-894>

ВВЕДЕНИЕ

Процессы формирования и эволюции структурно-фазовых состояний и свойств поверхностных слоев рельсов при длительной эксплуатации представляют сложный комплекс взаимосвязанных научных и технических вопросов. Важность информации в этой области определяется глубиной понимания фундаментальных проблем физики конденсированного состояния (с одной стороны) и практической значимостью проблемы (с другой стороны) [1].

В последние годы в отечественной и зарубежной литературе подробно освещаются вопросы, связанные с упрочнением и износом рельсов. Доказано, что дефекты износа первоначально формируются в поверхностных слоях, при этом начало постоянного износа совпадает с накоплением определенного уровня пластической деформации другой [2 – 8].

Формирование высоких значений эксплуатационных свойств рельсов должно базироваться на знании механизмов структурно-фазовых изменений по сечению рельсов при их длительной эксплуатации. Выявление таких механизмов возможно лишь при анализе закономерностей эволюции параметров тонкой структуры и оценки вкладов структурных составляющих и дефектной субструктуры в упрочнение рельсов при длительной эксплуатации.

В рельсах при современных скоростях движения железнодорожных составов и высоких контактных давлениях уже при сравнительно небольшом пропущенном тоннаже в поверхностных слоях наблюдается сильное изменение структуры, отмечаются аномально высокая микротвердость и явление распада цементита. В процессе длительной эксплуатации в рельсах накапливаются многочисленные дефек-

ты, что может сопровождаться ухудшением физико-механических свойств и являться причиной выхода рельсов из строя.

Ранее в работах, обобщенных в монографии [9], на основании комплексных количественных исследований структуры, фазового состава, дефектной субструктуры и механических свойств выявлена физическая природа поверхностных слоев дифференцированно закаленных рельсов по центральной оси и по выкружке после пропущенного тоннажа 691,8 млн т. Для объемно закаленных рельсов вклады в упрочнение рельсов после пропущенного тоннажа 500 и 1000 млн т выявлены в работах [1, 10].

Целью настоящей работы является оценка механизмов и установление физической природы упрочнения поверхностных слоев дифференцированно закаленных 100-м рельсов по центральной оси и по выкружке после экстремально длительной эксплуатации на экспериментальном кольце РЖД.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве материала исследования использованы дифференцированно закаленные 100-м рельсы категории ДТ350, изъятые из пути на экспериментальном кольце РЖД после пропущенного тоннажа 1411 млн т брутто.

Методами современного физического материаловедения (оптическая, сканирующая, просвечивающая электронная микроскопия, измерения твердости, микротвердости, трибологических свойств, рентгеноструктурный анализ) проведены комплексные количественные исследования структуры, фазового состава, дефектной субструктуры, трибологических свойств на различном расстоянии от поверхности катания по цент-

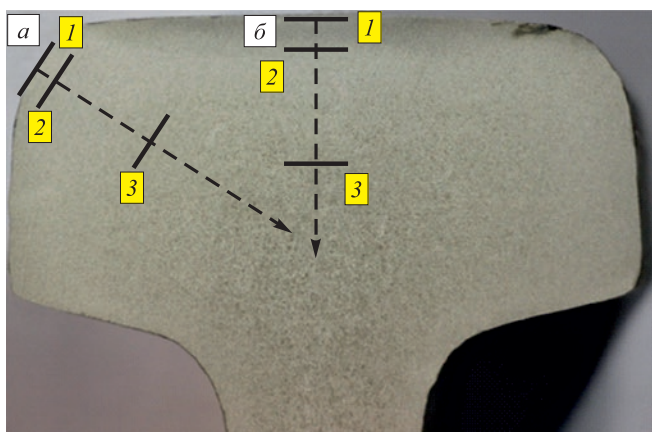


Рис. 1. Схема исследования образцов по выкружке (а) и по центральной оси (б):

1 – поверхность катания; 2 и 3 – слой на расстоянии 2 и 10 мм от поверхности

Fig. 1. Diagram of the samples study along the chip (a) and along the central axis (b):

1 – rolling surface; 2 and 3 – layer at a distance of 2 and 10 mm from the surface

ральной оси и по выкружке [11 – 15]. Схема исследования образцов приведена на рис. 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В работах [11 – 15] измерена твердость по сечению головки в поперечном направлении. Установлено, что твердость HRC на глубине 2 мм составляет 37,1, на глубине 10 и 22 мм – 35,8 и 35,6. Микротвердость на глубине 2 мм достигает 1481 МПа; на глубине 10 мм микротвердость существенно ниже и составляет 1210 МПа.

Такое различие значений микротвердости по толщине обусловлено, очевидно, структурно-фазовыми изменениями металла при эксплуатации рельсов. Представленные в работах [11 – 15] результаты анализа структуры и фазового состава стали свидетельствуют о многофакторном упрочнении материала. Полученные количественные характеристики структуры стали позволяют рассмотреть физическую природу увеличения прочности стали, провести оценку механизмов ее упрочнения и выявить доминирующие механизмы, которые определяют прочность. Так как при определении микротвердости материала невозможно учесть морфологическое и фазовое многообразие структуры стали, то количественную оценку механизмов ее упрочнения проводили по усредненным по объему материала количественным характеристикам (с учетом объемной доли и характеристик того или иного типа субструктуры). Оценки величины механизмов упрочнения осуществляли с использованием широко апробированных выражений [16 – 39].

Упрочнение рельсов, обусловленное пластинчатым перлитом, можно оценить в соответствии с выражением [16, 17]:

$$\sigma(\Pi) = k_y (4,75L)^{-1/2} 0,24V(\Pi),$$

где L – расстояние между пластинами цементита; $V(\Pi)$ – относительное содержание пластинчатого перлита в стали; $k_y = 2 \cdot 10^{-2} \text{ Па} \cdot \text{м}^{1/2}$.

Напряжение, необходимое для поддержания пластической деформации (то есть напряжение течения σ , необходимое для преодоления движущимися дислокациями сил взаимодействия с неподвижными дислокациями (дислокациями «леса»)), связано со скалярной плотностью дислокаций следующим соотношением [16 – 23]

$$\sigma_d = \sigma_0 + \alpha m G b \sqrt{\langle \rho \rangle},$$

где σ_0 – напряжение течения недислокационного происхождения (то есть обусловленное иными механизмами упрочнения); $\langle \rho \rangle$ – средняя (скалярная) плотность дислокаций; m – ориентационный фактор Шмида; $\alpha = 0,10 \div 0,51$ – параметр, характеризующий величину междислокационных взаимодействий [24, 25]; G – модуль сдвига стали ($\approx 80 \text{ ГПа}$); b – вектор Бюргерса дислокации (0,25 нм).

Для сталей с учетом ориентационного множителя m обычно принимают $m\alpha \approx 0,5$.

Эксплуатация рельсов сопровождается формированием в стали внутренних полей напряжений. При исследовании структуры стали методами просвечивающей электронной микроскопии наличие в материале полей напряжений проявляется в появлении на электронно-микроскопических изображениях изгибных контуров экстинкции, которые свидетельствуют о кривизне-кручении кристаллической решетки данного участка фольги [1, 9].

Анализируя изгибные контуры экстинкции, можно указать источники внутренних полей напряжений и их относительную величину, то есть выявить концентраторы напряжений. В результате выполненных исследований установлено, что источниками внутренних полей напряжений являются границы раздела зерен перлита (рис. 2, а, б), зерен перлита и зерен феррита (рис. 2, в). В этом случае контур начинается от границы раздела зерен. Довольно часто источниками полей напряжений являются частицы второй фазы, расположенные по границам и в объеме зерен (рис. 2, з).

Величину пластической $\sigma(\text{пл})$ и упругой $\sigma(\text{упр})$ составляющей внутренних полей напряжений можно оценить, исходя из соотношений [1, 9, 26]:

$$\sigma(\text{пл}) = m\alpha G b \sqrt{\rho_{\pm}};$$

$$\sigma(\text{упр}) = m\alpha G b \chi_{\text{упр}},$$

здесь t – толщина фольги (принята при расчетах 200 нм); $\chi_{\text{упр}}$ – упругая составляющая кривизны-кручения кристаллической решетки.

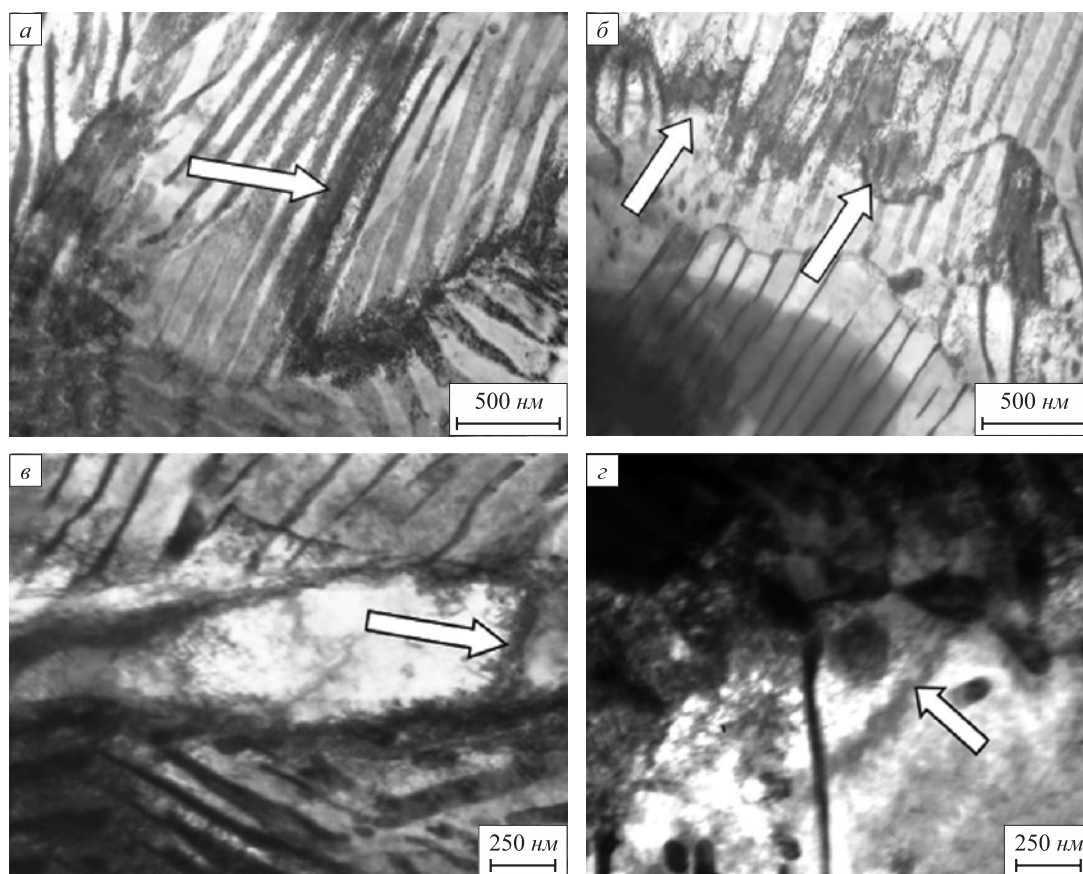


Рис. 2. ПЭМ изображения структуры рельсов (контуры экстинкции указаны стрелками)

Fig. 2. TEM images of the rails structure (arrows indicate the extinction contours)

Величина избыточной плотности дислокаций $\rho_{\pm}$ связана с градиентом кривизны-кручения кристаллической решетки χ через вектор Бюргерса дислокаций b .

Эксплуатация рельсов сопровождается процессами динамического старения стали, что приводит к формированию в материале наноразмерных частиц карбида железа. Частицы карбида железа, размеры которых превышают 5 нм, теряют когерентную связь с кристаллической решеткой α -фазы [16, 27 – 32]. Следовательно, присутствующие в рельсовой стали наноразмерные частицы карбидной фазы, размеры которых превышают 10 нм, являются некогерентными. Некогерентные частицы цементита являются препятствием движению дислокаций, что приводит к упрочнению материала. Оценки упрочнения стали, учитывающие присутствие некогерентных частиц второй фазы, осуществляют с использованием соотношения [33]

$$\sigma_{\text{ч}} = M \frac{mG_m b}{2\pi(|\lambda - D|)} \Phi \ln \left(\left| \frac{\lambda - D}{4b} \right| \right),$$

где λ – среднее расстояние между частицами; D – средний размер частиц; m – ориентационный множитель (для ОЦК материалов 2,75); $\Phi = 1$ для винтовой и

$\Phi = (1 - \nu)^{-1}$ для краевой дислокаций; $M = 0,81 \div 0,85$ – параметр, учитывающий неравномерность распределения частиц в матрице [25].

Эксплуатация рельсов сопровождается формированием в поверхностном слое фрагментированной субструктуры. Упрочнение материала малоугловыми границами (субструктурное упрочнение, упрочнение границами фрагментов), разделяющими фрагменты, можно оценить по выражению [1, 16, 22]

$$\Delta\sigma(L) = \sigma_0 + k^* L^{-m},$$

где $m = 1$ или $1/2$; L – средний размер фрагментов.

Установлено, что при $m = 1$ величина k^* изменяется от 150 до 100 Н/м; при $m = 1/2$ величина k^* изменяется от $2 \cdot 10^{-3}$ до 10^{-2} Па·м^{1/2} [16, 22, 32, 34].

При расчетах принимали $k^* = 150$, $m = 1$.

Величина σ_0 представляет собой напряжение трения кристаллической решетки материала, то есть напряжение, необходимое для движения дислокаций в однофазных «чистых» монокристаллах (монокристаллах, не содержащих примеси). Напряжение σ_0 существенно зависит от степени чистоты и дефектности материала. Для теоретически чистого материала $\sigma_0 = 17$ МПа. Экспериментально определенные значения σ_0 изменяются

в пределах от 27 до 60 МПа [16, 24]. Для сталей обычно $\sigma_0 = 30 \div 40$ МПа [16].

Эксплуатация рельсов сопровождается, как было показано выше, растворением (разрушением) цемента. Высвобождающийся при этом углерод участвует в формировании наноразмерных частиц вторичного цемента, оседает на дефектах структуры и попадает в междоузлия кристаллической решетки стали. Оценку твердорастворного упрочнения стали, обусловленного атомами углерода, осуществляли по эмпирическому выражению [16, 22, 34 – 37]

$$\sigma_{(тв)} = \sum_{i=1}^m (k_i C_i),$$

где k_i – коэффициент упрочнения феррита, представляющий собой изменение прочности при растворении в нем 1 % (по массе) легирующего элемента; C_i – концентрация элемента, растворенного в феррите, % (по массе).

Значение k_i для различных элементов определяется эмпирически [38].

Общий предел текучести стали в первом приближении, основанном на принципе аддитивности, который предполагает независимое действие каждого из механизмов упрочнения материала, можно представить в виде линейной суммы вкладов отдельных механизмов упрочнения [1, 9, 16, 17, 34, 39]:

$$\sigma = \Delta\sigma_0 + \Delta\sigma(L) + \Delta\sigma(\rho) + \Delta\sigma(h) + \Delta\sigma(\text{ч}) + \Delta\sigma(\text{тв}) + \Delta\sigma(\Pi),$$

где $\Delta\sigma_0 = 30$ МПа – вклад, обусловленный трением решетки матрицы [16]; $\Delta\sigma(L)$ – вклад, обусловленный внутрифазными границами; $\Delta\sigma(\rho)$ – вклад, обусловленный дислокационной субструктурой; $\Delta\sigma(\text{ч})$ – вклад, обусловленный присутствием частиц карбидных фаз;

$\Delta\sigma(h)$ – вклад, обусловленный внутренними полями напряжений; $\Delta\sigma(\text{тв})$ – вклад, обусловленный твердорастворным упрочнением; $\Delta\sigma(\Pi)$ – вклад, обусловленный перлитной составляющей структуры стали.

Таким образом, определив количественные характеристики структуры стали, можно в первом приближении осуществить анализ физических механизмов, которые ответственны за эволюцию твердости стали в процессе эксплуатации рельсов, а также выявить физические механизмы формирования градиента твердости рельсовой стали.

Используя результаты количественного анализа структуры стали, представленные в работах [11 – 15], были проведены оценки механизмов упрочнения стали. Результаты приведены в табл. 1.

Можно отметить следующее. Во-первых, прочность стали является величиной многофакторной и определяется совокупным действием ряда физических механизмов. Во-вторых, прочность металла рельсов зависит от расстояния до поверхности головки, независимо от места анализа (вдоль центральной оси или вдоль оси симметрии выкружки), что согласуется с результатами, полученными при определении микротвердости стали. В-третьих, прочность металла рельсов увеличивается по мере приближения к поверхности головки. В-четвертых, основным механизмом упрочнения металла рельсов в подповерхностном слое (расположенном на глубине 2 – 10 мм) головки является дислокационный, обусловленный взаимодействием движущихся дислокаций с неподвижными дислокациями (дислокациями «леса»). В-пятых, в поверхностном слое головки рельсов основным механизмом упрочнения металла является субструктурный, обусловленный взаимодействием дислокаций с малоугловыми границами фрагментов и субзерен нанометрового диапазона.

При анализе полученных результатов следует иметь в виду еще один не учтенный фактор упрочнения: присутствие атомов углерода на дефектах кристаллической решетки.

Т а б л и ц а 1

Оценки механизмов упрочнения металла рельсов после пропущенного тоннажа 1411 млн т

Table 1. Estimates of hardening mechanisms of the rails metal after the missed tonnage of 1411 million tons

Параметр	Значение на расстоянии от поверхности, мм					
	10	2	0	10	2	0
	Поверхность катания			Рабочая выкружка		
$\Delta\sigma(\Pi)$, МПа	142,5	161,5	85,5	152,0	152,0	95,0
$\Delta\sigma(L)$, МПа	0	0	473,3	0	0	1455,6
$\Delta\sigma(\rho)$, МПа	152,8	181,0	181,4	164,0	206,0	190,4
$\Delta\sigma(h)$, МПа	131,3	149,0	255,0	148,6	149,6	230,4
$\Delta\sigma(\text{ч})$, МПа	154,1	148,5	107,0	80,6	222,9	195,0
$\Delta\sigma(\text{тв})$, МПа	11,0	11,0	11,7	11,0	11,0	11,7
$\sigma = \sum_{i=1}^n \sigma_i$, МПа	591,7	651,0	1114,0	556,2	741,5	2178,1

Оценки механизмов упрочнения структуры рельсов после пропущенного тоннажа 691,8 млн т брутто

Table 2. Estimates of hardening mechanisms of the rails structure after missed tonnage of 691.8 million tons gross

Параметр	Значение на расстоянии от поверхности, мм					
	10	2	0	10	2	0
	Поверхность катания			Рабочая выкружка		
$\Delta\sigma(\Pi)$, МПа	165	140	41	165	115	48
$\Delta\sigma(L)$, МПа	0	0	0	0	0	0
$\Delta\sigma(\rho)$, МПа	340	356	363	330	350	375
$\Delta\sigma(h)$, МПа	274	351	356	230	300	320
$\Delta\sigma(\chi)$, МПа	0	0	113	0	0	67
$\Delta\sigma(\tau_b)$, МПа	0	0	133	0	0	133
$\sigma = \sum_{i=1}^n \sigma_i$, МПа	779	847	1006	725	765	943

таллической решетки стали (дислокациях, границах зерен и субзерен). На эту возможность указывают выполненные в работе [9] оценки распределения атомов углерода в структуре стали. Очевидно, что формирование атмосфер и сегрегаций атомов углерода на дефектах кристаллического строения стали будет оказывать влияние на их подвижность, то есть упрочнять материал.

Выполненные ранее оценки механизмов упрочнения рельсов после пропущенного тоннажа 691,8 млн т [9] (табл. 2) позволяют проследить за эволюцией суммарного предела текучести в процессе эксплуатации.

Видно, что увеличение пропущенного тоннажа в процессе эксплуатации в интервале 691,8 – 1411,0 млн т приводит к существенному (в 1,5 – 2,0 раза) повышению суммарного предела текучести. При этом упрочнению подвергается исключительно поверхностный слой металла толщиной не более 2 мм.

Выводы

Выполнен анализ механизмов упрочнения металла головки рельсов после пропущенного тоннажа 1411 млн т вдоль оси симметрии выкружки и вдоль центральной оси (поверхность катания). Показано, что в обоих случаях упрочнение носит многофакторный характер и определяется суперпозицией ряда физических механизмов.

Увеличение микротвердости и твердости рельсовой стали, подвергнутой сверхдлительной эксплуата-

ции, носит многофакторный характер и обусловлено, во-первых, субструктурным упрочнением, вызванным формированием наноразмерных фрагментов, границы которых стабилизированы частицами карбидной фазы; во-вторых, упрочнением наноразмерными частицами карбидной фазы, расположенными в объеме фрагментов и на дислокациях (дисперсионное упрочнение); в-третьих, упрочнением, вносимым внутренними полями напряжений, формирующимися вследствие несовместности деформации соседних зерен, кристаллитов различных фаз, наличием микротрещин.

Наиболее значимыми физическими механизмами, обеспечивающими высокие прочностные свойства металла головки рельсов, подвергнутых экстремально длительной эксплуатации, являются в подповерхностном слое (расположенном на глубине 2 – 10 мм) головки рельсов дислокационный, обусловленный взаимодействием движущихся дислокаций с неподвижными дислокациями (дислокациями «леса»); в поверхностном слое головки рельсов – субструктурный, обусловленный взаимодействием дислокаций с малоугловыми границами фрагментов и субзерен нанометрового диапазона.

Выполнено сравнение механизмов упрочнения рельсов с разным сроком эксплуатации. Увеличение тоннажа в интервале 691,8 – 1411 млн т приводит к почти двухкратному повышению суммарного предела текучести. При этом прочность поверхностного слоя металла выкружки практически в два раза выше прочности поверхности катания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Громов В.Е., Перегудов О.А., Иванов Ю.Ф., Коновалов С.В., Юрьев А.А. Эволюция структурно-фазовых состояний металла рельсов при длительной эксплуатации. Новосибирск: изд-во СО РАН, 2017. 164 с.

1. Gromov V.E., Peregudov O.A., Ivanov Yu.F., Kononov S.V., Yur'ev A.A. *Evolution of Structural-Phase States of Metal Rails during Long-Term Operation*. Novosibirsk: SB RAS, 2017, 164 p. (In Russ.).

2. Ivanisenko Yu., Fecht H.J. Microstructure modification in the surface layers of railway rails and wheels // *Steel Tech.* 2008. Vol. 3. No. 1. P. 19–23.
3. Ivanisenko Yu., Maclaren I., Sauvage X., Valiev R.Z., Fecht H.J. Shear-induced $\alpha \rightarrow \gamma$ transformation in nanoscale Fe–C composite // *Acta Materialia*. 2006. Vol. 54. No. 6. P. 1659–1669. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2005.11.034>
4. Seo J.-W., Jun H.-K., Kwon S.-J., Lee D.-H. Rolling contact fatigue and wear of two different rail steels under rolling-sliding contact // *International Journal of Fatigue*. 2016. Vol. 83. Part 2. P. 184–194. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.10.012>
5. Lewis R., Christoforou P., Wang W.J., Beagles A., Burstow M., Lewis S.R. Investigation of the influence of rail hardness on the wear of rail and wheel materials under dry conditions (ICRI wear mapping project) // *Wear*. 2019. Vol. 430–431. P. 383–392. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.05.030>
6. Skrypnik R., Ekh M., Nielsen J.C.O., Pålsson B.A. Prediction of plastic deformation and wear in railway crossings – Comparing the performance of two rail steel grades // *Wear*. 2019. Vol. 428–429. P. 302–314. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.03.019>
7. Kim D., Quagliato L., Park D., Kim N. Lifetime prediction of linear slide rails based on surface abrasion and rolling contact fatigue-induced damage // *Wear*. 2019. Vol. 420–421. P. 184–194. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.10.015>
8. Huang Y.B., Shi L.B., Zhao X.J., Cai Z.B., Liu Q.Y., Wang W.J. On the formation and damage mechanism of rolling contact fatigue surface cracks of wheel/rail under the dry condition // *Wear*. 2018. Vol. 400–401. P. 62–73. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.12.020>
9. Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Юрьев А.А., Морозов К.В. Дифференцированно-закаленные рельсы: эволюция структуры и свойств в процессе эксплуатации. Новокузнецк: СибГИУ, 2017. 197 с.
10. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Glezer A.M., Peregudov O.A., Morozov K.V. Nature of the structural degradation rail surfaces during operation // *Bulletin of Russian Academy of Sciences: Physics*. 2016. Vol. 80. No. 12. P. 1483–1488. <https://doi.org/10.3103/S1062873816120078>
11. Kormyshev V.E., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Glezer A.M., Yuriev A.A., Semin A.P., Sundeev R.V. Structural phase states and properties of rails after long-term operation // *Materials Letters*. 2020. Vol. 268. Article 127499. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.127499>
12. Кормышев В.Е., Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Юрьев А.А., Полевой Е.В. Структура и свойства дифференцированно закаленных 100-м рельсов после экстремально длительной эксплуатации // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2019. Т. 16. № 4. С. 538–546. <https://doi.org/10.25712/ASTU.1811-1416.2019.04.016>
13. Кормышев В.Е., Полевой Е.В., Юрьев А.А., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф. Формирование структуры дифференцированно закаленных 100-метровых рельсов при длительной эксплуатации // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2020. Т. 63. № 2. С. 108–115. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-2-108-115>
14. Кормышев В.Е., Иванов Ю.Ф., Юрьев А.А., Полевой Е.В., Громов В.Е., Глезер А.М. Эволюция структурно-фазовых состояний и свойств дифференцированно закаленных 100-метровых рельсов при экстремально длительной эксплуатации. Сообщение 1. Структура и свойства рельсовой стали перед эксплуатацией // *Проблемы черной металлургии и материаловедения*. 2019. № 4. С. 50–56.
15. Кормышев В.Е., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Глезер А.М. Структура дифференцированно закаленных рельсов при интенсивной пластической деформации // *Деформация и разрушение материалов*. 2020. № 8. С. 16–20. <https://doi.org/10.31044/1814-4632-2020-8-16-20>
16. Гольдштейн М.И., Фарбер Б.М. Дисперсионное упрочнение стали. М.: Металлургия, 1979. 208 с.
17. Пикеринг Ф.Б. Физическое материаловедение и обработка сталей. М.: Металлургия, 1982. 184 с.
2. Ivanisenko Yu., Fecht H.J. Microstructure modification in the surface layers of railway rails and wheels. *Steel Tech.* 2008, vol. 3, no. 1, pp. 19–23.
3. Ivanisenko Yu., Maclaren I., Sauvage X., Valiev R.Z., Fecht H.J. Shear-induced $\alpha \rightarrow \gamma$ transformation in nanoscale Fe–C composite. *Acta Materialia*. 2006, vol. 54, no. 6, pp. 1659–1669. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2005.11.034>
4. Seo J.-W., Jun H.-K., Kwon S.-J., Lee D.-H. Rolling contact fatigue and wear of two different rail steels under rolling-sliding contact. *International Journal of Fatigue*. 2016, vol. 83, part 2, pp. 184–194. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.10.012>
5. Lewis R., Christoforou P., Wang W.J., Beagles A., Burstow M., Lewis S.R. Investigation of the influence of rail hardness on the wear of rail and wheel materials under dry conditions (ICRI wear mapping project). *Wear*. 2019, vol. 430–431, pp. 383–392. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.05.030>
6. Skrypnik R., Ekh M., Nielsen J.C.O., Pålsson B.A. Prediction of plastic deformation and wear in railway crossings – Comparing the performance of two rail steel grades. *Wear*. 2019, vol. 428–429, pp. 302–314. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.03.019>
7. Kim D., Quagliato L., Park D., Kim N. Lifetime prediction of linear slide rails based on surface abrasion and rolling contact fatigue-induced damage. *Wear*. 2019, vol. 420–421, pp. 184–194. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.10.015>
8. Huang Y.B., Shi L.B., Zhao X.J., Cai Z.B., Liu Q.Y., Wang W.J. On the formation and damage mechanism of rolling contact fatigue surface cracks of wheel/rail under the dry condition. *Wear*. 2018, vol. 400–401, pp. 62–73. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.12.020>
9. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Yur'ev A.A., Morozov K.V. *Differentially Hardened Rails: Evolution of Structure and Properties during Operation*. Novokuznetsk: SibSIU, 2017, 197 p. (In Russ.).
10. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Glezer A.M., Peregudov O.A., Morozov K.V. Nature of the structural degradation rail surfaces during operation. *Bulletin of Russian Academy of Sciences: Physics*. 2016, vol. 80, no. 12, pp. 1483–1488. <https://doi.org/10.3103/S1062873816120078>
11. Kormyshev V.E., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Glezer A.M., Yuriev A.A., Semin A.P., Sundeev R.V. Structural phase states and properties of rails after long-term operation. *Materials Letters*. 2020, vol. 268, article 127499. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.127499>
12. Kormyshev V.E., Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Yur'ev A.A., Polevoi E.V. Structure and properties of differentially quenched 100-m rails after an extremely long-term operation. *Basic Problems of Material Science*. 2019, vol. 16, no. 4, pp. 538–546. (In Russ.). <https://doi.org/10.25712/ASTU.1811-1416.2019.04.016>
13. Kormyshev V.E., Polevoi E.V., Yur'ev A.A., Gromov V.E., Ivanov Yu.F. Formation of the structure of differentially hardened 100M rails during their long operation. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2020, vol. 63, no. 2, pp. 108–115. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-2-108-115>
14. Kormyshev V.E., Ivanov Yu.F., Yur'ev A.A., Polevoi E.V., Gromov V.E., Glezer A.M. Evolution of structural-phase states and properties of differentially hardened 100-meter rails during extremely long operation. Report 1. Structure and properties of rail steel before operation. *Problemy chernoi metallurgii i materialovedeniya*. 2019, no. 4, pp. 50–56. (In Russ.).
15. Kormyshev V.E., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Glezer A.M. Structure of differential hardened rails under severe plastic deformation. *Deformation and Fracture of Materials*. 2020, no. 8, pp. 16–20. (In Russ.). <https://doi.org/10.31044/1814-4632-2020-8-16-20>
16. Gol'dshteyn M.I., Farber B.M. *Dispersion Hardening of Steel*. Moscow: Metallurgiya, 1979, 208 p. (In Russ.).
17. Pickering F. Brian. *Physical Metallurgy and the Design of Steels*. Applied Science Publishers, 1978, 275 p. (Russ. ed.: Pickering F.B. *Fizicheskoe metallovedenie i razrabotka stalei*. Moscow: Metallurgiya, 1982, 182 p.).

18. Предводителей А.А. Современное состояние исследований дислокационных ансамблей. В кн.: Проблемы современной кристаллографии. М.: Наука, 1975. С. 262–275.
19. Friedman L.H., Chhran D.C. Scaling theory of the hall-petch relation for multilayers // *Physical Review Letters*. 1998. Vol. 81. No. 13. Article 2715. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.81.2715>
20. Morito S., Nishikawa J., Maki T. Dislocation density within lath martensite in Fe-C and Fe-Ni alloys // *ISIJ International*. 2003. Vol. 43. No. 9. P. 1475–1477. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.43.1475>
21. Kim J.G., Enikeev N.A., Seol J.B., Abramova M.M., Karavaeva M.V., Valiev R.Z., Park C.G., Kim H.S. Superior strength and multiple strengthening mechanisms in nanocrystalline TWIP steel // *Scientific Reports*. 2018. Vol. 8. Article 11200. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-29632-y>
22. Ganji R.S., Karthik P.S., Rao K.B.S., Rajulapati K.V. Strengthening mechanisms in equiatomic ultrafine grained AlCoCrCuFeNi high-entropy alloy studied by micro- and nanoindentation methods // *Acta Materialia*. 2017. Vol. 125. P. 58–68. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.11.046>
23. Morales E.V., Galeano Alvarez N.J., Morales A.M., Bott I.S. Precipitation kinetics and their effects on age hardening in an Fe–Mn–Si–Ti martensitic alloy // *Materials Science and Engineering: A*. 2012. Vol. 534. P. 176–185. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.11.056>
24. Мак Лин Д. Механические свойства металлов. М.: Металлургия, 1965. 431 с.
25. Embry I.D. Strengthening by dislocations structure // *Strengthening Method in Crystals*. Kelly A., Nicholson R.B. eds. London: Applied Science Publishes, 1971. P. 331–402.
26. Конева Н.А., Козлов Э.В. Физическая природа стадийности пластической деформации. В кн.: Структурные уровни пластической деформации и разрушения / Под ред. В.Е. Панина. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1990. С. 123–186.
27. Yao M.J., Welsch E., Ponge D., Haghighat S.M.H., Sandlöbes S., Choi P., Herbig M., Bleskov I., Hickel T., Lipinska-Chwalek M., Shantraj P., Scheu C., Zaefferer S., Gault B., Raabe D. Strengthening and strain hardening mechanisms in a precipitation-hardened high-Mn lightweight steel // *Acta Materialia*. 2017. Vol. 140. P. 258–273. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2017.08.049>
28. Han Y., Shi J., Xu L., Cao W.Q., Dong H. TiC precipitation induced effect on microstructure and mechanical properties in low carbon medium manganese steel // *Materials Science and Engineering: A*. 2011. Vol. 530. P. 643–651. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.10.037>
29. Silva R.A., Pinto A.L., Kuznetsov A., Bott I.S. Precipitation and grain size effects on the tensile strain-hardening exponents of an API X80 steel pipe after high-frequency hot-induction bending // *Metals*. 2018. Vol. 8. No. 3. Article 168. <https://doi.org/10.3390/met8030168>
30. Morales E.V., Gallego J., Kestenbachz H.-J. On coherent carbonitride precipitation in commercial microalloyed steels // *Philosophical Magazine Letters*. 2003. Vol. 83. No. 2. P. 79–87. <https://doi.org/10.1080/0950083021000056632>
31. Fine M.E., Isheim D. Origin of copper precipitation strengthening in steel revisited // *Scripta Materialia*. 2005. Vol. 53. No. 1. P. 115–118. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2005.02.034>
32. Штремель М.А. Прочность сплавов. Часть II. Деформация. М.: МИСН, 1997. 527 с.
33. Mott N.F., Nabarro F.R.N. An attempt to estimate the degree of precipitation hardening, with a simple model // *Proceedings of the Physical Society*. 1940. Vol. 52. No. 1. P. 86–93. <https://doi.org/10.1088/0959-5309/52/1/312>
34. Бельский Б.З., Фарбер Б.М., Гольдштейн М.И. Оценки прочности малоуглеродистых низколегированных сталей по структурным данным // ФММ. 1975. Т. 39. № 3. С. 403–409.
35. Huthinson B., Hagstrom J., Karlsson O., Lindell D., Tornberg M., Lindberg F., Thuvander M. Microstructures and hardness of as-quenched martensites (0.1–0.5 % C) // *Acta Materialia*. 2011. Vol. 59. No. 14. P. 5845–5858. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2011.05.061>
36. Senkov O.N., Scott J.M., Senkova S.V., Miracle D.B., Woodward C.F. Microstructure and room temperature properties of a
18. Predvoditelev A.A. Current state of research of dislocation ensembles. In: *Problems of Modern Crystallography*. Moscow: Nauka, 1975, pp. 262–275. (In Russ.).
19. Friedman L.H., Chhran D.C. Scaling theory of the hall-petch relation for multilayers. *Physical Review Letters*. 1998, vol. 81, no. 13, article 2715. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.81.2715>
20. Morito S., Nishikawa J., Maki T. Dislocation density within lath martensite in Fe-C and Fe-Ni alloys. *ISIJ International*. 2003, vol. 43, no. 9, pp. 1475–1477. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.43.1475>
21. Kim J.G., Enikeev N.A., Seol J.B., Abramova M.M., Karavaeva M.V., Valiev R.Z., Park C.G., Kim H.S. Superior strength and multiple strengthening mechanisms in nanocrystalline TWIP steel. *Scientific Reports*. 2018, vol. 8, article 11200. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-29632-y>
22. Ganji R.S., Karthik P.S., Rao K.B.S., Rajulapati K.V. Strengthening mechanisms in equiatomic ultrafine grained AlCoCrCuFeNi high-entropy alloy studied by micro- and nanoindentation methods. *Acta Materialia*. 2017, vol. 125, pp. 58–68. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.11.046>
23. Morales E.V., Galeano Alvarez N.J., Morales A.M., Bott I.S. Precipitation kinetics and their effects on age hardening in an Fe–Mn–Si–Ti martensitic alloy. *Materials Science and Engineering: A*. 2012, vol. 534, pp. 176–185. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.11.056>
24. McLean D. *Mechanical Properties of Metals*. John Wiley & Sons, London, 1962, 403 p. (Russ. ed.: McLean D. *Механические свойства металлов*. Moscow: Metallurgiya, 1965, 431 p.).
25. Embry I.D. Strengthening by dislocations structure. In: *Strengthening Method in Crystals*. Kelly A., Nicholson R.B. eds. London: Applied Science Publishes, 1971, pp. 331–402.
26. Koneva N.A., Kozlov E.V. Physical nature of the stages of plastic deformation. In: *Structural Levels of Plastic Deformation and Destruction*. Panin V.E. ed. Novosibirsk: Nauka, 1990, pp. 123–186. (In Russ.).
27. Yao M.J., Welsch E., Ponge D., Haghighat S.M.H., Sandlöbes S., Choi P., Herbig M., Bleskov I., Hickel T., Lipinska-Chwalek M., Shantraj P., Scheu C., Zaefferer S., Gault B., Raabe D. Strengthening and strain hardening mechanisms in a precipitation-hardened high-Mn lightweight steel. *Acta Materialia*. 2017, vol. 140, pp. 258–273. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2017.08.049>
28. Han Y., Shi J., Xu L., Cao W.Q., Dong H. TiC precipitation induced effect on microstructure and mechanical properties in low carbon medium manganese steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2011, vol. 530, pp. 643–651. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.10.037>
29. Silva R.A., Pinto A.L., Kuznetsov A., Bott I.S. Precipitation and grain size effects on the tensile strain-hardening exponents of an API X80 steel pipe after high-frequency hot-induction bending. *Metals*. 2018, vol. 8, no. 3, article 168. <https://doi.org/10.3390/met8030168>
30. Morales E.V., Gallego J., Kestenbachz H.-J. On coherent carbonitride precipitation in commercial microalloyed steels. *Philosophical Magazine Letters*. 2003, vol. 83, no. 2, pp. 79–87. <https://doi.org/10.1080/0950083021000056632>
31. Fine M.E., Isheim D. Origin of copper precipitation strengthening in steel revisited. *Scripta Materialia*. 2005, vol. 53, no. 1, pp. 115–118. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2005.02.034>
32. Shtremel' M.A. *Strength of Alloys. Part II. Deformation*. Moscow: MISIS, 1997, 527 p. (In Russ.).
33. Mott N.F., Nabarro F.R.N. An attempt to estimate the degree of precipitation hardening, with a simple model. *Proceedings of the Physical Society*. 1940, vol. 52, no. 1, pp. 86–93. <https://doi.org/10.1088/0959-5309/52/1/312>
34. Belen'kii B.Z., Farber B.M., Gol'dshtein M.I. Estimates of strength of low-carbon low-alloy steels according to structural data. *FMM*. 1975, vol. 39, no. 3, pp. 403–409. (In Russ.).
35. Huthinson B., Hagstrom J., Karlsson O., Lindell D., Tornberg M., Lindberg F., Thuvander M. Microstructures and hardness of as-quenched martensites (0.1–0.5 % C). *Acta Materialia*. 2011, vol. 59, no. 14, pp. 5845–5858. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2011.05.061>
36. Senkov O.N., Scott J.M., Senkova S.V., Miracle D.B., Woodward C.F. Microstructure and room temperature properties of a

- high-entropy TaNbHfZrTi-Alloy // *Journal of Alloys and Compounds*. 2011. Vol. 509. No. 20. P. 6043–6048.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2011.02.171>
37. Sieurin H., Zander J., Sandström R. Modelling solid solution hardening in stainless steels // *Materials Science and Engineering: A*. 2006. Vol. 415. No. 1–2. P. 66–71.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.09.031>
 38. Vöhringer O., Macherauch E. Struktur und mechanische Eigenschaften von Martensit // *Journal of Heat Treatment and Materials*. 1977. Vol. 32. No. 4. P. 153–168.
<https://doi.org/10.1515/htm-1977-320401>
 39. Прнка Т. Количественные соотношения между параметрами дисперсных выделений и механическими свойствами сталей // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1975. № 7. С. 3–8.
 - high-entropy TaNbHfZrTi-Alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2011, vol. 509, no. 20, pp. 6043–6048.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2011.02.171>
 37. Sieurin H., Zander J., Sandström R. Modelling solid solution hardening in stainless steels. *Materials Science and Engineering: A*. 2006, vol. 415, no. 1–2, pp. 66–71.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.09.031>
 38. Vöhringer O., Macherauch E. Struktur und mechanische Eigenschaften von Martensit. *Journal of Heat Treatment and Materials*. 1977, vol. 32, no. 4, pp. 153–168. (In Germ.).
<https://doi.org/10.1515/htm-1977-320401>
 39. Prnka T. Quantitative relations between parameters of dispersed emissions and mechanical properties of steels. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*. 1975, no. 7, pp. 3–8. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Антон Алексеевич Юрьев, к.т.н., менеджер по управлению продуктами и ресурсами, АО «ЕВРАЗ объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат»

ORCID: 0000-0003-4403-9006

E-mail: ant-yurev@yandex.ru

Василий Евгеньевич Кормышев, к.т.н., старший научный сотрудник Управления научных исследований, Сибирский государственный индустриальный университет

ORCID: 0000-0002-5147-5343

E-mail: 89236230000@mail.ru

Виктор Евгеньевич Громов, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет

ORCID: 0000-0002-5147-5343

E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

Юрий Федорович Иванов, д.ф.-м.н., профессор, ведущий научный сотрудник, Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН

ORCID: 0000-0001-8022-7958

E-mail: yufi55@mail.ru

Юлия Андреевна Шлярова, аспирант кафедры естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет

ORCID: 0000-0001-5677-1427

E-mail: rubannikova96@mail.ru

Anton A. Yur'ev, Cand. Sci. (Eng.), Manager of Product and Resource Management, JSC "EVRAZ – Joint West Siberian Metallurgical Plant"

ORCID: 0000-0003-4403-9006

E-mail: ant-yurev@yandex.ru

Vasilii E. Kormyshev, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of Department of Scientific Researches, Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0002-5147-5343

E-mail: 89236230000@mail.ru

Viktor E. Gromov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Head of the Chair of Science named after V.M. Finkel', Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0002-5147-5343

E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

Yurii F. Ivanov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Chief Researcher, Institute of High Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

ORCID: 0000-0001-8022-7958

E-mail: yufi55@mail.ru

Yuliya A. Shlyarova, Postgraduate of the Chair of Science named after V.M. Finkel', Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0001-5677-1427

E-mail: rubannikova96@mail.ru

ВКЛАД АВТОРОВ

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Юрьев А.А. – подготовка образцов для исследований методом просвечивающей электронной микроскопии, количественная оценка механизмов упрочнения после пропущенного тоннажа 691,8 млн т, обобщение результатов.

Кормышев В.Е. – подготовка образцов для исследований методом просвечивающей электронной микроскопии, количественная оценка механизмов упрочнения после пропущенного тоннажа 1411 млн т, обобщение результатов.

Громов В.Е. – формулирование концепции работы, обсуждение результатов, написание текста статьи.

Иванов Ю.Ф. – проведение электронно-микроскопических исследований, анализ результатов.

Шлярова Ю.А. – обзор литературы, количественная оценка вкладов в упрочнение рельсов, обсуждение результатов.

Yur'ev A.A. – preparation of the samples for research by transmission electron microscopy, quantitative assessment of the hardening mechanisms after missed tonnage of 691.8 million tons, generalization of the results.

Kormyshev V.E. – preparation of the samples for research by transmission electron microscopy, quantitative assessment of hardening mechanisms after missed tonnage of 1,411 million tons, generalization of the results.

Gromov V.E. – concept formulation, discussion of the results, writing.

Ivanov Yu.F. – electron microscopic tests, analysis of the results.

Shlyarova Yu.A. – literature review, quantitative assessment of contributions to rail hardening, discussion of the results.

Поступила в редакцию 16.06.2020

После доработки 29.06.2020

Принята к публикации 11.10.2021

Received 16.06.2020

Revised 29.06.2020

Accepted 11.10.2021



Оригинальная статья

УДК 669.013:658.58

DOI 10.17073/0368-0797-2021-12-895-902



СНИЖЕНИЕ ВНЕПЛАНОВЫХ ПРОСТОЕВ ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РЕМОНТОВ И МОДЕРНИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ ПРОЧНОСТНОГО АНАЛИЗА

Н. А. Чиченев¹, С. М. Горбатюк^{1,2}, Т. Ю. Горовая², А. Н. Фортунатов²¹ Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (Россия, 119049, Москва, Ленинский пр., 4)² Выксунский филиал НИТУ «МИСиС» (Россия, 607060, Нижегородская область, Выксунский район, р. п. Шиморское, ул. Калинина, 206)

Аннотация. С целью выявления узких мест в работе основного технологического оборудования и накопления данных для разработки организационных и технических мероприятий по снижению внеплановых простоев оборудования на АО «Выксунский металлургический завод» ведется их учет. Все простои фиксируются производственным персоналом в системе автоматизированного анализа работы цеха. Специалистами по надежности в цехах классифицированы все агрегаты по категориям критичности, представленные в виде матрицы, включающей в себя две группы показателей. Первая группа – тяжесть последствий: безопасность персонала, безопасность оборудования и окружающей среды, производственные потери, затраты на устранение неполадок. Вторая – вероятность возникновения: высокая, средняя, низкая и очень низкая. При определении оценки критичности единицы оборудования рассматриваются самый критичный случай поломки и самый худший вариант. Классификация оборудования по категориям критичности используется для его ранжирования с точки зрения надежности. Рассмотрены критерии работоспособности деталей машин, а также основные существующие на сегодняшний день программные комплексы для проведения прочностного анализа. Выбраны два, которые будут использоваться в качестве инструментов прочностного анализа. Проведен анализ внеплановых простоев оборудования по причине разрушения деталей на примере колесопрокатного цеха АО «Выксунский металлургический завод», выгруженных из системы автоматического анализа работы цеха. Предложены направления применения выбранных инструментов прочностного анализа, а также проведен прочностной анализ деталей оборудования с целью повышения их конструкционной надежности. Выполнена оценка потенциального экономического эффекта от внедрения инструментов прочностного анализа, который показал целесообразность применения данного инновационного подхода, приводящего к сокращению простоев.

Ключевые слова: металлургическое производство, внеплановые простои оборудования, причины отказов оборудования, критичность отказа, анализ прочности

Благодарности: В статье использованы материалы выпускной квалификационной работы студента гр. ММТО-17-ВФ НИТУ «МИСиС» Беспалова С.И.

Для цитирования: Чиченев Н.А., Горбатюк С.М., Горовая Т.Ю., Фортунатов А.Н. Снижение внеплановых простоев оборудования при проведении ремонтов и модернизации на основе прочностного анализа // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 12. С. 895–902. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-12-895-902>

Original article

REDUCTION OF EQUIPMENT UNPLANNED DOWNTIME DURING REPAIRS AND MODERNIZATION BASED ON STRENGTH ANALYSIS

N. A. Chichenev¹, S. M. Gorbatyuk^{1,2}, T. Yu. Gorovaya², A. N. Fortunatov²¹ National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS) (4 Leninskii Ave., Moscow 119049, Russian Federation)² Vyksa Branch of the National University of Science and Technology “MISIS” (206 Kalinina Str., Shimorskoe, Vyksa District, Nizhny Novgorod Region 607060, Russian Federation)

Abstract. In order to identify bottlenecks in the equipment operation and accumulate data for the development of organizational and technical measures to reduce unplanned equipment downtime, JSC “Vyksa Metallurgical Plant” keeps records of downtime of the main technological equipment. All equipment downtime is recorded by production personnel in the automated analysis system of the workshop. Reliability specialists in the workshops have classified all units into criticality categories, which are presented in the form of a matrix that includes two groups of indicators: 1) severity of the consequences – personnel safety, safety of equipment and environment, production losses, troubleshooting costs; 2) probability of occurrence – high,

medium, low, or very low. When determining the criticality assessment of an equipment unit, the most critical case of equipment failure and the worst one are considered. Classification of equipment by criticality categories is used to rank equipment in terms of reliability. The article considers the criteria for operability of machine parts, as well as the main software complexes for strength analysis that exist today. Two have been selected that will be used as strength analysis tools. The analysis of equipment unplanned downtime due to the destruction of parts was carried out on the example of the wheel rolling shop of JSC "Vyksa Metallurgical Plant", unloaded from the shop automatic analysis system. The authors proposed the directions of application of the selected strength analysis tools and made the strength analysis of equipment parts in order to increase their structural reliability. An assessment of the potential economic effect of introduction of strength analysis tools showed the feasibility of using this innovative approach leading to downtime reduction.

Keywords: metallurgical production, unplanned downtime, failure cause, failure criticality, strength analysis

Acknowledgements: The article considers materials of the final qualifying work of the student S.I. Bespalov.

For citation: Chicheney N.A., Gorbatyuk S.M., Gorovaya T.Yu., Fortunatov A.N. Reduction of equipment unplanned downtime during repairs and modernization based on strength analysis. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 12, pp. 895–902. (In Russ.).

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-12-895-902>

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время надежность технологических машин и оборудования становится одной из основных инженерных проблем и приобретает все более важное значение для металлургического производства [1 – 4]. Недостаточная надежность технологических машин и входящих в них элементов и устройств не только приводит к значительным простоям оборудования, но и существенно увеличивает стоимость их эксплуатации. Повышение требований к качеству технологических машин и оборудования в целях снижения материальных, трудовых и финансовых затрат на техническое обслуживание и ремонт приводит к необходимости модернизации и реконструкции оборудования [5 – 9]. При этом большое внимание уделяется агрегатам по производству листового и профильного проката [10 – 16].

В настоящее время на АО «Выксунский металлургический завод» (ВМЗ) в инженерно-технологическом центре (ИТЦ) отделом по математическому моделированию проводятся расчеты по определению запаса статической прочности и оценки усталостной прочности с использованием системы конечно-элементного анализа ANSYS [17 – 24]. Целью работы является анализ и выявление причин выхода из строя основного технологического оборудования вследствие механического разрушения основных рабочих деталей, узлов и элементов конструкции.

В составе дирекции по ремонтам (ДнР) АО «ВМЗ» есть отдел по проектированию технической документации, который в своей работе использует систему автоматизированного проектирования КОМПАС-3D [25 – 31]. Для сокращения длительности разработки технической документации, а также для выполнения прочностных экспресс-расчетов деталей оборудования в случае необходимости проведения анализа с целью усиления конструкции приобретена сетевая версия системы прочностного анализа APM FEM для КОМПАС-3D.

Основной причиной выбора APM FEM стало то, что в настоящее время на АО «ВМЗ» в качестве системы автоматизированного проектирования уже используется КОМПАС-3D, а APM FEM является дополнительным

модулем для него. Таким образом, нет необходимости в приобретении другой отдельной системы проведения прочностного анализа, что значительно сокращает финансовые затраты. Так же, в случае возникновения необходимости анализа прочности сложных деталей и сборок подготовленная расчетная задача в APM FEM КОМПАС-3D может быть автоматически передана в ANSYS, с которым уже работает отдел по математическому моделированию ИТЦ.

В настоящей работе рассмотрены вопросы снижения внеплановых простоев оборудования и повышения его конструкционной надежности за счет проведения прочностного анализа деталей оборудования с помощью одного из указанных выше инструментов.

ОПИСАНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

С целью выявления узких мест в работе основного технологического оборудования и накопления данных для разработки организационных и технических мероприятий по снижению внеплановых простоев оборудования на АО «ВМЗ» ведется их учет [32]. Все простои фиксируются производственным персоналом в системе автоматизированного анализа работы цеха (СААРЦ). Например, анализ простоев оборудования участка стана колесопрокатного цеха (КПЦ) АО «ВМЗ» с 1 января 2018 г. по 31 октября 2019 г. показал, что суммарное время простоев по механической части составило около 140 ч. При этом примерно 36 ч оборудование участка стана простояло по причине разрушения деталей, связанной с недостаточной конструкционной надежностью.

Поскольку участок стана является узким местом КПЦ, то его внеплановые простои ведут напрямую к снижению объема производимой продукции всего цеха. Экономические потери АО «ВМЗ» от указанных простоев составили около 45 млн руб.

Специалистами по надежности в цехах классифицированы все агрегаты по категориям критичности, которые представлены в таблицах, имеющих следующие колонки: «Цех», «Участок», «Агрегат», «Затраты на устранение», «Производственные потери», «Безопас-

ность оборудования и окружающей среды», «Безопасность персонала», «Вероятность возникновения» и «Оценка критичности, балл». Таблица настроена на автоматический подсчет баллов. Оценка критичности данного оборудования определяется в столбце «Оценка критичности, балл» автоматически, после заполнения всех полей, описанных выше.

Категория критичности определяется на основании матрицы критичности (рис. 1), которая включает в себя две группы показателей:

- тяжесть последствий – безопасность персонала, безопасность оборудования и окружающей среды, производственные потери, затраты на устранение неполадок;

- вероятность возникновения – высокая, средняя, низкая, очень низкая. При определении оценки критичности единицы оборудования (агрегата) рассматривается самый критичный случай поломки оборудования и самый худший вариант.

После проведения количественной оценки критичности самого неблагоприятного вида отказа на каждой единице оборудования все оборудование условно разбивается по категориям критичности исходя из полученной оценки критичности: *A* – 32 балла; *B* – 16 баллов; *C* – 4 ÷ 8 баллов; *D* – 2 балла. Существует также

категория критичности *A+*, к ней относится наиболее критичное оборудование цеха, для чего определяются три единицы оборудования с наибольшей длительностью внеплановых простоев за последние шесть месяцев по диаграмме Парето [33 – 39].

Классификация оборудования по категориям критичности используется для его ранжирования с точки зрения надежности.

Исследование видов, последствий и критичности отказов проводят с целью анализа и доработки конструкции технического объекта, производственного процесса, правил эксплуатации, системы технического обслуживания и ремонта технического объекта для предупреждения возникновения и (или) ослабления тяжести возможных последствий его отказов и для достижения требуемых характеристик безопасности, экологичности, эффективности и надежности.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

С целью снижения внеплановых простоев оборудования и повышения его конструкционной надежности предлагается производить прочностной анализ деталей оборудования с помощью одного из инструментов – ANSYS или APM FEM КОМПАС-3D.

Параметр		Приоритет			
Вероятность возникновения	Высокая	8	16	32	64
	Средняя	4	8	16	32
	Низкая	2	4	8	16
	Очень низкая	1	2	4	8
Тяжесть последствий	Безопасность персонала	Микротравма	Легкая травма	Тяжелая травма	Смертельная травма
	Безопасность оборудования и окружающей среды	Экспертиза – «проведение не требуется»; предписание – «предписаний нет»; экология – «воздействия нет, ПДК не превышены»	Экспертиза – «эксплуатация допускается с нормальными параметрами, но требуется периодическое проведение экспертизы»; предписание – «категория В»; экология – «приближение к граничным параметрам ПДК, есть вероятность возникновения выбросов»	Экспертиза – «эксплуатация с ограниченными параметрами»; предписание – «категория Б»; экология – «разовые превышения ПДК, разовые выбросы, увеличение количества отходов»	Экспертиза – «эксплуатация не допустима»; предписание – «категория А»; экология – «значительное превышение ПДК, опасность для человека»
	Производственные потери	Отказ без потерь производства	Снижение объемов выпуска продукции цехом	Остановка технологической цепочки цеха	Остановка технологической цепочки завода
	Затраты на устранение	Менее 1 % годового бюджета участка	От 1 до 5 % годового бюджета участка	От 5 % годового бюджета участка до 5 % годового бюджета цеха	Более 5 % годового бюджета цеха

Рис. 1. Матрица критичности

Fig. 1. Criticality matrix

Матрица применения инструментов прочностного анализа деталей в случае их разрушения

Matrix of application of tools for parts strength analysis in case of their destruction

Категория критичности оборудования	Разрушение / действие	Инструмент	Специалисты, выполняющие анализ	Выводы / мероприятия
<i>A+</i>	Первичное разрушение / проведение прочностного анализа разрушившейся детали	ANSYS	Отдел по математическому моделированию ИТЦ	Заключение / усиление конструкции, замена материала
<i>A</i>	Первичное разрушение / проведение прочностного анализа разрушившейся детали	ANSYS / APM FEM КОМПАС-3D	Отдел по математическому моделированию ИТЦ / отдел по проектированию технической документации ДпР	Заклучение / усиление конструкции, замена материала
<i>B</i>	Первичное разрушение / проведение прочностного анализа разрушившейся детали	APM FEM КОМПАС-3D	Отдел по проектированию технической документации ДпР	Заклучение / усиление конструкции, замена материала
<i>C, D</i>	Повторное разрушение / проведение прочностного анализа разрушившейся детали на усмотрение специалистов службы надежности	APM FEM КОМПАС-3D	Отдел по проектированию технической документации ДпР	Заклучение / усиление конструкции, замена материала

При отказе оборудования по причине разрушения детали необходимо выполнять прочностной анализ ее конструкционной надежности. Исходя из уровня критичности оборудования, на котором произошел отказ, а также из технических возможностей APM FEM КОМПАС-3D и ANSYS разработана матрица применения данных инструментов прочностного анализа деталей в случае их разрушения, которая представлена в таблице.

При выходе из строя оборудования категории критичности *A+* по причине разрушения детали, которое произошло впервые, необходимо всегда производить прочностной анализ конструкционной надежности данной детали. Поскольку оборудование этой категории имеет повышенную критичность исходя из длительности внеплановых простоев за последние шесть месяцев, то для прочностного анализа требуется инструмент с расширенными возможностями и специалисты, которые специализируются на проведении подобных расчетов. Поэтому в этом случае привлекается отдел по математическому моделированию ИТЦ и прочностной анализ производится в ANSYS. По результатам анализа делается заключение о надежности существующей конструкции, при необходимости выдаются рекомендации по усилению конструкции или замене существующего материала детали на материал с более высокими прочностными характеристиками.

При выходе из строя оборудования категории критичности *A* по причине разрушения детали, которое также произошло впервые, производится прочностной анализ конструкции этой детали. Поскольку оборудование этой категории тоже имеет повышенную критичность исходя из частоты возникновения простоев и тя-

жести последствий для производства, то прочностной анализ также должен производиться отделом по математическому моделированию ИТЦ в ANSYS, но может быть произведен и в APM FEM КОМПАС-3D в зависимости от сложности расчета. Решение принимает начальник отдела по проектированию технической документации ДпР. По результатам анализа делается заключение о надежности существующей конструкции, при необходимости выдаются рекомендации по усилению конструкции или замене существующего материала детали на материал с более высокими прочностными характеристиками.

В случае выхода из строя оборудования категории критичности *B* по причине разрушения детали, которое с данной деталью произошло впервые, должен производиться ее прочностной анализ. Поскольку оборудование этой категории имеет меньшую критичность по сравнению с оборудованием категорий *A* и *A+*, то анализ проводится отделом по проектированию технической документации с применением инструмента APM FEM КОМПАС-3D. По результатам анализа делается заключение о надежности существующей конструкции, а в случае необходимости и возможности разрабатывается чертеж с изменениями в конструкции и заменой существующего материала детали на материал с более высокими прочностными характеристиками.

При выходе из строя оборудования категорий критичности *C* и *D* по причине повторного разрушения одной и той же детали, на усмотрение специалистов службы надежности проводится прочностной анализ данной детали отделом по проектированию технической документации ДпР с применением инструмента APM FEM КОМПАС-3D. По результатам анализа делается

заклучение о надежности существующей конструкции. В случае необходимости и возможности, а также исходя из экономической целесообразности по согласованию со специалистами службы надежности разрабатывается чертеж с изменениями в конструкции и заменой существующего материала детали на материал с более высокими прочностными характеристиками.

Целью расследования отказа оборудования по причине разрушения детали является определение коренной причины разрушения – причины, которая изначально привела к нежелательным явлениям, а в случае своего решения могла бы предотвратить это явление. Основные задачи расследования:

- выявление и незамедлительное устранение причин внеплановых простоев с целью предотвращения повторения подобных простоев в будущем;
- выявление и исправление недостатков в системе управления надежностью оборудования.

Принципы расследования внеплановых простоев:

- все внеплановые простои, независимо от продолжительности, должны регистрироваться;
- своевременность и оперативность расследования;
- полнота, последовательность и объективность расследования;
- разработка предложений по улучшению системы управления надежностью оборудования.

На основании разработанной матрицы применения инструментов прочностного анализа деталей в случае их разрушения предлагается схема расследования отказа оборудования по причине разрушения детали, представленная на рис. 2.

При выходе из строя оборудования по причине разрушения детали, согласно матрице применения ин-

струментов прочностного анализа деталей (см. таблицу) в случае их разрушения, проводится прочностной анализ рассматриваемой детали. Если в результате него выявляется недостаточная конструкционная надежность детали, то в случае технической возможности проводится усиление конструкции, а также замена существующего материала детали на материал с более высокими прочностными характеристиками. Если в результате прочностного анализа гипотеза о недостаточной конструкционной надежности не подтверждается, то рассматриваются другие системные причины, такие как неправильная эксплуатация и неправильное обслуживание. После определения корневой причины делаются соответствующие выводы, разрабатываются мероприятия для предотвращения повторения подобных случаев.

В качестве примера рассмотрим прочностной анализ шпилек крепления крышки сервомотора привода клапана наполнения прессового оборудования КПЦ АО «ВМЗ». По данным СААРЦ, суммарное время простоев прессового оборудования участка стана по вине сервомоторов за указанный период составило 3,6 ч. Простои прессового оборудования возникали по причине течи из-под задней крышки сервомотора привода клапана наполнения вследствие разрушения шпилек крепления крышки. Существующая стратегия технического обслуживания сервомотора – замена по фактическому состоянию. Для проверки прочности существующих шпилек М30 крепления задней крышки сервомотора был проведен их прочностной анализ в программном комплексе КОМПАС-3D с модулем АРМ FEM при эксплуатационной нагрузке – давлении на одну шпильку 16 МПа. Для повышения надежности работы сервомотора было принято решение заменить шпильки крепления задней крышки М30 на М36. Кроме того, изменили стратегию обслуживания сервомоторов – с замены по фактическому состоянию на замену 1 раз в 6 месяцев. Расчеты показали, что с учетом потери производительности участка стана за счет простоев и исключения затрат на приобретение новых сервомоторов, потенциальный экономический эффект от исключения внеплановых простоев КПЦ АО «ВМЗ» по причине выхода из строя сервомотора клапана наполнения составил около 4 млн руб.

Выводы

Предложена схема расследования отказа оборудования по причине разрушения детали, а также основные существующие на сегодняшний день программные комплексы для проведения прочностного анализа. Выбраны два программных комплекса ANSYS и КОМПАС-3D, которые будут использоваться в качестве инструментов прочностного анализа. Проведен анализ внеплановых простоев оборудования по причине разрушения деталей на примере колесопрокатного цеха АО «ВМЗ».



Рис. 2. Схема расследования отказа оборудования по причине разрушения детали

Fig. 2. Research scheme of equipment failure due to the part destruction

Предложены направления применения выбранных инструментов прочностного анализа, а также проведен прочностной анализ деталей оборудования с целью по-

вышения их конструкционной надежности. Выполнена оценка потенциального экономического эффекта от внедрения инструментов прочностного анализа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Майрхофер А., Хартль Ф., Рорхофер А., Штоль К. Мониторинг состояния оборудования при производстве стали // Черные металлы. 2018. № 9. С. 28–33.
2. Gorbatyuk S.M., Pashkov A.N., Morozova I.G., Chicheneva O.N. Technologies for applying Ni-Au coatings to heat sinks of SiC-Al metal matrix composite material // Materials Today: Proceedings. 2021. Vol. 38. Part 4. P. 1889–1893. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.581>
3. Савельев А.Н., Северьянов С.С. Оценка работоспособности агрегатов технологической линии «Машина непрерывного литья заготовок» // Известия вузов. Черная металлургия. 2019. Т. 62. № 12. С. 972–978. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-12-972-978>
4. Еронько С.П., Данилов В.Л., Куклев А.В., Ткачев М.Ю., Тиняков В.В., Мечик С.В. Опыт проектирования и промышленного применения систем механизированной подачи шлакообразующих смесей в кристаллизаторы слабовых МНЛЗ // Металлург. 2020. № 3. С. 51–57.
5. Роберов И.Г., Кохан Л.С., Морозов Ю.А., Борисов А.В. Технологический режим тиснения прокаткой рельефных поверхностей // Известия вузов. Черная металлургия. 2009. № 1. С. 27–30.
6. Жарекен А.Ж., Джумалиев А.С. Реконструкция контура охлаждения обжиговой печи // Горный журнал. 2018. № 5. С. 34–35.
7. Калинин Ю.Н., Каменев А.А., Митькин А.В., Киреевков А.Н. Реконструкция обжиговых машин фабрики окомкования // Горный журнал. 2017. № 5. С. 67–69. <https://doi.org/10.17580/gzh.2017.05.15>
8. Горбатюк С.М., Морозова И.Г., Наумова М.Г. Разработка рабочей модели процесса реиндустриализации производства термической обработки штамповых сталей // Известия вузов. Черная металлургия. 2017. Т. 60. № 5. С. 410–415. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-5-410-415>
9. Горбатюк С.М., Зарапин А.Ю., Чиченев Н.А. Модернизация вибрационного грохота горнорудного общества «Катока» (Ангола) // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 1. С. 143–149. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-1-0-143-149>
10. Нефедов А.В., Свичкар В.В., Чиченева О.Н. Реинжиниринг скипового подъемника для загрузки печи литейного отделения ЗАО «РИФАР» // Сталь. 2020. № 7. С. 50–53.
11. Коряк А.В., Чиченев Н.А. Реинжиниринг ходовой тележки с контейнером дуговой сталеплавильной печи // Сталь. 2020. № 1. С. 36–39.
12. Чиченев Н.А. Реинжиниринг устройства для центрирования слэба в клети обжимного стана // Металлург. 2018. № 7. С. 76–80.
13. Ефремов Д.Б., Степанов В.М., Чиченева О.Н. Модернизация механизма быстрого отжима валков прокатной клети ДУО стана 2800 АО «Уральская Сталь» // Сталь. 2020. № 8. С. 44–47.
14. Masini R., Lainati A. Latest bar mill technology // Millenium Steel. 2005. P. 216–227.
15. Thome R., Harste K. Principles of billet soft-reduction and consequences for continuous casting // ISIJ International. 2006. Vol. 46. No. 12. P. 1839–1844. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.46.1839>
16. Rumyantsev M.I. Some approaches to improve the resource efficiency of production of flat rolled steel // CIS Iron and Steel Review. 2016. Vol. 12. P. 32–36. <https://doi.org/10.17580/cisirs.2016.02.07>
17. Бруйка В.А., Фокин В.Г., Солдусова Е.А., Глазунова Н.А., Адеянов И.Е. Инженерный анализ в ANSYS Workbench: Учебное пособие. Самара: Самарский государственный технический университет, 2010. 271 с.
1. Mayrhofer A., Hartl F., Rohrhofer A., Stohl K. New condition monitoring applications in steelmaking. *Stahl und Eisen*. 2017, vol. 137, no. 11, pp. 147–156. (In Germ.).
2. Gorbatyuk S.M., Pashkov A.N., Morozova I.G., Chicheneva O.N. Technologies for applying Ni-Au coatings to heat sinks of SiC-Al metal matrix composite material. *Materials Today: Proceedings*. 2021, vol. 38, pp. 1889–1893. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.581>
3. Savel'ev A.N., Sever'yanov S.S. Assessment of units' performance of CCM technological line. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019, vol. 62, no. 12. pp. 972–978. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-12-972-978>
4. Eron'ko S.P., Danilov V.L., Kuklev A.V., Tkachev M.Yu., Tinyakov V.V., Mechik S.V. Experience of design and industrial application of systems for the driven feed of slag-forming mixtures into the crystallizers of slab CCM. *Metallurgist*. 2020, vol. 64, no. 3–4, pp. 214–222. <https://doi.org/10.1007/s11015-020-00986-x>
5. Roberov I.G., Kokhan L.S., Morozov Yu.A., Borisov A.V. Relief stamping with grooveless rolling practice. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2009, no. 1, pp. 27–30. (In Russ.).
6. Zhareken A.Zh., Dzhumaliev A.S. Burning furnace cooling circuit refitting. *Gornyi zhurnal*. 2018, no. 5, pp. 34–35. (In Russ.).
7. Kalinenko Yu.N., Kamenev A.A., Mit'kin A.V., Kireenkov A.N. Reengineering of roasting machines at pelletizing factory. *Gornyi zhurnal*. 2017, no. 5, pp. 67–69. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/gzh.2017.05.15>
8. Gorbatyuk S.M., Morozova I.G., Naumova M.G. Development of the working model of production reindustrialization of die steel heat treatment. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2017, vol. 60, no. 5, pp. 410–415. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-5-410-415>
9. Gorbatyuk S.M., Zarapin A.Yu., Chichenev N.A. Reengineering of spiral classifier of Catoca mining company ltd, Angola. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2018, vol. 2018, no. 2, pp. 215–221. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-2-0-215-221>
10. Nefedov A.V., Svichkar V.V., Chicheneva O.N. Re-engineering of equipment to feed the melting furnace with aluminum charge. In: *Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020)*. Radionov A.A., Gasiyarov V.R. eds. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham, 2021, pp. 1198–1204. https://doi.org/10.1007/978-3-030-54817-9_139
11. Koryak A.V., Chichenev N.A. Re-engineering of a running trolley with container in EAF. *Stal'*. 2020, no. 1, pp. 36–39. (In Russ.).
12. Chichenev N.A. Re-engineering of the slab-centering unit of a roughing mill stand. *Metallurgist*. 2018, vol. 62, no. 7–8, pp. 701–706. <https://doi.org/10.1007/s11015-018-0711-1>
13. Efremov D.B., Stepanov V.M., Chicheneva O.N. Modernization of the mechanism for rapid pressing of rolls of the rolling stand of the DUO mill 2800 of Ural Steel JSC. *Stal'*. 2020, no. 8, pp. 44–47. (In Russ.).
14. Masini R., Lainati A. Latest bar mill technology. *Millenium Steel*. 2005. P. 216–227.
15. Thome R., Harste K. Principles of billet soft-reduction and consequences for continuous casting. *ISIJ International*. 2006, vol. 46, no. 12, pp. 1839–1844. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.46.1839>
16. Rumyantsev M.I. Some approaches to improve the resource efficiency of production of flat rolled steel. *CIS Iron and Steel Review*. 2016, vol. 12, pp. 32–36. <https://doi.org/10.17580/cisirs.2016.02.07>
17. Bruyaka V.A., Fokin V.G., Soldusova E.A., Glazunova N.A., Adeyanov I.E. *Engineering Analysis in ANSYS Workbench: Manual*. Samara: SSTU, 2010, 271 p. (In Russ.).

18. Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство. Москва: Едиториал УРСС, 2003. 272 с.
19. Жидков А.В. Применение системы ANSYS к решению задач геометрического и конечно-элементного моделирования. Нижний Новгород: НГУ им. Н.И. Лобачевского, 2006. 115 с.
20. АРМ FEM. Система прочностного анализа для КОМПАС-3D. Версия для КОМПАС-3D V16. Руководство пользователя. Королёв: НТЦ «АИМ», 2015. 28 с.
21. Снитко С.А., Яковченко А.В., Горбатюк С.М. Метод учета остаточных технологических напряжений при моделировании напряженно-деформированного состояния диска железнодорожного колеса. Сообщение 1 // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 5. С. 337–344. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-5-337-344>
22. Ганин Н.Б. Проектирование и прочностной расчет в системе КОМПАС-3D V13: Учебное пособие. М.: ДМК Пресс, 2011. 320 с.
23. Еронько С.П., Данилов В.Л., Ткачев М.Ю., Тиняков В.В., Понамарева Е.А. Модернизация и модельные исследования манипулятора для замены защитной огнеупорной трубы при непрерывной разливке стали // Металлург. 2020. № 4. С. 30–35.
24. Kudashov D.V., Martin U., Heilmaier M., Oettel H. Creep behaviour of ultrafine-grained oxide dispersion strengthened copper prepared by cryomilling // Materials Science and Engineering: A. Vol. 387–389. P. 639–642. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2004.01.118>
25. Gruner W., Kudashov D.V., Martin U. Determination of oxygen species in mechanically alloyed oxide dispersion strengthened copper // Powder Metallurgy. Vol. 45. No. 4. P. 301–306. <https://doi.org/10.1179/003258902225007104>
26. Kudashov D.V., Aksenov A.A., Klemm V., Martin U., Oettel H., Portnoy V.K., Zolotarevskii V.S. Microstructure formations in copper-silicon carbide composites during mechanical alloying in a planetary activator // Materialwissenschaft und Werkstofftechnik. 2000. Vol. 31. No. 12. P. 1048–1055. [http://doi.org/10.1002/1521-4052\(200012\)31:12<1048::AID-MAWE1048>3.0.CO;2-D](http://doi.org/10.1002/1521-4052(200012)31:12<1048::AID-MAWE1048>3.0.CO;2-D)
27. Самусев С.В., Люскин А.В., Романцов А.И., Жигунов К.Л., Fortunatov A.N. Исследование очага деформации на прессе шаговой формовки в условиях Челябинского трубопрокатного завода // Известия вузов. Черная металлургия. 2014. Т. 57. № 3. С. 49–52. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2014-3-49-52>
28. Самусев С.В., Люскин А.В., Романцов А.И., Жигунов К.Л., Fortunatov A.N. Разработка методики расчета параметров инструмента для унификации групп сварных труб на участке кромкогибочных прессов // Известия вузов. Черная металлургия. 2013. № 3. С. 20–22. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2013-3-20-22>
29. El-Sayed T.A., Algash Y.A. Flexural behavior of ultra-high performance geopolymer RC beams reinforced with GFRP bars // Case Studies in Construction Materials. 2021. Vol. 15. Article e00604. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00604>
30. Alshoaibi A.M. Computational simulation of 3D fatigue crack growth under mixed-mode loading // Applied Sciences. 2021. Vol. 11. No. 13. Article 5953. <https://doi.org/10.3390/app11135953>
31. Papukhiev A., Yang Z. Application of the coupled code ATHLET-ANSYS CFX for the simulation of the flow mixing inside the ROCOM test facility // Progress in Nuclear Energy. 2021. Vol. 137. Article 103785. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2021.103785>
32. Инструкция И.20-440.8. Порядок проведения анализа видов, последствий и критичности отказов. Выкса: АО «ВМЗ», 2019. 16 с.
33. Васильев В.А., Каландаришвили Ш.Н., Новиков В.А., Одинокоев С.А. Управление качеством и сертификация: Учебное пособие. Москва: Интернет Инжиниринг, 2002. 413 с.
34. Гродзенский С.Я. Управление качеством: Учебник. Москва: Проспект, 2017. 222 с.
35. Чагина А.В., Большаков В.П. 3D-моделирование в КОМПАС-3D версий v17 и выше: Учебное пособие. Санкт-Петербург: Питер, 2021. 256 с.
18. Kaplun A.B., Morozov E.M., Olfer'eva M.A. ANSYS in Hands of Engineer: Practical guide. Moscow: Editorial URSS, 2003, 272 p. (In Russ.).
19. Zhidkov A.V. Application of ANSYS System to Solving Problems of Geometric and Finite Element Modeling. Nizhny Novgorod: NSU im. N.I. Lobachevskogo, 2006, 115 p. (In Russ.).
20. APM FEM. Strength Analysis System for COMPASS-3D. Version for COMPASS-3D V16 User Manual. Korolev: NTTs "APM", 2015, 28 p. (In Russ.).
21. Snitko S.A., Yakovchenko A.V., Gorbatyuk S.M. Accounting method for residual technological stresses in modeling the stress-deformed state of a railway wheel disk. Report 1. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 5, pp. 337–344. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-5-337-344>
22. Ganin N.B. Design and Strength Calculation in COMPASS-3D V13 System: Manual. Moscow: DMK Press, 2011, 320 p. (In Russ.).
23. Eron'ko S.P., Danilov V.L., Tkachev M.Yu., Tinyakov V.V., Ponomareva E.A. Model studies and modernization of a manipulator for tapping spout replacement in continuous steel casting. *Metallurgist*. 2020, vol. 64, no. 3–4, pp. 301–308. <https://doi.org/10.1007/s11015-020-00996-9>
24. Kudashov D.V., Martin U., Heilmaier M., Oettel H. Creep behaviour of ultrafine-grained oxide dispersion strengthened copper prepared by cryomilling. *Materials Science and Engineering: A*. 2004, vol. 387–389, pp. 639–642. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2004.01.118>
25. Gruner W., Kudashov D.V., Martin U. Determination of oxygen species in mechanically alloyed oxide dispersion strengthened copper. *Powder Metallurgy*. 2002, vol. 45, no. 4, pp. 301–306. <https://doi.org/10.1179/003258902225007104>
26. Kudashov D.V., Aksenov A.A., Klemm V., Martin U., Oettel H., Portnoy V.K., Zolotarevskii V.S. Microstructure formations in copper-silicon carbide composites during mechanical alloying in a planetary activator. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*. 2020, vol. 31, no. 12, pp. 1048–1055. [http://doi.org/10.1002/1521-4052\(200012\)31:12<1048::AID-MAWE1048>3.0.CO;2-D](http://doi.org/10.1002/1521-4052(200012)31:12<1048::AID-MAWE1048>3.0.CO;2-D)
27. Samusev S.V., Lyuskin A.V., Romantsov A.I., Zhigunov K.L., Fortunatov A.N. Research of the deformation zone on stepwise molding press in conditions of JSC "Cherepovets Pipe-Rolling Plant". *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2014, vol. 57, no. 3, pp. 49–52. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2014-3-49-52>
28. Samusev S.V., Lyuskin A.V., Romantsov A.I., Zhigunov K.L., Fortunatov A.N. Calculating tool parameters for standardized welded-pipe groups in edge-bending presses. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2013, vol. 56, no. 5, pp. 20–22. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2013-3-20-22>
29. El-Sayed T.A., Algash Y.A. Flexural behavior of ultra-high performance geopolymer RC beams reinforced with GFRP bars. *Case Studies in Construction Materials*. 2021, vol. 15, article e00604. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00604>
30. Alshoaibi A.M. Computational simulation of 3D fatigue crack growth under mixed-mode loading. *Applied Sciences*. 2021, vol. 11, no. 13, article 5953. <https://doi.org/10.3390/app11135953>
31. Papukhiev A., Yang Z. Application of the coupled code ATHLET-ANSYS CFX for the simulation of the flow mixing inside the ROCOM test facility. *Progress in Nuclear Energy*. 2021, vol. 137, article 103785. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2021.103785>
32. Инструкция И.20-440.8. Procedure for Analyzing Types, Consequences and Criticality of Failures. Vyksa: VMZ, 2019, 16 p. (In Russ.).
33. Vasil'ev V.A., Kalandarishvili Sh.N., Novikov V.A., Odinokov S.A. Quality Management and Certification: Manual. Moscow: Internet Inzhiniring, 2002, 413 p. (In Russ.).
34. Grodzenskii S.Ya. Quality Management: Textbook. Moscow: Prospekt, 2017, 222 p. (In Russ.).
35. Chagina A.V., Bol'shakov V.P. 3D Modeling in COMPASS-3D of Versions v17 and Higher. Manual. St. Petersburg: Piter, 2021, 256 p. (In Russ.).

36. Bilalov R.A., Smetannikov O.Yu. Numerical investigation of fluid dynamics phenomena in external gear pump // *Computational Continuum Mechanics*. 2021. Vol. 13. No. 4. P. 471–480. <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2020.13.4.37>
37. Muszyński Z., Rybak J. Evaluation of terrestrial laser scanner accuracy in the control of hydrotechnical structures // *Studia Geotechnica et Mechanica*. 2017. Vol. 39. No. 4. P. 45–57. <https://doi.org/10.1515/sgem-2017-0036>
38. Rybak J., Baca M., Zyrek T. Practical aspects of tubular pile axial capacity testing // *Int. Multidisc. Sci. GeoConference “Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM”*. 2015. Vol. 2. No. 1. P. 549–554.
39. Anghel C., Gupta K., Jen T.C. Analysis and optimization of surface quality of stainless steel miniature gears manufactured by CO₂ laser cutting // *Optik*. 2020. Vol. 203. Article 164049. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.164049>
36. Bilalov R.A., Smetannikov O.Yu. Numerical investigation of fluid dynamics phenomena in external gear pump. *Computational Continuum Mechanics*. 2021, vol. 13, no. 4, pp. 471–480. (In Russ.). <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2020.13.4.37>
37. Muszyński Z., Rybak J. Evaluation of terrestrial laser scanner accuracy in the control of hydrotechnical structures. *Studia Geotechnica et Mechanica*. 2017, vol. 39, no. 4, pp. 45–57. <https://doi.org/10.1515/sgem-2017-0036>
38. Rybak J., Baca M., Zyrek T. Practical aspects of tubular pile axial capacity testing. *Int. Multidisc. Sci. GeoConference “Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM”*. 2015, vol. 2, no. 1, pp. 549–554.
39. Anghel C., Gupta K., Jen T.C. Analysis and optimization of surface quality of stainless steel miniature gears manufactured by CO₂ laser cutting. *Optik*. 2020, vol. 203, article 164049. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.164049>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Николай Алексеевич Чиченев, д.т.н., профессор кафедры «Инжиниринг технологического оборудования», Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

ORCID: 0000-0002-9019-4675

E-mail: chich38@mail.ru

Сергей Михайлович Горбатюк, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Инжиниринг технологического оборудования», Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Выксунский филиал НИТУ «МИСиС»

ORCID: 0000-0002-4368-5965

E-mail: sgor02@mail.ru

Татьяна Юрьевна Горовая, заместитель директора, Выксунский филиал НИТУ «МИСиС»

E-mail: gorovat@mail.ru

Александр Николаевич Фортунатов, доцент кафедры технологии и оборудования обработки металлов давлением, Выксунский филиал НИТУ «МИСиС»

E-mail: fortan1979@mail.ru

Nikolai A. Chichenev, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair “Engineering of Technological Equipment”, National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS)

ORCID: 0000-0002-9019-4675

E-mail: chich38@mail.ru

Sergei M. Gorbatyuk, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Chair “Engineering of Technological Equipment”, National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS), Vyksa Branch of the National University of Science and Technology “MISIS”

ORCID: 0000-0002-4368-5965

E-mail: sgor02@mail.ru

Tat'yana Yu. Gorovaya, Deputy Director, Vyksa Branch of the National University of Science and Technology “MISIS”

E-mail: gorovat@mail.ru

Aleksandr N. Fortunatov, Assist. Prof. of the Chair “Technology and Equipment for Metal Forming”, Vyksa Branch of the National University of Science and Technology “MISIS”

E-mail: fortan1979@mail.ru

ВКЛАД АВТОРОВ

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Чиченев Н.А. – формирование идеи работы, научное руководство.

Горбатюк С.М. – поиск и анализ опубликованной информации.

Горовая Т.Ю. – формирование цели и задачи исследования, подготовка текста, корректировка выводов.

Фортунатов А.Н. – анализ результатов исследований, формирование выводов, окончательное редактирование текста.

N.A. Chichenev – formation of the article idea, scientific leadership.

S.M. Gorbatyuk – search and analysis of the published information.

T.Yu. Gorovaya – setting the research goal and objectives, preparation of the text, conclusions correction.

A.N. Fortunatov – analysis of research results, conclusions formation, final editing of the text.

Поступила в редакцию 27.07.2021

После доработки 04.10.2021

Принята к публикации 25.11.2021

Received 27.07.2021

Revised 04.10.2021

Accepted 25.11.2021

ИННОВАЦИИ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ
ПРОМЫШЛЕННОМ И ЛАБОРАТОРНОМ
ОБОРУДОВАНИИ, ТЕХНОЛОГИЯХ И МАТЕРИАЛАХINNOVATION IN METALLURGICAL INDUSTRIAL
AND LABORATORY EQUIPMENT, TECHNOLOGIES
AND MATERIALS

Оригинальная статья

УДК 621.771.01:621.77.016.3

DOI 10.17073/0368-0797-2021-12-903-908



ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СМАЗКИ И ФОРМИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ ТРЕНИЯ ПРИ ЛИСТОВОЙ ПРОКАТКЕ

Г. Л. Колмогоров, Т. Е. Мельникова

Пермский национальный исследовательский политехнический университет (Россия, 614990, Пермь, Комсомольский пр., 29)

Аннотация. Одной из основных отраслей металлургической промышленности является обработка металлов давлением. Целью такой обработки является формирование изделий из металлических заготовок простых форм. Важная роль при этом принадлежит технологии листовой прокатки. Решение вопросов, связанных с выбором оптимальных режимов листовой прокатки, является актуальным для специалистов в рассматриваемой области. Процесс прокатки металлоизделий специфичен, так как контактные напряжения могут превышать сопротивление деформации прокатываемого металла в несколько раз. Задачи прогнозирования качества изделий с учетом предупреждения дефектов сплошности листового металла, а также исследования надежности технологических операций процесса прокатки связаны с решением производственных и научных проблем в рассматриваемой области. Отечественными и зарубежными исследователями отмечено значительное влияние внешнего трения в очаге деформирования на технологические параметры процесса прокатки и качество получаемой металлопродукции. Известно, что без внешнего трения между металлом и валком прокатка невозможна. Снижение трения обеспечивает возможность повышения экономических показателей процесса листовой прокатки, а сама технология прокатного производства обладает значительными возможностями для дальнейшего усовершенствования. Моделировать условия трения в зоне деформации позволяет технология листовой прокатки в условиях гидродинамического режима трения. Учет гидродинамического эффекта смазки позволяет оценивать влияние технологических факторов на условия контактного трения при обработке металлов давлением и управлять процессом прокатки. Исследованы закономерности течения жидкой ньютоновской смазки с учетом особенностей геометрии зоны деформации при листовой прокатке. Определена нагнетающая способность смазочного клина, которая позволяет объяснить закономерности влияния смазки на условия трения. В качестве примера представлены результаты расчета давления смазки в зависимости от скорости прокатки. Приведены скорости прокатки, обеспечивающие жидкостный режим трения. Полученные соотношения позволяют оценить влияние контактного трения на технологические параметры процесса листовой прокатки и могут быть использованы в технологических расчетах данного процесса.

Ключевые слова: листовая прокатка, внешнее трение, гидродинамический режим трения, смазка, шероховатость поверхности, контактные напряжения, давление смазки, деформация

Для цитирования: Колмогоров Г.Л., Мельникова Т.Е. Гидродинамический эффект технологической смазки и формирование режимов трения при листовой прокатке // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 12. С. 903–908.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-12-903-908>

Original article

HYDRODYNAMIC EFFECT OF TECHNOLOGICAL LUBRICATION AND FRICTION MODES FORMATION AT SHEET ROLLING

G. L. Kolmogorov, T. E. Mel'nikova

Perm National Research Polytechnic University (29 Komsomolskii Ave., Perm 614990, Russian Federation)

Abstract. One of the main engineering industries is the processing of metals by pressure. Its purpose is the formation of products from metal blanks of simple forms. An important role in this case belongs to the technology of sheet rolling. The solution of issues related to the choice of optimal modes of sheet rolling is relevant for specialists in the field under consideration. The process of rolling metal products is special, since the contact stresses can exceed the deformation resistance of rolled metal by several times. The tasks of predicting the quality of products, taking into account the prevention of sheet metal continuity defects, as well as the study of technological operations reliability of rolling process are associated with the solution of industrial and scientific problems in this area. Domestic and foreign researchers have noted a significant influence of external friction in the deformation center on the technological parameters of rolling process and quality of the resulting metal products. It is known that rolling is impossible without external

friction between metal and roll. The reduction of friction provides an opportunity to increase the economic indicators of sheet rolling, and the rolling production technology itself has significant opportunities for further improvement. Technology of sheet rolling in the conditions of hydrodynamic friction mode allows modeling of friction conditions in the deformation zone. Taking into account the hydrodynamic effect of lubrication allows us to assess the influence of technological factors on the conditions of contact friction during metal pressure treatment and to control the rolling process. Regularities of the flow of liquid Newtonian lubricant are investigated, taking into account features of the deformation zone geometry during sheet rolling. Pumping capacity of the lubricating wedge during rolling is determined, which allows us to explain the regularities of lubrication influence on friction conditions. As an example, the results of calculation of the lubricant pressure depending on the rolling speed are presented. The rolling speeds that provide a liquid friction mode are given. The obtained relations allow us to estimate the influence of contact friction on technological parameters of sheet rolling and can be used in technological calculations of this process

Keywords: sheet rolling, external friction, hydrodynamic mode of friction, lubrication, surface roughness, contact stresses, lubrication pressure, deformation

For citation: Kolmogorov G.L., Mel'nikova T.E. Hydrodynamic effect of technological lubrication and friction modes formation at sheet rolling. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 12, pp. 903–908. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-12-903-908>

ВВЕДЕНИЕ

Оптимизация технологии листовой прокатки является актуальной, так как процесс прокатки металлоизделий специфичен и требует обоснования рациональных технологических параметров процесса и конструктивных параметров оборудования [1–3]. В теории обработки металлов давлением разработаны методы расчетов режимов деформации и силовых параметров, необходимых для осуществления процесса прокатки [4–8].

Следует отметить, что в технологии листовой прокатки большую роль играет внешнее трение между прокатываемой полосой и валками прокатного стана [9–11]. Возникающие при этом контактные напряжения могут превышать сопротивление деформации прокатываемого металла в несколько раз. Высокие контактные давления вызывают изгиб и сплющивание валков, что приводит к необходимости усложнения конструкции станов с целью увеличения жесткости. Даже относительно небольшое изменение коэффициента трения может значительно влиять на силовые условия деформации и качество металлопродукции. Это обстоятельство играет большую роль при прокатке тонких прочных полос, когда при больших диаметрах валков невозможно получение полос меньше минимальной толщины, свойственной рассматриваемым условиям прокатки. Исследованию закономерностей поведения смазок и контактного трения при листовой прокатке посвящены работы отечественных [8–10, 12], а также зарубежных ученых [6, 7, 11, 13–16].

В современной науке о трении предполагается наличие двух основных его видов: граничная смазка; гидродинамическая смазка, при которой полное разделение трущихся поверхностей осуществляется в результате давления, возникающего в слое смазки при относительном движении поверхностей. При обработке металлов давлением реализуются оба режима трения, включая и смешанный режим с элементами обоих видов трения [10, 11, 13–17].

Гидродинамическая смазка предполагает учет гидродинамического эффекта при течении технологической смазки в зазоре между прокатываемой полосой и вал-

ком прокатного стана. Учет гидродинамического эффекта технологической смазки позволяет моделировать условия трения в зоне деформации, оценивать влияние технологических факторов на условия контактного трения при обработке металлов давлением и управлять процессом прокатки [8, 10, 17–20].

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью настоящей работы является анализ поведения ньютоновской смазки в смазочном клине при листовой прокатке.

Внешнее трение оказывает значительное влияние на силовые и энергетические условия деформации при листовой прокатке. Для решения вопроса о возможности формирования условий трения за счет нагнетания смазки в очаг деформации рабочими валками прокатного стана рассмотрим течение смазки в зазоре между рабочим валком и прокатываемой полосой (рис. 1) (где δ – толщина слоя смазки на подкате; a , b – абсциссы крайних точек слоя смазки; ΔH – половина полного обжатия полосы при прокатке). Прокатываемая полоса обжимается валками радиусом R со скоростью V_0 на входе.

При определении закономерностей течения смазки между валком и полосой использованы дифференциальные уравнения Рейнольдса для смазочного слоя [19, 21]:

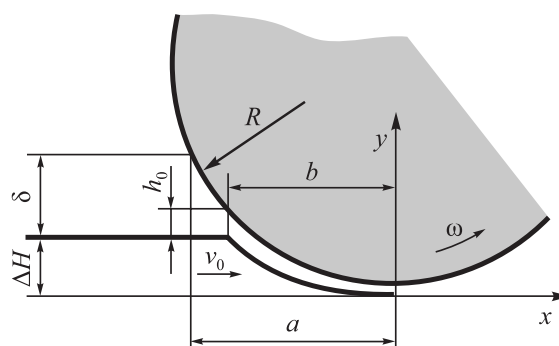


Рис. 1. Схема очага деформации при прокатке

Fig. 1. Scheme of deformation center at rolling

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial x} &= \mu \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2}; \\ \frac{\partial p}{\partial y} &= 0; \\ \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где p – давление в слое смазки; μ – динамическая вязкость смазки; V_x и V_y – составляющие скорости движения смазки в направлении осей x и y .

Из второго уравнения системы (1) следует, что давление смазки по толщине слоя смазки не изменяется, а меняется лишь в направлении прокатки. При решении гидродинамических задач подобного рода обычно принимают $V_y = 0$ и рассматривают лишь составляющую скорости V_x .

Проинтегрировав дважды по оси y первое уравнение из системы (1), получим

$$V_x = \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} y^2 + c_1 y + c_2. \quad (2)$$

Постоянные интегрирования c_1 и c_2 определяются из граничных условий прилипания смазки к поверхностям прокатываемой полосы и вала:

$$V_x|_{y=\Delta H} = V_0; \quad V_x|_{y=y_b} = \omega \sqrt{R^2 - x^2}, \quad (3)$$

где ω – угловая скорость вала; y_b – координата точек поверхности вала.

Из геометрических соотношений (рис. 1) следует, что

$$y_b = h_0 + R - \sqrt{R^2 - x^2}, \quad (4)$$

где h_0 – толщина слоя смазки на входе в очаг деформации.

Определив величины c_1 и c_2 из граничных условий (3), получим распределение скорости течения смазки по толщине смазочного слоя

$$\begin{aligned} V_x &= V_0 + \frac{\omega \sqrt{R^2 - x^2} - V_0}{y_b - \Delta H} (y - \Delta H) + \\ &+ \frac{1}{2\mu} \frac{dp}{dx} (y - y_b)(y - \Delta H). \end{aligned} \quad (5)$$

Градиент давления по длине смазочного слоя dp/dx определяется из условия постоянства расхода смазки

$$q = \int_{\Delta H}^{y_b} V_x dy. \quad (6)$$

После подстановки выражения (5) в соотношение (6), интегрирования и преобразований, принимая $\omega R = V_0$, получим

$$\frac{dp}{dx} = \frac{6\mu V_0 \left[(\bar{y}_b - \Delta \bar{H}) (1 + \sqrt{1 - \bar{x}^2}) - 2\bar{q} \right]}{R^2 (\bar{y}_b - \Delta \bar{H})^2}, \quad (7)$$

где $\bar{y}_b = \frac{y_b}{R} = 1 + \bar{h}_0 - \sqrt{1 - \bar{x}^2}$; $\bar{x} = \frac{x}{R}$; $\bar{h}_0 = \frac{h_0}{R}$; $\Delta \bar{H} = \frac{\Delta H}{R}$; $\bar{q} = \frac{q}{V_0 R}$ – относительный расход смазки.

Поскольку для единицы ширины полосы $q = V_0 h_0$, то $\bar{q} = \bar{h}_0$.

Итак, по соотношениям (5) и (7) определяют закономерности течения технологической смазки в направлении прокатки.

Динамическая вязкость μ смазок определяется давлением в смазочном слое по формуле Баруса [10, 12]:

$$\mu = \mu_0 e^{\alpha p}, \quad (8)$$

где μ_0 – вязкость смазки при атмосферном давлении; α – пьезокэффициент вязкости.

После подстановки соотношения (8) в выражение (7), решения полученного дифференциального уравнения и определения постоянной интегрирования из условия $p|_{\bar{x}=-\bar{a}} = 0$ найдем давление смазки в начале очага деформации:

$$\begin{aligned} p &= -\frac{1}{\alpha} \ln \left[1 - \frac{6\alpha \mu_0 V_0}{R} \times \right. \\ &\times \left. \int_{-\bar{a}}^{\bar{b}} \frac{[(\bar{y}_b - \Delta \bar{H}) (1 + \sqrt{1 - \bar{x}^2}) - 2\bar{q}] d\bar{x}}{(\bar{y}_b - \Delta \bar{H})^3} \right], \end{aligned} \quad (9)$$

где $\bar{a} = \frac{a}{R}$; $\bar{b} = \frac{b}{R}$.

Из геометрических соотношений при этом следует

$$\bar{b} = \sin \left[\arccos (1 - \Delta \bar{H}) \right]. \quad (10)$$

Для реализации режима гидродинамической смазки необходимо достижение давления смазки, достаточного для пластической деформации металла, которое определяется условием пластичности [4, 7]:

$$p_s = 1,15 \sigma_s - \sigma_0, \quad (11)$$

где σ_s – сопротивление деформации прокатываемого металла; σ_0 – возможное при прокатке напряжение пролонгирования.

Рассматривая совместно уравнения (9) и (11), можно определить толщину слоя смазки на входе в очаг деформации. Аналитическое решение системы уравнений (9) и (11) довольно сложное, поэтому получено численное решение. Приведем некоторые результаты расчетов.

При холодной прокатке высокопрочных сталей на стане с радиусом вала 100 мм при $\Delta H = 0,1$ мм со скоростью 10 м/с толщина слоя смазки на входе в очаг деформации составляет 4 мкм, при повышении скорости прокатки до 20 м/с толщина слоя смазки – 8 мкм. Расчеты выполнены для смазки индустриальное масло марки 20 при температуре 20 °С.

Режим трения при прокатке будет определяться соотношением толщины слоя смазки в очаге деформации и приведенного параметра шероховатости поверхностей трения [20]:

$$\lambda = \frac{h_0}{R_q} = \frac{h_0}{(R_{q1} + R_{q2})^{\frac{1}{2}}},$$

где R_{q1} и R_{q2} – среднее квадратичное отклонение профилей поверхности полосы и вала.

В трибологии [16, 17] принято, что при $\lambda < 1,2$ имеет место граничное трение, при $\lambda = 1,2 \div 3,0$ реализуется смешанный режим трения, при $\lambda > 3,0$ реализуется гидродинамический (жидкостной) режим трения.

На рис. 2 представлены результаты расчета давления смазки в зависимости от скорости прокатки при $h_0 = 3$ мкм. В качестве смазки использовали индустриальное масло марки 20 ($\mu_0 = 2 \cdot 10^{-2}$ Н·с/м²) при температуре $t = 50$ °С.

Из результатов (рис. 2) следует, что развиваемое давление смазки возрастает с увеличением скорости прокатки. Повышение скорости прокатки, увеличение радиуса валков, уменьшение обжатия вызывают рост развиваемого давления смазки, согласно выполненным расчетам интенсивный рост давления начинается с $\bar{x} = (-0,2) \div (-0,3)$, при толщине слоя смазки на подкате более $0,02R - \Delta H$ давление практически не увеличивается.

Выполненные гидродинамические расчеты подтверждают известные из практики закономерности влияния

технологических параметров на коэффициент трения при прокатке [9, 22].

Представляет интерес определение скоростей прокатки, обеспечивающих режим гидродинамического (жидкостного) режима трения. Из выражения (9) получаем соотношение для расчета скорости прокатки, при которой обеспечивается гидродинамический (жидкостной) режим трения:

$$V_r = \frac{R}{6\alpha\mu_0 \int_{-\bar{a}}^{-\bar{b}} \frac{[(\bar{y}_b - \Delta\bar{H})(1 + \sqrt{1 - \bar{x}^2}) - 2\bar{q}]}{(\bar{y}_b - \Delta\bar{H})^3} d\bar{x}}. \quad (12)$$

На рис. 3 приведены расчетные зависимости скорости прокатки, обеспечивающей гидродинамический (жидкостной) режим трения, от радиуса валков прокатного стана. Полученные результаты показывают, что при смазке с $\mu_0 = 2 \cdot 10^{-2}$ Н·с/м² существующие скорости не обеспечивают гидродинамического режима трения при холодной прокатке. Однако при благоприятном сочетании параметров процесса можно достичь значительного давления смазки в очаге деформации и приблизить условия трения к гидродинамическому (жидкостному) режиму. Росту давления и уменьшению скорости перехода к жидкостному трению при холодной прокатке способствует увеличение вязкости применяемой смазки.

Таким образом, получены соотношения (формулы расчета толщины смазочного слоя, необходимого для обеспечения гидродинамического режима трения при листовой прокатке; формула для оценки режима трения, который определяется отношением толщины смазочного слоя к приведенному параметру шероховатости трущихся поверхностей), позволяющие рассчитать рациональные технологические параметры для обеспечения эффективного процесса листовой прокатки. Это дает возможность моделировать необходимый режим

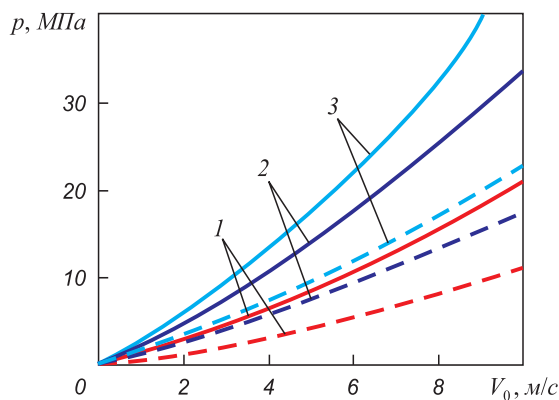


Рис. 2. Зависимость давления смазки от скорости прокатки при радиусе вала 100 (1), 200 (2) и 300 мм (3):
— $\Delta H = 0,1$ мм; ---- $\Delta H = 0,3$ мм

Fig. 2. Dependence of lubricant pressure on rolling speed at the roll radius of 100 (1), 200 (2) and 300 mm (3):
— $\Delta H = 0.1$ mm; ---- $\Delta H = 0.3$ mm

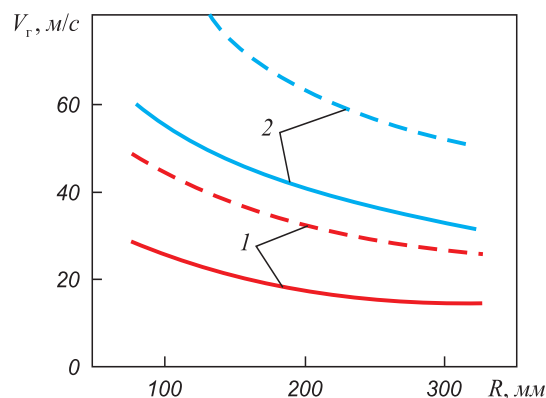


Рис. 3. Скорость прокатки, обеспечивающая жидкостной режим трения:
— $\Delta H = 0,1$ мм; ---- $\Delta H = 0,3$ мм; 1 – $h_0 = 3$ мкм; 2 – $h_0 = 6$ мкм

Fig. 3. Rolling speed providing liquid friction mode:
— $\Delta H = 0.1$ mm; ---- $\Delta H = 0.3$ mm; 1 – $h_0 = 3$ μm; 2 – $h_0 = 6$ μm

трения в очаге деформации при листовой прокатке и может учитываться при теоретическом и численном исследованиях технологических параметров листовой прокатки [23 – 26].

Выводы

Определены закономерности формирования слоя смазки при листовой прокатке с учетом гидродинами-

ческого эффекта технологической смазки. Предложены зависимости для оценки технологического режима трения при листовой прокатке. Полученные соотношения могут быть использованы в технологических расчетах листовой прокатки. Они предоставляют возможность оценить влияние технологических факторов на условия контактного трения при листовой прокатке металлов и позволяют управлять технологическим процессом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Azushima A. *Tribology in Sheet Rolling Technology*. Switzerland: Springer Int. Publ., 2016. <http://doi.org/10.1007/978-3-319-17226-2>
2. Гарбер Э.А., Кожевникова И.А. Теория прокатки. Старый Оскол: Тонкие наукоемкие технологии, 2015. 312 с.
3. Xiao Y., Yao P., Fan K., Zhou H., Deng M., Jin Z. Powder metal-lurgy processed metal-matrix friction materials for space application // *Friction*. 2018. Vol. 6. No. 2. P. 219–229. <http://doi.org/10.1007/s40544-017-0171-9>
4. Kachanov L.M. *Fundamentals of the Theory of Plasticity*. N.Y.: Courier Dover Publ., 2013.
5. Константинов И.Л., Сидельников С.Б. Основы технологических процессов обработки металлов давлением. М.: ИНФРА–М, 2019. 486 с.
6. Avitzur B. *Metal Forming: Processes and Analyses*. N.Y.: McGraw-Hill Book Co., 1968. <https://ccn.loc.gov/2017046173>
7. Wang Z.R., Hu W.L., Yuan S.J., Wang X.S. *Engineering Plasticity Theory and Applications in Metal Forming*. Boston: John Wiley & Sons, 2018. 520 p.
8. Мазур В.Л. Состояние и перспективы развития теории тонко-листовой прокатки // *Обработка материалов давлением*. 2012. № 4 (33). С. 136–141.
9. Грудев А.П., Зильберг Ю.В., Тилик В.Т. Трение и смазки при обработке металлов давлением. М.: Metallurgiya, 1982. 312 с.
10. Колмогоров Г.Л. Гидродинамическая подача смазки при обработке металлов давлением. М.: Metallurgiya, 1986. 168 с.
11. Liu Y. *Friction at Strip-Roll Interface in Cold Rolling*. Wollongong: University of Wollongong, 2002.
12. Кокрофт М.Г. Смазка и смазочные материалы: Смазка в процессах обработки металлов давлением. М.: Metallurgiya, 1970. 111 с.
13. Бартелс Т. и др. Смазки: производство, применение, свойства. СПб.: Профессия, 2010.
14. Dubois A., Abu N.M. Karim. Metal forming and lubrication. In: *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. Oxford: Elsevier Inc., 2016. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.03565-7>
15. Atkins A.G. Hydrodynamic lubrication in cold rolling // *International Journal of Mechanical Sciences*. 1974. Vol. 16. No. 1. P. 1–19. [https://doi.org/10.1016/0020-7403\(74\)90029-0](https://doi.org/10.1016/0020-7403(74)90029-0)
16. Jones W.R., Jansen M.J. Tribology for space applications // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2008. Vol. 222. No. 8. P. 997–1004. <https://doi.org/10.1243/13506501jet305>
17. Тихомиров В.П. и др. Трибология. М.: Купер Бук, 2016. 358 с.
18. Ковалев А.Е., Колмогоров Г.Л. Гидродинамическая подача смазки в процессах обработки давлением. В кн.: *Аннотации докладов Восьмого всероссийского съезда по теоретической и прикладной механике* (г. Пермь, 23 – 29 августа 2001 г.). Екатеринбург: Изд-во ПГТУ, УрО РАН, 2001. С. 331.
19. *Encyclopedia of Tribology*. Wang Q.J., Chung Y.-H. eds. N.Y.: Springer Sciences + Business Media, 2013. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-92897-5>
1. Azushima A. *Tribology in Sheet Rolling Technology*. Switzerland: Springer Int. Publ., 2016. <http://doi.org/10.1007/978-3-319-17226-2>
2. Garber E.A., Kozhevnikova I.A. *Rolling Theory*. Stary Oskol: Tonkie naukoemkie tekhnologii, 2015, 312 p. (In Russ.).
3. Xiao Y., Yao P., Fan K., Zhou H., Deng M., Jin Z. Powder metal-lurgy processed metal-matrix friction materials for space application. *Friction*. 2018, vol. 6, no. 2, pp. 219–229. <http://doi.org/10.1007/s40544-017-0171-9>
4. Kachanov L.M. *Fundamentals of the Theory of Plasticity*. N.Y.: Courier Dover Publ., 2013.
5. Konstantinov I.L., Sidel'nikov S.B. *Fundamentals of Technological Processes of Metal Forming*. Moscow: INFRA–M, 2019, 486 p. (In Russ.).
6. Avitzur B. *Metal Forming: Processes and Analyses*. N.Y.: McGraw-Hill Book Co., 1968. <https://ccn.loc.gov/2017046173>
7. Wang Z.R., Hu W.L., Yuan S.J., Wang X.S. *Engineering Plasticity Theory and Applications in Metal Forming*. Boston: John Wiley & Sons, 2018, 520 p.
8. Mazur V.L. State and development prospects of the theory of strip rolling. *Obrabotka materialov davleniem*. 2012, no. 4 (33), pp. 136–141. (In Russ.).
9. Grudev A.P., Zil'berg Yu.V., Tilik V.T. *Friction and Lubricants in Metal Forming*. Moscow: Metallurgiya, 1982, 312 p. (In Russ.).
10. Kolmogorov G.L. *Hydrodynamic Supply of Lubricant during Metal Forming*. Moscow: Metallurgiya, 1986, 168 p. (In Russ.).
11. Liu Y. *Friction at Strip-Roll Interface in Cold Rolling*. Wollongong: University of Wollongong, 2002.
12. Kokroft M.G. *Lubricants and Lubricant Materials: Lubricant in Metal Forming*. Moscow: Metallurgiya, 1970, 111 p. (In Russ.).
13. Bartels T., etc. *Lubricants: Production, Application, Properties*. St. Petersburg: Professiya, 2010. (In Russ.).
14. Dubois A., Abu N.M. Karim. Metal forming and lubrication. In: *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. Oxford: Elsevier Inc., 2016. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.03565-7>
15. Atkins A.G. Hydrodynamic lubrication in cold rolling. *International Journal of Mechanical Sciences*. 1974, vol. 16, no. 1, pp. 1–19. [https://doi.org/10.1016/0020-7403\(74\)90029-0](https://doi.org/10.1016/0020-7403(74)90029-0)
16. Jones W.R., Jansen M.J. Tribology for space applications. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2008, vol. 222, no. 8, pp. 997–1004. <https://doi.org/10.1243/13506501jet305>
17. Tikhomirov V.P., etc. *Tribology*. Moscow: Kuper Buk, 2016, 358 p. (In Russ.).
18. Kovalev A.E., Kolmogorov G.L. Hydrodynamic supply of lubricant in pressure processing. In: *Abstracts of the 8th All-Russ. Congress on Theoretical and Applied Mechanics (Perm, August 23 – 29, 2001)*. Yekaterinburg: Izd-vo PSTU, UB RAS, 2001, p. 331. (In Russ.).
19. *Encyclopedia of Tribology*. Wang Q.J., Chung Y.-H. eds. N.Y.: Springer Sciences + Business Media, 2013. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-92897-5>

20. Колмогоров Г.Л., Мельникова Т.Е. Гидродинамический эффект технологической смазки при тонколистовой прокатке // Цветные металлы. 2017. № 3. С. 89–93.
<https://doi.org/10.17580/tsm.2017.03.14>
21. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1979.
22. Persson N.J. Sliding Friction. Physical Principles and Applications. Berlin: Springer – Verlag, 2000. 516 p.
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-04283-0>
23. Aljabri A., Jiang Z.Y., Wei D.B., Wang X.D., Tibar H. Modeling of thin strip profile during cold rolling on roll crossing and shifting mill. In: 8th Pacific Rim Int. Congress on Advanced Materials and Processing (PRICM. – 8, 2013). Boston, USA: John Wiley & Sons, 2014. P. 3001–3008. <https://doi.org/10.1002/9781118792148.ch371>
24. Исаевич Л.А., Иваницкий Д.М., Сидоренко М.И. Определение режимов обжатия полос переменной толщины для достижения требуемой размерной точности формообразуемого профиля // Литье и металлургия. 2016. № 1 (82). С. 91–95.
25. Dyi-Cheng Chen. An investigation into the shape rolling of sectioned sheets with internal voids using the finite element method // Procedia Engineering. 2014. Vol. 79. P. 173–178.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.06.327>
26. Shigaki Y., Nakhoul R., Montmitonnet P. Numerical treatments of slipping/no-slip zones in cold rolling of thin sheet with heavy roll deformation // Lubricants. 2015. Vol. 3. No. 2. P. 113–131.
<https://doi.org/10.3390/lubricants3020113>
20. Kolmogorov G.L., Mel'nikova T.E. Hydrodynamic effect of technological lubrication during thin-sheet rolling. *Tsvetnye metally*. 2017, no. 3, pp. 89–93. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17580/tsm.2017.03.14>
21. Loitsyanskii L.G. *Fluid and Gas Mechanics*. Moscow: Nauka, 1979. (In Russ.).
22. Persson N.J. *Sliding Friction. Physical Principles and Applications*. Berlin: Springer – Verlag, 2000, 516 p.
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-04283-0>
23. Aljabri A., Jiang Z.Y., Wei D.B., Wang X.D., Tibar H. Modeling of thin strip profile during cold rolling on roll crossing and shifting mill. In: 8th Pacific Rim Int. Congress on Advanced Materials and Processing (PRICM. – 8, 2013). Boston, USA: John Wiley & Sons, 2014, pp. 3001–3008. <https://doi.org/10.1002/9781118792148.ch371>
24. Isaevich L.A., Ivanitskii D.M., Sidorenko M.I. Determination of compression modes of strips of variable thickness to achieve the required dimensional accuracy of the shaped profile. *Lit'e i metallurgiya*. 2016, no. 1 (82), pp. 91–95. (In Russ.).
25. Dyi-Cheng Chen. An investigation into the shape rolling of sectioned sheets with internal voids using the finite element method. *Procedia Engineering*. 2014, vol. 79, pp. 173–178.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.06.327>
26. Shigaki Y., Nakhoul R., Montmitonnet P. Numerical treatments of slipping/no-slip zones in cold rolling of thin sheet with heavy roll deformation. *Lubricants*. 2015, vol. 3, no. 2, pp. 113–131.
<https://doi.org/10.3390/lubricants3020113>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Герман Леонидович Колмогоров, д.т.н., профессор кафедры «Динамика и прочность машин», Пермский национальный исследовательский политехнический университет
ORCID: 0000-0002-4347-8181
E-mail: dpm@pstu.ru

Татьяна Евгеньевна Мельникова, к.т.н., доцент кафедры «Динамика и прочность машин», Пермский национальный исследовательский политехнический университет
ORCID: 0000-0002-5060-4801
E-mail: taevmel@gmail.com

German L. Kolmogorov, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair “Dynamics and Strength of Machines”, Perm National Research Polytechnic University
ORCID: 0000-0002-4347-8181
E-mail: dpm@pstu.ru

Tat'yana E. Mel'nikova, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair “Dynamics and Strength of Machines”, Perm National Research Polytechnic University
ORCID: 0000-0002-5060-4801
E-mail: taevmel@gmail.com

Поступила в редакцию 08.10.2020
После доработки 19.11.2020
Принята к публикации 25.02.2021

Received 08.10.2020
Revised 19.11.2020
Accepted 25.02.2021



Краткое сообщение

УДК 621.926.323

DOI 10.17073/0368-0797-2021-12-909-911



МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЛИЧЕСТВА УПОРОВ, РАСПОЛОЖЕННЫХ НА ВАЛКЕ ОДНОВАЛКОВОЙ ДРОБИЛЬНОЙ МАШИНЫ

А. Г. Никитин, Ю. А. Епифанцев, К. С. Медведева

Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. В металлургической промышленности примерно 40 % энергии, затрачиваемой на подготовку руды для дальнейшего передела, приходится на процессы дробления, которые осуществляются на дробильных машинах. Известный энергоэффективный способ дробления в одновалковой дробильной машине с гладкими валками обладает существенным недостатком (малой производительностью), обусловленным ограниченной степенью дробления. С целью увеличения производительности одновалковые дробильные машины оснащаются упорами на валке, которые обеспечивают принудительную подачу разрушаемого материала в зону дробления. На валке следует устанавливать максимально возможное количество упоров, при этом должно выполняться условие гарантированной подачи куска дробимого материала в зону разрушения. Разработанная математическая модель позволяет рассчитать максимально возможное количество упоров, обеспечивающее гарантированный захват исходного куска в зону разрушения.

Ключевые слова: металлургическое оборудование, одновалковая дробильная машина, кусок, сложное напряженное состояние, валок, упор, дробление

Для цитирования: Никитин А.Г., Епифанцев Ю.А., Медведева К.С. Математическая модель определения количества упоров, расположенных на валке одновалковой дробильной машины // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 12. С. 909–911.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-12-909-911>

Short report

MATHEMATICAL MODEL FOR DETERMINING THE NUMBER OF STOP BLOCKS ON THE ROLL OF A SINGLE-ROLL CRUSHING MACHINE

A. G. Nikitin, Yu. A. Epifantsev, K. S. Medvedeva

Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654007, Russian Federation)

Abstract. The well-known energy-efficient method of crushing in a single-roll crushing machine with smooth rolls, in which a complex stress state is created in the destroyed piece, has a significant disadvantage – low productivity due to a limited degree of crushing. In order to increase productivity, single-roll crushing machines are equipped with stop blocks on the roll, which ensure the forced supply of the destroyed material to the crushing zone. The maximum possible number of stop blocks should be installed on the roll, and the condition of guaranteed feeding of the piece into the fracture zone must be met. The developed mathematical model allows one to calculate the maximum possible number of stop blocks, which ensures guaranteed nipping of the original piece into the destruction zone.

Keywords: metallurgical equipment, single-roll crusher, piece, complex stress state, roll, stop block, crushing

For citation: Nikitin A.G., Epifantsev Yu.A., Medvedeva K.S. Mathematical model for determining the number of stop blocks on the roll of a single-roll crushing machine. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 12, pp. 909–911. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-12-909-911>

В металлургической промышленности примерно 40 % энергии, затрачиваемой на подготовку руды для дальнейшего передела, приходится на процессы дробления, которые осуществляются на дробильных ма-

шинах, в том числе на валковых [1 – 5]. Известный энергоэффективный способ дробления материалов в одновалковой дробильной машине с гладкими валками обладает существенным недостатком – малой про-

изводительностью, обусловленной ограниченной степенью дробления [6].

В Сибирском государственном университете разработана и запатентована конструкция одновалковой дробилки с принудительной подачей разрушаемого материала в зону дробления, в которой захват дробимого куска происходит за счет упора, расположенного на валке (см. рисунок). При этом соблюдается условие формирования в измельчаемом куске сложного напряженного состояния [7].

С целью увеличения производительности одновалковой дробилки с упором на валке следует устанавливать максимально возможное количество упоров, так как производительность дробилки определяется количеством разрушенных исходных кусков дробимого материала за один оборот валка. Количество упоров на валке ограничено двумя факторами: размером исходных кусков и скоростью вращения валка.

Расчет ведется с предположением, что куски дробимого материала максимально допустимого размера d подаются из питателя один за другим без зазора. Расстояние между рабочей поверхностью последующего упора и задней поверхностью предыдущего упора должно быть больше размера дробимого куска d , чтобы этот кусок касался образующей поверхности валка. Однако в процессе поворота валка кусок дробимого материала должен коснуться образующей поверхности.

Время, за которое кусок дробимого материала из питателя достигает образующей поверхности валка [8], определяется по формуле $t = \sqrt{\frac{2h}{g}}$ (где $h = d$ – высота, с которой падает кусок дробимого материала до обра-

зующей поверхности валка; g – ускорение свободного падения).

За это время валок должен повернуться на угол $\varphi = \omega t$ (где $\omega = \frac{\pi n}{30}$ – угловая скорость вращения валка) и пройти расстояние ΔS , необходимое для того, чтобы кусок дробимого материала из питателя достиг образующей поверхности валка до встречи с рабочей поверхностью последующего упора. Это расстояние определяется по формуле

$$\Delta S = D \cos\left(\frac{\pi - \varphi}{2}\right) = D \cos\left(\frac{\pi - \omega t}{2}\right) = D \cos\left(\frac{\pi - \frac{\pi n}{30} \sqrt{\frac{2d}{g}}}{2}\right), \quad (1)$$

где D – диаметр валка.

Очевидно, что расстояние ΔS больше размера дробимого исходного куска, поэтому расчет количества упоров ведется по значению

$$k = \frac{\pi D}{\Delta S + b}, \quad (2)$$

где b – ширина упора.

Например, рассмотрим дробилку со следующими характеристиками: $D = 1000$ мм; $d = 100$ мм; $b = 30$ мм; $n = 60$ об/мин. Эти характеристики обеспечивают линейную скорость валка 3,14 м/с, рекомендуемую для устойчивой работы валковой дробилки [9]. В этом случае количество упоров, вычисленное по формуле (2), равно 6,73 и после округления в меньшую сторону (причем округление всегда ведется в меньшую сторону для гарантированного попадания куска в зазор между упорами) принимается равным 6.

Из совместного анализа уравнений (1) и (2) следует, что увеличение диаметра и числа оборотов валка не приводит к росту производительности, так как их увеличение приводит также к увеличению линейной скорости, что отрицательно сказывается на устойчивости работы дробилки. Увеличение диаметра и числа оборотов валка также не приводит к увеличению расстояния между упорами (при увеличении расстояния между упорами уменьшается количество упоров, которые можно установить на валке). Параметры дробилки следует устанавливать в каждом конкретном случае в зависимости от требований к фракционному составу готового продукта [10].

Выводы

С целью увеличения производительности одновалковые дробильные машины оснащаются упорами на валке, которые обеспечивают принудительную подачу разрушаемого материала в зону дробления. На валке

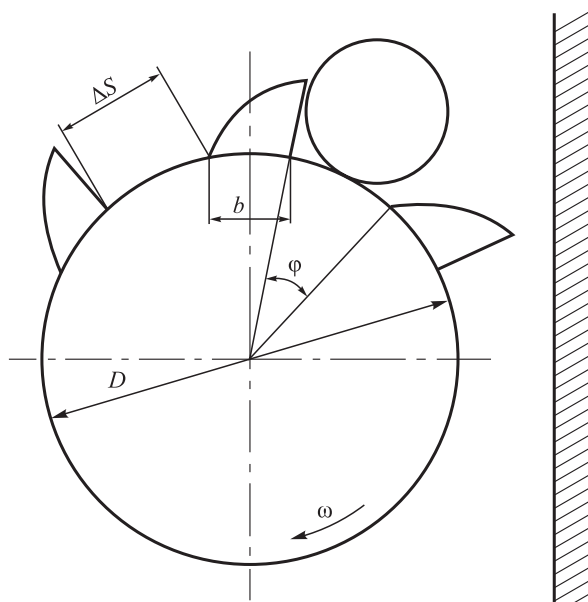


Схема расчета количества упоров на валке

Scheme for calculating the number of stop blocks on the roll

следует устанавливать максимально возможное количество упоров. Разработанная математическая модель позволяет рассчитать максимально возможное коли-

чество упоров, обеспечивающее гарантированный захват исходного куска дробимого материала в зону разрушения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Austin L.G., Van Orden D., Pérez J.W. A preliminary analysis of smooth roll crushers // *International Journal of Mineral Processing*. 1980. Vol. 6. No. 4. P. 321–336.
[https://doi.org/10.1016/0301-7516\(80\)90028-9](https://doi.org/10.1016/0301-7516(80)90028-9)
2. Egbe E.A.P., Olugboji O.A. Design, fabrication and testing of a double roll crusher // *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*. 2016. Vol. 35. No. 11. P. 511–515.
<https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V35P303>
3. Zhao L.L., Wang Z.B., Zang F. Multi-object optimization design for differential and grading toothed roll crusher using a genetic algorithm // *Journal of China University of Mining and Technology*. 2008. Vol. 18. No. 2. P. 316–320.
[https://doi.org/10.1016/S1006-1266\(08\)60067-X](https://doi.org/10.1016/S1006-1266(08)60067-X)
4. Rogers R.S.C. Closed form analytical solutions for models of closed circuit roll crushers // *Powder Technology*. 1982. Vol. 32. No. 1. P. 125–127. [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(82\)85013-4](https://doi.org/10.1016/0032-5910(82)85013-4)
5. Масленников В.А. Дробилки, разрушающие материал сжатием // *Известия вузов. Горный журнал*. 1996. № 10–11. С. 124–138.
6. Сахаров Д.Ф. Анализ процесса дробления хрупких материалов в одновалковой дробилке с целью повышения энергоэффективности: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук: Новокузнецк, 2011. 17 с.
7. Никитин А.Г., Епифанцев Ю.А., Медведова К.С., Герике П.Б. Силовой анализ процесса разрушения хрупких материалов в одновалковой дробильной машине с упором на валке // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2019. Т. 62. № 4. С. 303–307.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-4-303-307>
8. Meriam J.L., Kraige L.G. *Engineering Mechanics*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2012. 550 p.
9. Целиков А.И. Машины и агрегаты металлургических заводов. Т. 1. М.: Машиностроение, 1987. 440 с.
10. Никитин А.Г., Епифанцев Ю.А., Медведова К.С., Герике П.Б., Фастыковский А.Р. Экспериментальное исследование фракционного состава кусков хрупкого материала при дроблении в одновалковой дробилке с упором на валке // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2020. Т. 63. № 7. С. 554–559.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-7-554-559>
1. Austin L.G., Van Orden D., Pérez J.W. A preliminary analysis of smooth roll crushers. *International Journal of Mineral Processing*. 1980, vol. 6, no. 4, pp. 321–336.
[https://doi.org/10.1016/0301-7516\(80\)90028-9](https://doi.org/10.1016/0301-7516(80)90028-9)
2. Egbe E.A.P., Olugboji O.A. Design, fabrication and testing of a double roll crusher. *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*. 2016, vol. 35, no. 11, pp. 511–515.
<https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V35P303>
3. Zhao L.L., Wang Z.B., Zang F. Multi-object optimization design for differential and grading toothed roll crusher using a genetic algorithm. *Journal of China University of Mining and Technology*. 2008, vol. 18, no. 2, pp. 316–320.
[https://doi.org/10.1016/S1006-1266\(08\)60067-X](https://doi.org/10.1016/S1006-1266(08)60067-X)
4. Rogers R.S.C. Closed form analytical solutions for models of closed circuit roll crushers. *Powder Technology*. 1982, vol. 32, no. 1, pp. 125–127. [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(82\)85013-4](https://doi.org/10.1016/0032-5910(82)85013-4)
5. Maslennikov V.A. Compression crushers. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal*. 1996, no. 10–11, pp. 124–138. (In Russ.).
6. Sakharov D.F. *Analysis of the process of crushing brittle materials in a single-roll crusher in order to increase energy efficiency: Extended Abstract of Cand. Sci. Diss.* Novokuznetsk, 2011, 17 p. (In Russ.).
7. Nikitin A.G., Epifantsev Yu.A., Medvedeva K.S., Gerike P.B. Power analysis of the process of brittle materials destruction in universal crushing machine with roll locker. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019, vol. 62, no. 4, pp. 303–307. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-4-303-307>
8. Meriam J.L., Kraige L.G. *Engineering Mechanics*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2012, 550 p.
9. Tselikov A.I. *Machines and Units of Metallurgical Plants. Vol. 1*. Moscow: Mashinostroenie, 1987, 440 p. (In Russ.).
10. Nikitin A.G., Epifantsev Yu.A., Medvedeva K.S., Gerike P.B., Fastyskovskii A.R. Experimental study of fractional composition of pieces of brittle material during crushing in a single-roll crusher with block stop on the roll. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2020, vol. 63, no. 7, pp. 554–559. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-7-554-559>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Александр Григорьевич Никитин, д.т.н., профессор кафедры механики и машиностроения, Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0001-9198-6386
E-mail: nikitin1601@yandex.ru

Епифанцев Юрий Андреевич, к.т.н., доцент кафедры механики и машиностроения, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: epifantsev42@mail.ru

Медведова Ксения Сергеевна, к.т.н., доцент кафедры механики и машиностроения, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: ksuwinchester@mail.ru

Aleksandr G. Nikitin, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair of Mechanics and Mechanical Engineering, Siberian State Industrial University
ORCID: 0000-0001-9198-6386
E-mail: nikitin1601@yandex.ru

Yurii A. Epifantsev, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair of Mechanics and Mechanical Engineering, Siberian State Industrial University
E-mail: epifantsev42@mail.ru

Kseniya S. Medvedeva, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair of Mechanics and Mechanical Engineering, Siberian State Industrial University
E-mail: ksuwinchester@mail.ru

Поступила в редакцию 06.03.2021
После доработки 10.04.2021
Принята к публикации 13.04.2021

Received 06.03.2021
Revised 10.04.2021
Accepted 13.04.2021



Оригинальная статья

УДК 669.046:662.61.66-971

DOI 10.17073/0368-0797-2021-12-912-920



ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ДОЖИГАНИЯ ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ В КОНВЕРТЕРЕ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ДЛЯ ПРОДУВКИ ДВУХЪЯРУСНЫХ КИСЛОРОДНЫХ ФУРМ

Е. В. Протопопов, М. В. Темлянцев, Н. Ф. Якушевич,
В. В. Солоненко, С. О. Сафонов

Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. Выполнено теоретическое обоснование повышения эффективности дожигания конвертерных газов в агрегате при двухъярусной подаче разноимпульсных кислородных струй и сгорании CO до CO₂ в канальном потоке газов, выходящих из реакционной зоны. Проведен термодинамический анализ процесса дожигания отходящих газов в полости конвертера при использовании для продувки двухъярусных кислородных фурм. Показано, что при вдувании кислородных газовых струй через сопла верхнего яруса с расходом 10 – 40 % от общего минутного расхода не обеспечивается достаточно полное дожигание оксида углерода CO. Лимитирующими факторами являются неравномерное количество и неорганизованный выход образующегося в реакционных зонах CO в различные периоды операции, низкая эффективность перемешивания отходящего потока с высокоскоростными газовыми струями и чрезмерно избыточное количество кислорода, подаваемого для дожигания, недостаточное смешение компонентов газовой фазы и низкая скорость реакции. Показано, что при обеспечении условий для дожигания CO до соотношения концентрации в газовой фазе $\frac{P_{CO_2}}{P_{CO}} = 1$ температура отходящего газа в полости конвертера может возрастать с 1800 до 2000 К, далее тепловой эффект от экзотермической реакции уменьшается. Количество кислорода, вдуваемого для дожигания CO, должно соответствовать остаточному содержанию углерода в металле при выполнении условия $V_{O_2}^{доп}, м^3/мин \approx 100 [C_{ост}] \%$. Избыток кислорода в газовой фазе и присутствие значительного количества нейтрального газа в значительной степени уменьшают коэффициент использования выделяющегося тепла в агрегате.

Ключевые слова: конвертер, двухъярусная фурма, дожигание отходящих газов, газовые струи, монооксид углерода, энтальпия, энергия Гиббса

Для цитирования: Протопопов Е.В., Темлянцев М.В., Якушевич Н.Ф., Солоненко В.В., Сафонов С.О. Исследование особенностей дожигания отходящих газов в конвертере при использовании для продувки двухъярусных кислородных фурм // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 12. С. 912–920. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-12-912-920>

Original article

FEATURES OF EXHAUST GASES AFTERBURNING IN A CONVERTER WHEN USING TWO-TIER OXYGEN LANCES FOR REFINING

E. V. Protopopov, M. V. Temlyantsev, N. F. Yakushevich,
V. V. Solonenko, S. O. Safonov

■ Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654007, Russian Federation)

Abstract. The theoretical substantiation was carried out for increasing the efficiency of converter gases afterburning in the unit with a two-tier supply of multi-pulse oxygen jets and combustion of CO to CO₂ in the channel flow of gases leaving the reaction zone. The authors made the thermodynamic analysis of the process of exhaust gases afterburning in converter cavity when using two-tier oxygen lances for refining. It is shown that when oxygen gas jets are blown through the upper-tier nozzles with a flow rate of 10 – 40 % of the total minute flow rate, a sufficiently complete afterburning of carbon monoxide CO is not provided. The limiting factors are the uneven amount and disorganized output of the CO formed in the reaction zones during various operation periods, low efficiency of mixing the waste stream with high-speed gas jets and an excessively excessive amount of oxygen supplied for afterburning, insufficient mixing of the components of the gas phase and low reaction rate. It is shown that when the conditions are provided for CO afterburning to the concentration ratio in the gas phase $\frac{P_{CO_2}}{P_{CO}} = 1$, temperature of the exhaust gas in the converter cavity can increase from 1800 to 2000 K, then the thermal effect of the exothermic reaction decreases. The amount of oxygen injected for CO afterburning must correspond to the residual carbon content in the metal at $V_{O_2}^{don}, m^3/min \approx 100 [C_{oct}] \%$. Excess of oxygen in the gas phase and presence of a significant amount of neutral gas significantly reduce the utilization rate of the generated heat in the unit.

Keywords: converter, two-tier lance, afterburning of exhaust gases, gas jets, carbon monoxide, enthalpy, Gibbs energy

For citation: Protopopov E.V., Temlyantsev M.V., Yakushevich N.F., Solonenko V.V., Safonov S.O. Features of exhaust gases afterburning in a converter when using two-tier oxygen lances for refining. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 12, pp. 912–920. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-12-912-920>

ВВЕДЕНИЕ

Современная зарубежная металлургическая практика убедительно доказала, что осуществление процессов десиликонизации, десульфурации и дефосфорации чугуна за пределами доменной печи технически и экономически целесообразно с точки зрения повышения ресурсо- и энергосберегающей эффективности доменного и конвертерного производств [1–4]. В результате внедрения такой комплексной предварительной обработки жидкого чугуна широкое распространение получила так называемая «малошлаковая» технология конвертерной плавки [3–7]. При реализации такого варианта процесса необходимо учитывать, что из приходной части теплового баланса конвертерной плавки исключается химическое тепло, вносимое реакциями окисления кремния и фосфора, поэтому требуется искать способы технологической компенсации тепловых потерь или уменьшать долю лома в металлозавалке.

ОСОБЕННОСТИ ДОЖИГАНИЯ ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ В КОНВЕРТЕРЕ

При такой постановке задачи к наиболее перспективным вариантам процесса, очевидно, следует отнести применение твердого топлива и (или) организацию дожигания отходящих газов в полости конвертера с использованием специальных дутьевых устройств [5–10].

При изучении конвертерного процесса с дожиганием отходящих газов термодинамический анализ [11] и прикладная оценка показателя степени K_1 дожигания CO до CO₂ подтверждают зависимость

$$K_1 = \frac{\text{CO}_2}{\text{CO} + \text{CO}_2} \cdot 100 \% = \frac{\xi_c}{1 + \xi_c} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где $\xi_c = \frac{P_{\text{CO}_2}}{P_{\text{CO}}}$; P – парциальное давление соответствующего компонента.

Величина K_1 зависит от соотношения количества {CO} в газовой фазе, образующегося в процессе окисления углерода, растворенного в металле, и расхода дополнительного кислорода, подаваемого для дожигания через специальные сопла, расположенные, как правило, по стволу фурмы выше основных сопел Лавала в головке на 0,3–2,5 м [12–16]. Важное влияние на процесс дожигания оказывает степень перемешивания компонентов газовой фазы и вспенивание шлако-металлической эмульсии по ходу продувки конвертера.

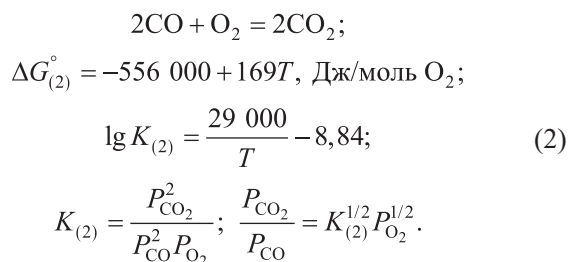
Исследования [17], посвященные изучению условий повышения эффективности процесса дожигания CO до CO₂, базируются на определении оптимальных кинетических параметров, которые рассчитываются косвенно по показателю степени дожигания K_1 .

В соответствии с уравнением (1) показатель степени дожигания зависит от количества кислорода, подаваемого через сопла верхнего яруса, диаметра и угла наклона этих сопел к вертикальной оси фурмы, степени и скорости смешения низкоскоростных струй кислорода с газовой фазой в рабочем пространстве конвертера, количества и скорости поступления оксида CO в зону дожигания [18–21]. Полнота протекания реакции дожигания, в свою очередь, определяется временем нахождения реагентов в области реакционной зоны, постоянно изменяющейся по составу и положению в объеме ванны, и непосредственно скоростью химической реакции, которая зависит от термодинамических параметров (температуры, состава газовой фазы и т.д.).

На основании ранее полученной информации [22–27] для промышленных 160-т конвертеров АО «ЕВРАЗ ЗСМК» выполнены расчеты, которые позволяют оценить эффективность развития процесса дожигания при использовании двухъярусных фурм и предлагаемых схем подачи технологических газов.

При глубине металлической ванны примерно 1,5 м, внутреннем диаметре агрегата 5,4 м, толщине слоя вспененного шлака 2 м и его плотности 0,54 т/м³ объем газов, заполняющих рабочее пространство конвертера по высоте до среза горловины примерно 2,5 м, составляет приблизительно 50–60 м³. Время заполнения отходящим газом (до 90 % CO) полости конвертера изменяется от 3 с в период максимального образования оксида углерода CO (8–15 мин продувки) и до 20 с в начале и конце операции. При неполном дожигании CO, а также при значительном избытке кислорода, подаваемого для дожигания, количество газов и линейная скорость θ газового потока, проходящего через сечение конвертера, существенно возрастают ($\theta = 0,1 \div 1$ м/с) [28, 29].

Таким образом, основной процесс дожигания оксида углерода CO описывается реакцией



При $\frac{P_{\text{CO}_2}}{P_{\text{CO}}} = 1$ $P_{\text{O}_2} = \frac{1}{K_{(2)}}$. При 1873 К $\lg K_{(2)} = 6,68$, $P_{\text{O}_2} = 2,1 \cdot 10^{-7}$, при 2073 К $\lg K_{(2)} = 5,16$, $P_{\text{O}_2} = 6,92 \cdot 10^{-6}$.

Изменения значений энергии Гиббса $\Delta G_{(2)}^\circ = f(T)$ при $\frac{P_{\text{CO}_2}}{P_{\text{CO}}} = 1$, рассчитанные по результатам работы [16], и значения $\frac{P_{\text{CO}_2}}{P_{\text{CO}}}$ для отношений $\frac{Q_{\text{O}_2}^{\text{доп}}}{Q_{\text{O}_2}^{\text{общ}}}$, составляющих 10 и 20 % общего минутного расхода 400 – 450 м³/мин на продувку, представлены в табл. 1 и на рис. 1 (в соответствии с работой [16] расчет дожигания СО до СО₂ проведен при $\frac{Q_{\text{O}_2}^{\text{доп}}}{Q_{\text{O}_2}^{\text{общ}}}$ 10 и 20 %).

Как видно, при $\frac{Q_{\text{O}_2}^{\text{доп}}}{Q_{\text{O}_2}^{\text{общ}}} = 10$ % в интервале температур 1750 – 2100 °С значение $\frac{P_{\text{CO}_2}}{P_{\text{CO}}}$ составляет 0,17 – 0,25, при температурах 1940 – 2550 °С – 0,19 – 0,31. Это значительно меньше, чем равновесное, которое соответствует стехиометрическому соотношению по реакции (2) $\left(\frac{P_{\text{CO}_2}}{P_{\text{CO}}} = 1\right)$. При 1750 °С равновесное значение $P_{\text{O}_2} \approx 5 \cdot 10^{-9}$, при 1940 °С $P_{\text{O}_2} \approx 6 \cdot 10^{-7}$ и далее возрастает с повышением температуры.

Использование новых конструктивных и технологических решений (оптимальная высота сопел второго яруса, использование разноимпульсных струй кислорода, подаваемых для дожигания СО, изменение угла наклона сопел, расхода газа на дожигание и т.д.) позволяет довести показатель степени дожигания K_1 до значения 0,44 – 0,50, что практически соответствует стехиометрическому соотношению реакции (2) $\left(\frac{\text{CO}_2}{\text{CO}} = 1\right)$; P_{O_2} (1600 ÷ 1800 °С) $\approx 1 \cdot 10^{-7} \div 1 \cdot 10^{-5}$.

Как уже отмечалось, более полное дожигание СО до СО₂ с получением концентрации СО₂ сверх равновесной по отношению к реакции (2) $\left(\frac{\text{CO}_2}{\text{CO}} = 1\right)$ возможно в присутствии в газовой фазе свободного кислорода в достаточно высоких концентрациях, например, $\frac{P_{\text{CO}_2}}{P_{\text{CO}}} = 10$ при 1800 °С, $P_{\text{O}_2} = 0,001$.

Для экзотермической реакции (2) изменение энтальпии $\Delta H_{(2)} = 2\Delta H_{\text{CO}_2} - 2\Delta H_{\text{CO}} + (H_T - H_{298})\text{O}_2$ при температурах 1600 – 1800 °С составляет примерно 500 кДж/моль О₂, при этом доля тепла на нагрев кислорода, подаваемого для дожигания, составляет 12 – 14 % (разница значений изменения энтальпий $\Delta H_{(2)}$ и $\Delta H_{(2\text{CO}_2 - 2\text{CO})}$ на рис. 1).

Очевидно, что значительный избыток кислорода на дожигание по отношению к равновесным концентрациям нежелателен. Подача кислорода должна соответствовать объему образующегося оксида углерода СО, поступающего в рабочее пространство конвертера из объема ванны. Результаты расчета количества кислорода, необходимого для дожигания СО применительно к плавке в 160-т конвертере, приведены в табл. 2.

На рис. 2 показаны изменения по ходу продувки концентрации углерода в металле $|\text{C}|$, % и $|\text{C}| \cdot 10^{-3}$, кг (на 160 т стали); скорости V_{CO} образования оксида углерода СО, м³/мин; скорости подачи кислорода, необходимого для дожигания СО, м³/мин; теплового эффекта от реакции дожигания СО до СО₂ ($-\Delta H_{1873\text{ К}} \cdot 10^6$ кДж на 160 т стали); гипотетического теплового эффекта от реакции дожигания СО до СО₂ ($\Delta H_{\text{гип}}$) с учетом предварительного нагрева кислорода.

Расчеты показывают, что всего за плавку образуется оксида углерода СО 59 000 м³ (в среднем за 20 – 25 мин продувки $V_{\text{CO}} = 2360$ м³/мин), необходимое количество кислорода для дожигания 37 700 м³ (в среднем за 20 – 25 мин продувки $V_{\text{O}_2} = 1508$ м³/мин).

Т а б л и ц а 1

Изменение температуры горения и состава газовой фазы в зависимости от расхода кислорода для дожигания

Table 1. Changes in combustion temperature and composition of the gas phase depending on the oxygen consumption for afterburning

Параметр	Расход кислорода для дожигания, %									
	20	40	60	80	100	20	40	60	80	100
	$\frac{Q_{\text{O}_2}^{\text{доп}} \cdot 100}{Q_{\text{O}_2}^{\text{общ}}} = 10 \%$					$\frac{Q_{\text{O}_2}^{\text{доп}} \cdot 100}{Q_{\text{O}_2}^{\text{общ}}} = 20 \%$				
$t, ^\circ\text{C}$	1560	1750	1900	1950	2100	1570	1940	2070	2300	2550
$\frac{\text{CO}_2}{\text{CO} + \text{CO}_2}, \%$		13,0	16,0	18,0	20,0		16,0	19,5	21,5	23,2
$\frac{\text{CO}_2}{\text{CO}}$		0,17	0,19	0,22	0,25		0,19	0,25	0,285	0,31
P_{O_2}		$5 \cdot 10^{-9}$	$2 \cdot 10^{-8}$	$7 \cdot 10^{-7}$	$6 \cdot 10^{-6}$		$6 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-3}$

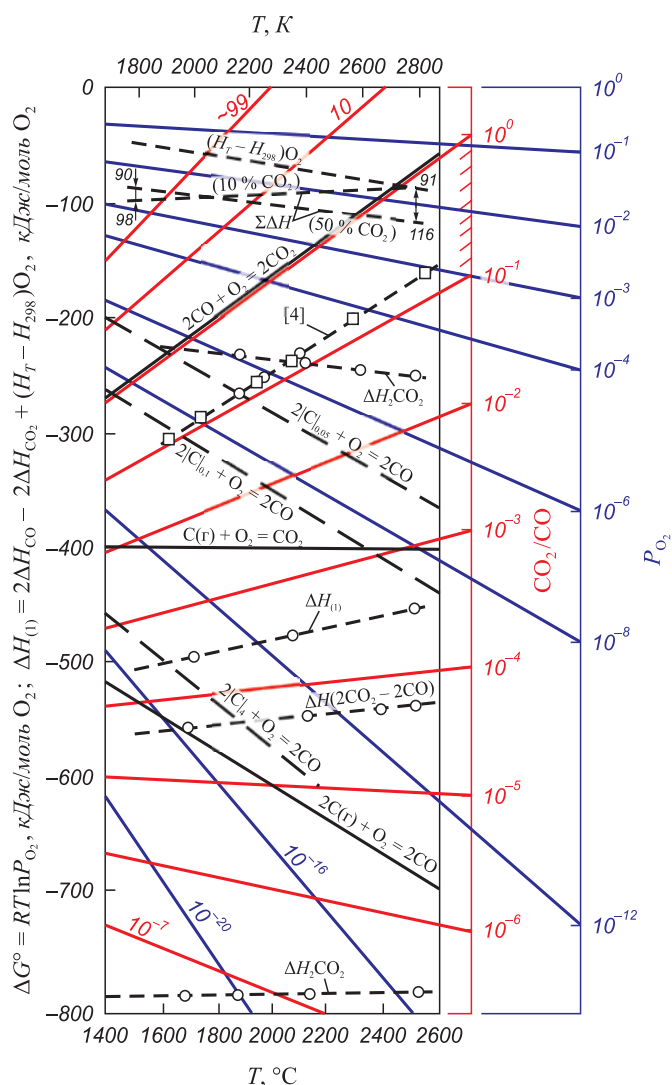


Рис. 1. Равновесные составы, энергии Гиббса, тепловые эффекты реакций в системе C–O при $\frac{Q_{O_2}^{доп}}{Q_{O_2}^{общ}} = 10\%$ (○) и $\frac{Q_{O_2}^{доп}}{Q_{O_2}^{общ}} = 20\%$ (□) (нижний индекс – содержание углерода [C] в металле, % (по массе))

Fig. 1. Equilibrium compositions, Gibbs energies, thermal effects of reactions in the C–O system at $\frac{Q_{O_2}^{доп}}{Q_{O_2}^{общ}} = 10\%$ (○) and $\frac{Q_{O_2}^{доп}}{Q_{O_2}^{общ}} = 20\%$ (□) (the lower index is carbon content [C] in the metal, % wt.)

Как видно, в процессе продувки окисление углерода и, соответственно, скорость образования оксида углерода CO и количество кислорода, необходимое для окисления, значительно меньше, чем при постоянной интенсивности подачи кислорода для дожигания, что обуславливает неравновесные условия протекания реакции (2).

Только в период продувки с 5 по 15 минуту, при высокой скорости обезуглероживания кислорода для дожигания CO обычно подается в 1,5 – 2,0 раза больше расчетного (примерно 533 м³). Необходимое и достаточное количество кислорода для реализации реакции 300 – 400 м³. При дальнейшей продувке на заключительном этапе операции и незначительной остаточной

концентрации углерода в металле кислорода вводится в 3 – 5 раз больше необходимого.

Такое избыточное количество кислорода, подаваемого для дожигания, приводит к повышенному износу верхних горизонтов футеровки конвертера. Это зафиксировано в ранее выполненных работах [8 – 10, 22]. Необходимо также учитывать, что плотность потока оксида углерода CO, выходящего из реакционных зон и заполняющего полость конвертера выше поверхности шлака (ПК), составляет приблизительно 100 м³ и изменяется в пределах от 3 – 4 м³ CO/м³ ПК в начале продувки до 7 – 8 м³ CO/м³ ПК на седьмой-восьмой минутах (то есть при интенсивном обезуглероживании) и далее снижается до 0,3 – 0,4 м³ CO/м³ ПК на заключительном этапе.

Очевидно, такая динамика взаимодействия низкоскоростных кислородных струй для дожигания с изменяющимся по плотности потоком отходящих газов должна быть обязательно учтена в дутьевом режиме плавки, поскольку механизм их смешения может значительно отличаться в более плотном потоке и в потоке разреженных газов.

Линейная скорость прохождения газов в рабочем пространстве конвертера изменяется в пределах от 0,17 м/с (пятая минута продувки) до 0,43 м/с (восьмая минута), понижаясь далее до 0,1 м/с в конце плавки. То есть время пребывания образующихся газов в полости конвертера (на участке движения газов 2 – 3 м) составляет от 0,2 – 0,3 до 0,8 – 1,3 с. При таких скоростях движения отходящих газов обеспечить хорошее перемешивание компонентов газовой фазы и эффективное дожигание CO достаточно сложно, что предопределяет необходимость использования дополнительных технологических решений по ходу операции.

Таким образом, рациональный вариант организации продувки с дожиганием CO в полости конвертера заключается в регулируемой подаче кислорода через сопла верхнего яруса при расчетном дутьевом режиме и создании специальных условий для протекания реакции дожигания (2) с максимально возможными скоростями. Например, к таким условиям можно отнести технические решения, которые обеспечивают низкую скорость истечения газовых струй, сопоставимую со скоростью движения факелов горения, в том числе использование для дожигания сопел различных профилей, варьирование углов их наклона к вертикальной оси вплоть до направления вверх и вниз по стволу фурмы для увеличения пути и времени прохождения смешивающихся потоков газа.

Положительный эффект, безусловно, будет приносить и дополнительное перемешивание нейтральным газом (N₂, Ar) расплава и реагентов газовой фазы [17].

В табл. 3 приведены дополнительно справочные данные [23] по изменению энтальпии реакции (2) и компонентов газовой фазы при температурах 1800 – 2800 К. Значения ($N_T - H_{298}$) для O₂, N₂ и CO

Т а б л и ц а 2

Параметры продувки ванны 160-т конвертера

Table 2. Parameters of the 160-t converter bath refining

Время продувки, мин	Содержание углерода в металле, % (по массе) кг	Угар углерода за 5 мин, кг	Скорость окисления углерода		Количество образующего СО		Необходимое количество кислорода для дожигаания СО, м³/мин	Избыток кислорода, м³/мин, при расходе 500 м³/мин	Выделение тепла от дожигаания СО до СО₂ на 160 т стали, 10⁶ кДж/мин, при температуре, К	
			кг/мин	% С/мин	кг/мин	м³/мин			1873	2073
0	$\frac{4,0}{6400}$	800	160	0,10	373,3	298,6	170,6	330	3,33	3,320
5	$\frac{3,5}{5600}$	2080	416	0,24	970,7	776,5	443,7	56	8,67	8,407
10	$\frac{2,3}{3520}$	1600	320	0,22	746,6	597,3	341,3	159	6,67	6,470
15	$\frac{1,2}{1920}$	1280	256	0,16	597,3	477,8	273,0	227	5,34	5,176
20	$\frac{0,4}{640}$	480	96	0,06	224,0	179,2	102,4	400	2,00	1,940
25	$\frac{0,1}{160}$	80	16	0,02	37,3	29,8	17,0	>400	0,40	~0,400

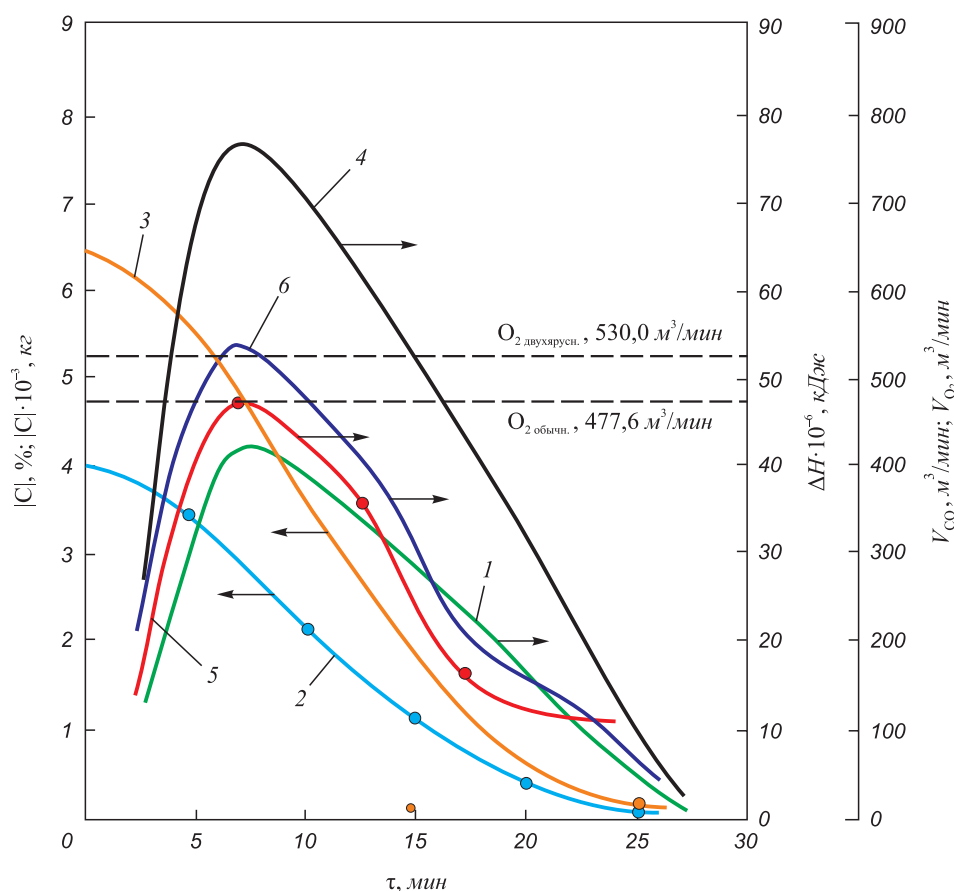


Рис. 2. Изменение показателей плавки по ходу продувки:
1 – $O_{2\text{ равн}}$, м³/мин; 2 – |C|, %; 3 – |C|, кг; 4 – V_{CO} , м³/мин; 5 – ΔH_{1600} , °C; 6 – $\Delta H_{гип}$

Fig. 2. Change of melting parameters during refining:
1 – $O_{2\text{ равн}}$, м³/мин; 2 – |C|, %; 3 – |C|, kg; 4 – V_{CO} , м³/мин; 5 – ΔH_{1600} , °C; 6 – $\Delta H_{гип}$

Изменение энтальпии компонентов газовой фазы и реакции дожигания

Table 3. Change in enthalpy of the gas phase components and afterburning reaction

ΔH , кДж/моль	T , К				$H_{2800} - H_{1800}$
	1800	2000	2400	2800	
$\Delta H_{(1)}$	–505	–496	–476	–456	Данные табл. 4
$H_T - H_{298}$:					
O_2	51,7	59,2	74,5	90,1	
N_2	49,0	56,0	70,7	81,7	
CO	50,2	56,5	70,7	83,7	33,5
CO ₂	79,5	92,0	118,0	146,4	66,9

Влияние степени дожигания на изменение энтальпии газовой фазы

Table 4. Influence of the afterburning degree on change in the gas phase enthalpy

Количество CO ₂ , %	$\Delta H_{1800\text{ К}} / \Delta H_{2800\text{ К}}$, кДж			
	$\Delta H\{CO + O_2 + N_2\} \approx 50$ кДж	$\Delta H_{CO_2} \approx 86$ кДж	$\Sigma \Delta H$, кДж	% $\Delta H_{(1)}$
10	45/77	8,0/14,6	53,0/91,6	10,0/20,0
20	40/69	16,0/24,2	56,0/98,2	11,0/21,5
30	35/60	24,0/44,0	59,0/104,0	11,7/22,8
40	30/51	32,0/58,0	62,0/109,4	12,3/24,0
50	25/43	40,0/73,0	65,0/116,0	12,9/25,4

отличаются незначительно: при 1800 К соответственно 51,7, 48,95 и 50,2 кДж/моль; при 2800 К – 90,1, 81,7 и 83,68 кДж/моль. Независимо от изменения состава газовой фазы можно принимать одинаковые усредненные значения: для 1800 К $H_{1800} - H_{298} \approx 50$ кДж/моль, для 2800 К $H_T - H_{298} \approx 86$ кДж/моль.

Несколько больше значения изменения энтальпии для CO₂. Так, при 1800 К значение $(H_{1800} - H_{298})_{CO_2}$ составляет приблизительно 79,5 кДж/моль, при 2800 К – 146,4 кДж/моль. Чем больше степень дожигания CO до CO₂ и, соответственно, чем выше концентрация CO₂ в газовой фазе, тем больше затраты тепла на нагрев газовой фазы. При начальной температуре 1500 К доля тепла на нагрев газовой фазы на 200 К при изменении содержания CO₂ в газовой фазе от 10 до 50 % составляет 1,0 – 1,3 % от H_{1800} реакции (2), что соответствует возможному повышению температуры от $T_{нач} = 1800$ К до 2000 К и от $T_{нач} = 2000$ К до 2170 К (табл. 4). Зависимость изменения энтальпии реакции (2) в процессе продувки показана на рис. 2.

Выводы

Выполнено теоретическое обоснование повышения эффективности дожигания конвертерных газов в агре-

гате при двухъярусной подаче разноимпульсных кислородных струй и сгорании CO до CO₂ в канальном потоке газов, выходящих из реакционной зоны. Количество кислорода, вдуваемого для дожигания CO, должно соответствовать остаточному содержанию углерода в металле при соотношении $V_{O_2}^{доп}, \text{ м}^3/\text{мин} \approx 100 [C_{ост}] \%$.

Определены условия термодинамического равновесия реакции окисления CO кислородом. Равновесие реакции при температурах 1800 – 2800 К достигается при отношении $\left(\frac{P_{CO_2}}{P_{CO}} = 1\right)$ и $P_{O_2} \approx 1 \cdot 10^{-7}$ и, соответ-

ственно, $\Delta G_{(2)}^\circ = -250 - 100$ кДж. Тепловой эффект реакции окисления при стехиометрическом количестве кислорода составляет примерно 500 кДж/моль O₂ (~350 кДж/м³ O₂) и незначительно снижается при повышении температуры. Температура газовой фазы в полости конвертера в начале продувки (до 5 – 6 мин) повышается с 1800 до 2000 К и далее в интервале 8 – 15 мин – с 2000 до 2170 К; тепловой эффект реакции дожигания CO в полости конвертера зависит от степени перемешивания газообразных компонентов, скорости протекания реакции и времени взаимодействия реагентов в контактной зоне. При преодолении кинетических затруднений и обеспечении необходимых

стехиометрических соотношений на начальной стадии окисления ($T \approx 1800$ К) возможен подъем температуры газа до 2000 К ($-\Delta H_{1873-2000 \text{ К}} \approx 4,0 \cdot 10^7$ кДж), далее тепловой эффект от экзотермической реакции

уменьшается ($-\Delta H_{2000-2200 \text{ К}} \approx 32,0 \cdot 10^7$ кДж). Избыток кислорода в газовой фазе в значительной степени уменьшает коэффициент использования выделяющегося тепла в агрегате.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Воскобойников В.Г., Перказов И.М., Завидонский В.А. Внедоменная обработка чугуна за рубежом. Серия «Подготовка сырьевых материалов к металлургическому переделу и производство чугуна». Вып. 2. М.: Институт «Черметинформация», 1986. 32 с.
2. Григорович К.В. Металлургия XXI века: современное состояние и направления развития. В кн.: Труды XIV международного конгресса сталеплавателей. М.: МИСиС, 2016. С. 56–65.
3. Туркдоган Е.Т. Технологические усовершенствования в инъекционной металлургии и в процессах рафинирования металла в ковше в 80-х годах // Инжекционная металлургия'86. Труды конференции. М.: Металлургия, 1990. С. 10–44.
4. Takebayshi T. The characteristics of BOF refining pretreated hot metal // International Oxygen Steelmaking Congress. Washington, USA. 1986. P. 557–562.
5. Лякишев Н.П., Шалимов А.Г. Сравнительная характеристика состояния кислородно-конвертерного производства стали в России и за рубежом. М.: Элиз, 2000. 64 с.
6. Югов П.И. Современное состояние мировой практики конвертерного производства и научные направления его развития в России // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2001. № 9. С. 9–13.
7. Kruskopf A., Visuri V.-V. A Gibbs energy minimization approach for modeling of chemical reactions in a basic oxygen furnace // Metallurgical and Materials Transactions B. 2017. Vol. 48. No. 6. P. 3281–3300. <https://doi.org/10.1007/s11663-017-1074-x>
8. Баптизманский В.И., Куликов В.О., Китаев А.Т. и др. Работа 130-т конвертеров, оборудованных двухъярусными фурмами // Экспресс-информация ЦНИИ и ТЭИ ЧМ. 1974. Сер. 6. Вып. 3. С. 1–14.
9. Смоктий В.В., Лапицкий В.В., Белокуров Э.С. Комбинированные процессы выплавки стали в конвертерах. Киев: Техника, 1992. 163 с.
10. Osani H., Ohmiya S. Total hot metals pretreatment and BOF operation practice for high purity steelmaking. In: 1 EOS Congress. Düsseldorf, 1993. P. 41–46.
11. Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г. О повышении эффективности продувки конвертерной ванны с дожигом отходящих газов в полости конвертера // Известия вузов. Черная металлургия. 1996. № 2. С. 1–5.
12. Протопопов Е.В., Лаврик Д.А., Чернятевич А.Г., Мастеровенко Е.Л. Повышение эффективности дожига отходящих газов в конвертерах с жидкофазным восстановлением // Известия вузов. Черная металлургия. 2001. № 6. С. 13–17.
13. Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г. Исследование взаимодействия кислородных струй с отходящими конвертерными газами // Известия вузов. Черная металлургия. 1996. № 10. С. 5–9.
14. Chatterjee A. On some aspects of supersonic jets of interest in LD steelmaking // Iron and Steel International. 1973. Vol. 16. No. 1. P. 38–40.
15. Tabata Y., Marsh R.C., Kelly P. Improvement of BOP steel refining blowing control using wide angle lance nozzles // Steelmaking Conference Proceedings. 1998. P. 451–457.
16. Жульковский О.А., Чернятевич А.Г., Гресс А.В. Численное исследование процесса дожига отходящих газов в конвертере // Известия вузов. Черная металлургия. 1993. № 1. С. 19–22.
17. Чернятевич А.Г., Айзатулов Р.С., Протопопов Е.В. Комбинированная продувка металла с подачей нейтрального газа сверху и через днище конвертера // Сталь. 1989. № 5. С. 20–23.
1. Voskoboinikov V.G., Perkazov I.M., Zavidonskii V.A. *Non-Straw Cast Iron Processing Abroad. Series "Preparation of Raw Materials for Metallurgical Processing and Production of Cast Iron". Issue 2.* Moscow: Institute "Chermetinformatsiya", 1986, 32 p. (In Russ.).
2. Grigorovich K.V. Metallurgy of the XXI century: Current state and development directions. In: *Proceedings of the XIV Int. Congress of Steelmakers.* Moscow: MISiS, 2016, pp. 56–65. (In Russ.).
3. Turkdogan E.T. Technological improvements in injection metallurgy and in metal refining processes in a ladle in the 80s. In: *Injection Metallurgy'86. Conf. Proceedings.* Moscow: Metallurgiya, 1990, pp. 10–44. (In Russ.).
4. Takebayshi T. The characteristics of BOF refining pretreated hot metal. *International Oxygen Steelmaking Congress. Washington, USA, 1986*, pp. 557–562.
5. Lyakishev N.P., Shalimov A.G. *Comparative Characteristics of the State of Oxygen-Converter Steel Production in Russia and Abroad.* Moscow: Eliz, 2000, 64 p. (In Russ.).
6. Yugov P.I. The Current state of the world practice of converter production and scientific directions of its development in Russia. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information.* 2001, no. 9, pp. 9–13. (In Russ.).
7. Kruskopf A., Visuri V.-V. A Gibbs energy minimization approach for modeling of chemical reactions in a basic oxygen furnace. *Metallurgical and Materials Transactions B.* 2017, vol. 48, no. 6, pp. 3281–3300. <https://doi.org/10.1007/s11663-017-1074-x>
8. Baptizmanskii V.I., Kulikov V.O., Kitaev A.T., etc. Operation of 130-t converters equipped with two-tier lances. *Ekspress-informatsiya TsNII i TEI ChM.* 1974, series 6, no. 3, pp. 1–14. (In Russ.).
9. Smoktii V.V., Lapitskii V.V., Belokurov E.S. *Combined Processes of Steel Smelting in Converters.* Kiev: Technika, 1992, 163 p. (In Russ.).
10. Osani H., Ohmiya S. Total hot metals pretreatment and BOF operation practice for high purity steelmaking. In: *1 EOS Congress, Düsseldorf, 1993*, pp. 41–46.
11. Protopopov E.V., Chernyatevich A.G. On increasing the efficiency of converter bath refining with exhaust gases afterburning in converter cavity. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy.* 1996, no. 2, pp. 1–5. (In Russ.).
12. Protopopov E.V., Lavrik D.A., Chernyatevich A.G., Masterovenko E.L. Improvement in efficiency of post combustion of off-gases in basic oxygen converters with liquid-phase reduction. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy.* 2001, no. 6, pp. 13–17. (In Russ.).
13. Protopopov E.V., Chernyatevich A.G. Investigation of oxygen jets interaction with exhaust converter gases. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy.* 1996, no. 10, pp. 5–9. (In Russ.).
14. Chatterjee A. On some aspects of supersonic jets of interest in LD steelmaking. *Iron and Steel International.* 1973, vol. 16, no. 1, pp. 38–40.
15. Tabata Y., Marsh R.C., Kelly P. Improvement of BOP steel refining blowing control using wide angle lance nozzles. *Steelmaking Conference Proceedings.* 1998, pp. 451–457.
16. Zhul'kovskii O.A., Chernyatevich A.G., Gress A.V. Numerical investigation of exhaust gases afterburning in a converter. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy.* 1993, no. 1, pp. 19–22. (In Russ.).
17. Chernyatevich A.G., Aizatulov R.S., Protopopov E.V. Combined metal blowing with inert gas delivery from above and through converter bottom. *Steel in the USSR.* 1989, vol. 19, no. 5, pp. 202–204.

18. Normanton A.S., Davies M.W., Spenceley G.D., Kreijger P.J. Technical StaancTJoint development of BSC / Hoogovens bath agitation process and scrap enhancement in basic oxygen steelmaking // *Steelmaking Conference Proceedings*. 1986. Vol. 69. P. 599–612.
19. Rymarchyk N. Post combustion lances in basic oxygen furnace (BOF) operations // *Steelmaking Conference Proceedings*. 1998. P. 445–449.
20. Somways N.L. Developments in the North-American iron and steel industry – 1994 // *Iron and Steel Engineer*. 1995. Vol. 71. No. 2. P. D1–D24.
21. Чернятевич А.Г., Протопопов Е.В. Разработка наконечников двухконтурных фурм для кислородных конверторов // *Известия вузов. Черная металлургия*. 1995. № 12. С. 13–17.
22. Эллиот Д.Ф., Глейзер М., Рамакришна В. Термохимия сталеплавильных процессов. Справочник / Пер. с англ. М.: Металлургия, 1969. 252 с.
23. Li Z., Hanaoka T. Development of large-point source emission downscale model by estimating the future capacity distribution of the Chinese iron and steel industry up to 2050 // *Resources, Conservation and Recycling*. 2020. Vol. 161. Article 104853. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104853>
24. De Vos L., Cnockaert V., Bellemans I., Vercruyssen C., Verbeken K. Critical assessment of the applicability of the foaming index to the industrial basic oxygen steelmaking process // *Steel Research International*. 2021. Vol. 92. No. 1. Article 2000282. <http://doi.org/10.1002/srin.202000282>
25. Yao L., Zhu R., Tang Y., Wei G., Dong K. Effect of furnace gas composition on characteristics of supersonic oxygen jets in the converter steelmaking process // *Materials*. 2020. Vol. 13. No. 15. Article 3353. <https://doi.org/10.3390/ma13153353>
26. Kwon J.-H., Lee J.-A., Lee K.-U., Han J.-W. A study on the supersonic jet nozzle to improve of the operating efficiency of the converter process // *Korean Journal of Metals and Materials*. 2020. Vol. 58. No. 8. P. 550–559. <https://doi.org/10.3365/KJMM.2020.58.8.550>
27. Feng C., Chen S., Dong J., Zhu R., Wei G., Dong K. Influence of preheating temperature on the characteristics of O₂ + CO₂ jet by mixed injection with a swirling oxygen nozzle // *JOM*. 2021. Vol. 73. No. 10. P. 2985–2994. <https://doi.org/10.1007/s11837-021-04836-2>
28. Zhang B., Chen K., Wang R., Liu C., Jiang M. Physical modelling of splashing triggered by the gas jet of an oxygen lance in a converter // *Metals*. 2019. Vol. 9. No. 4. Article 409. <https://doi.org/10.3390/met9040409>
29. Liu C., Tang L., Liu J., Tang Z. A dynamic analytics method based on multistage modeling for a BOF steelmaking process // *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. 2019. Vol. 16. No. 3. P. 1097–1109. <https://doi.org/10.1109/TASE.2018.2865414>
18. Normanton A.S., Davies M.W., Spenceley G.D., Kreijger P.J. Technical StaancTJoint development of BSC. Hoogovens bath agitation process and scrap enhancement in basic oxygen steelmaking. *Steelmaking Conference Proceedings*. 1986, vol. 69, pp. 599–612.
19. Rymarchyk N. Post combustion lances in basic oxygen furnace (BOF) operations. *Steelmaking Conference Proceedings*. 1998, pp. 445–449.
20. Somways N.L. Developments in the North-American iron and steel industry – 1994. *Iron and Steel Engineer*. 1995, vol. 71, no. 2, pp. D1–D24.
21. Chernyatevich A.G., Protopopov E.V. Development of tips of double-circuit lances for oxygen converters. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1995, no. 12, pp. 13–17. (In Russ.).
22. Elliott J.F., Gleiser M., Ramakrishna V. *Thermochemistry for Steelmaking*. Addison – Wesley Inc., 1963. (Russ. ed.: Elliott J., Gleiser M., Ramakrishna V. *Termokhimiya staleplavil'nykh protsessov*. Moscow: Metallurgiya, 1969, 252 p.).
23. Li Z., Hanaoka T. Development of large-point source emission downscale model by estimating the future capacity distribution of the Chinese iron and steel industry up to 2050. *Resources, Conservation and Recycling*. 2020, vol. 161, article 104853. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104853>
24. De Vos L., Cnockaert V., Bellemans I., Vercruyssen C., Verbeken K. Critical assessment of the applicability of the foaming index to the industrial basic oxygen steelmaking process. *Steel Research International*. 2021, vol. 92, no. 1, article 2000282. <http://doi.org/10.1002/srin.202000282>
25. Yao L., Zhu R., Tang Y., Wei G., Dong K. Effect of furnace gas composition on characteristics of supersonic oxygen jets in the converter steelmaking process. *Materials*. 2020, vol. 13, no. 15, article 3353. <https://doi.org/10.3390/ma13153353>
26. Kwon J.-H., Lee J.-A., Lee K.-U., Han J.-W. A study on the supersonic jet nozzle to improve of the operating efficiency of the converter process. *Korean Journal of Metals and Materials*. 2020, vol. 58, no. 8, pp. 550–559. <https://doi.org/10.3365/KJMM.2020.58.8.550>
27. Feng C., Chen S., Dong J., Zhu R., Wei G., Dong K. Influence of preheating temperature on the characteristics of O₂ + CO₂ jet by mixed injection with a swirling oxygen nozzle. *JOM*. 2021, vol. 73, no. 10, pp. 2985–2994. <https://doi.org/10.1007/s11837-021-04836-2>
28. Zhang B., Chen K., Wang R., Liu C., Jiang M. Physical modelling of splashing triggered by the gas jet of an oxygen lance in a converter. *Metals*. 2019, vol. 9, no. 4, article 409. <https://doi.org/10.3390/met9040409>
29. Liu C., Tang L., Liu J., Tang Z. A dynamic analytics method based on multistage modeling for a BOF steelmaking process. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. 2019, vol. 16, no. 3, pp. 1097–1109. <https://doi.org/10.1109/TASE.2018.2865414>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Евгений Валентинович Протопопов, д.т.н., профессор кафедры металлургии черных металлов, Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0002-7554-2168
E-mail: protopopov@sibsiu.ru

Михаил Викторович Темлянец, д.т.н., профессор, проректор по учебной и воспитательной работе, Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0001-7985-5666
E-mail: uchebn_otdel@sibsiu.ru

Николай Филиппович Якушевич, д.т.н., профессор, профессор-консультант кафедры металлургии цветных металлов и химической технологии, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: Yakushevich@cmet.sibsiu

Evgenii V. Protopopov, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair of Ferrous Metallurgy, Siberian State Industrial University
ORCID: 0000-0002-7554-2168
E-mail: protopopov@sibsiu.ru

Mikhail V. Temlyantsev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Vice-Rector for Educational and Tutorial Work, Siberian State Industrial University
ORCID: 0000-0001-7985-5666
E-mail: uchebn_otdel@sibsiu.ru

Nikolai F. Yakushevich, Dr. Sci. (Eng.), Prof.-Consultant of the Chair "Non-Ferrous Metallurgy and Chemical Engineering", Siberian State Industrial University
E-mail: Yakushevich@cmet.sibsiu

Виталий Владимирович Солоненко, соискатель степени к.т.н. кафедры металлургии черных металлов, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: Solonenko-nvkz@mail.ru

Сергей Олегович Сафонов, ассистент кафедры металлургии черных металлов, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: sergey.safonov.1950@mail.ru

Vitalii V. Solonenko, Candidates for a degree of Cand. Sci. (Eng.) of the Chair of Ferrous Metallurgy, Siberian State Industrial University
E-mail: Solonenko-nvkz@mail.ru

Sergei O. Safonov, Assistant of the Chair of Ferrous Metallurgy, Siberian State Industrial University
E-mail: sergey.safonov.1950@mail.ru

ВКЛАД АВТОРОВ

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Протопопов Е.В. – научное руководство, формирование основной концепции, цели и задачи исследования, написание статьи.

Темлянец М.В. – обзор публикаций по теме статьи, написание статьи.

Якушевич Н.Ф. – получение и анализ данных, написание статьи.

Солоненко В.В. – получение и анализ данных.

Сафонов С.О. – визуализация результатов исследований, доработка текста.

E.V. Protopopov – scientific guidance, formation of the research basic concept, goals and objectives, article writing.

M.V. Temlyantsev – publications review, article writing.

N.F. Yakushevich – data obtaining and analysis, article writing.

V.V. Solonenko – data obtaining and analysis.

S.O. Safonov – visualization of the research results, text revising.

Поступила в редакцию 11.10.2021

После доработки 29.10.2021

Принята к публикации 12.11.2021

Received 11.10.2021

Revised 29.10.2021

Accepted 12.11.2021



Оригинальная статья

УДК 669.162.2:004.942

DOI 10.17073/0368-0797-2021-12-921-929



ИССЛЕДОВАНИЕ В СРЕДЕ ANSYS ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ВОЗДУШНОЙ ФУРМЕ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

С. Д. Сайфуллаев¹, С. В. Албул¹, О. А. Кобелев^{1,2}, И. А. Левицкий¹,
А. Г. Радюк¹, А. Е. Титлянов¹

¹ Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (Россия, 119049, Москва, Ленинский пр., 4)

² Центральный научно-исследовательский институт технологии машиностроения, ОАО НПО «ЦНИИТМАШ» (Россия, 115088, Москва, Шарикоподшипниковская ул., 4)

Аннотация. Известно, что максимальные тепловые потери в воздушной водоохлаждаемой фурме доменной печи приходятся на дутьевой канал. Эффективным способом их снижения является установка теплоизолирующей керамической вставки. Теплоизолирующие вставки, установленные во внутренний стакан воздушных фурм для доменной печи № 5 ПАО «Северсталь», снижают тепловые потери через фурму на 30 %, а вставки, изолирующие большую часть внутренней поверхности рыльной части, дополнительно снижают тепловые потери через фурму на 26,2 %. С помощью программного комплекса ANSYS исследовано влияние конструктивных параметров на тепловые процессы в воздушной фурме доменной печи с теплоизолирующей вставкой. Для большей реалистичности моделирования в данной работе в качестве области моделирования рассматривалась вся воздушная фурма, включая контур водяного охлаждения. Выступ вставки в дутьевой канал на 2 мм улучшает перемешивание природного газа и дутья, способствует горению газа в дутьевом канале, что приводит к повышению тепловых потерь через дутьевой канал и снижению стойкости вставки. Для повышения стойкости вставки и снижения тепловых потерь через дутьевой канал обосновано применение удлиненной вставки переменной толщины, изменяющейся с 13 до 8 мм по направлению дутья, не выступающей в дутьевой канал и имеющей угол между нормалью к стенке внутреннего стакана и осью отверстия для подачи природного газа около 30°. Показано, что для получения максимального теплосодержания дутья, на которое влияет горение природного газа и тепловые потери с охлаждающей водой в дутьевом канале, предпочтителен вариант с удлиненной вставкой переменной толщины, изменяющейся с 10 до 8 мм по направлению дутья, и осью отверстия для подачи природного газа, перпендикулярной стенке внутреннего стакана.

Ключевые слова: доменная печь, воздушная фурма, теплоизолирующая вставка, тепловые потери, компьютерное моделирование

Для цитирования: Сайфуллаев С.Д., Албул С.В., Кобелев О.А., Левицкий И.А., Радюк А.Г., Титлянов А.Е. Исследование в среде ANSYS влияния конструктивных параметров на тепловые процессы в воздушной фурме доменной печи // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 12. С. 921–929. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-12-921-929>

Original article

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF DESIGN PARAMETERS ON THERMAL PROCESSES IN A BLAST FURNACE TUYERE USING ANSYS SOFTWARE

S. D. Saifullaev¹, S. V. Albul¹, O. A. Kobelev^{1,2}, I. A. Levitskii¹,
A. G. Radyuk¹, A. E. Titlyanov¹

¹ National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS) (4 Leninskii Ave., Moscow 119049, Russian Federation)

² JSC Russian State Research Center “CNIITMASH” (4 Sharikopodshipnikovskaya Str., Moscow 115088, Russian Federation)

Abstract. It is known that the maximum heat losses in a water-cooled tuyere of a blast furnace are in the blowing channel. An effective way to reduce them is to install a heat-insulating ceramic insert. Such inserts installed in the inner cup of air tuyeres for the blast furnace no. 5 of PJSC “Severstal” reduce heat losses through the tuyere by 30 %, and inserts, which, in addition, insulate most of the inner surface of the snout part, further reduce heat losses through the tuyere by 26.2 %. The ANSYS software was used to study the effect of design parameters on thermal processes in a blast furnace tuyere with heat-insulating insert. To make the simulation more realistic the entire air tuyere, including water-cooling circuit, was considered as the modeling object. Protrusion of the insert into the blowing channel by 2 mm improves the mixing of natural gas and blast, promotes gas combustion, which leads to an increase in heat losses through the blowing channel and a decrease in resistance of the insert. To increase durability of the insert

and reduce heat losses through the blowing channel, it is justified to use an elongated insert with a thickness varying from 13 to 8 mm in the blowing direction, which does not protrude into the blowing channel, having an angle between the normal to the side of the inner cup and the axis of the hole for natural gas supplying about 30°. It is shown that to obtain the maximum heat content of the blast, which is influenced by the combustion of natural gas and heat losses with cooling water in the blowing channel, it is preferable to have an elongated insert of variable thickness, varying from 10 to 8 mm in the blowing direction, and axis of the hole for natural gas supply perpendicular to the wall of the inner cup.

Keywords: blast furnace, air tuyere, heat-insulating insert, heat losses, computer simulation

For citation: Saifullaev S.D., Albul S.V., Koblelev O.A., Levitskii I.A., Radyuk A.G., Titlyanov A.E. Investigation of the influence of design parameters on thermal processes in a blast furnace tuyere using ANSYS software. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 12, pp. 921–929. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-12-921-929>

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что максимальные тепловые потери в воздушной водоохлаждаемой фурме доменной печи приходятся на дутьевой канал [1 – 4]. Эффективным способом их снижения является установка теплоизолирующей керамической вставки [5 – 7].

Теплоизолирующие вставки, установленные во внутренний стакан воздушных фурм для доменной печи (ДП) № 5 ПАО «Северсталь», снижают тепловые потери через фурму на 30 % [8]. Однако имеются еще тепловые потери через внутреннюю поверхность рыльной части, которые в этой области фурмы увеличиваются из-за начала горения подаваемого в фурму природного газа.

В работе [9] для дополнительного снижения тепловых потерь через поверхность дутьевого канала была разработана вставка, теплоизолирующая большую площадь внутренней поверхности рыльной части.

Моделирование в среде ANSYS (Fluent, Mechanical) [10 – 13] позволяет выбрать варианты конструкции вставки и геометрии дутьевого канала, обеспечиваю-

щие минимальные напряжения во вставке и тепловые потери через ее поверхность, а также повышение интенсивности сгорания природного газа, что обеспечивает увеличение коэффициента замены кокса природным газом [14 – 16]. В проводимых ранее исследованиях [6 – 9] в качестве области моделирования выбирались дутьевой канал и теплоизолирующая вставка, а другие конструктивные элементы учитывались в расширенных граничных условиях. Для большей реалистичности моделирования в данной работе в качестве области моделирования рассматривалась вся воздушная фурма, включая контур водяного охлаждения.

ПАРАМЕТРЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Схема продольного сечения воздушной фурмы представлена на рис. 1.

Рассмотрены варианты конструкции теплоизолирующей вставки в соответствии с размерами, представленными в табл. 1.

Величина зазора между вставкой и внутренним стаканом составила 2,0 мм.

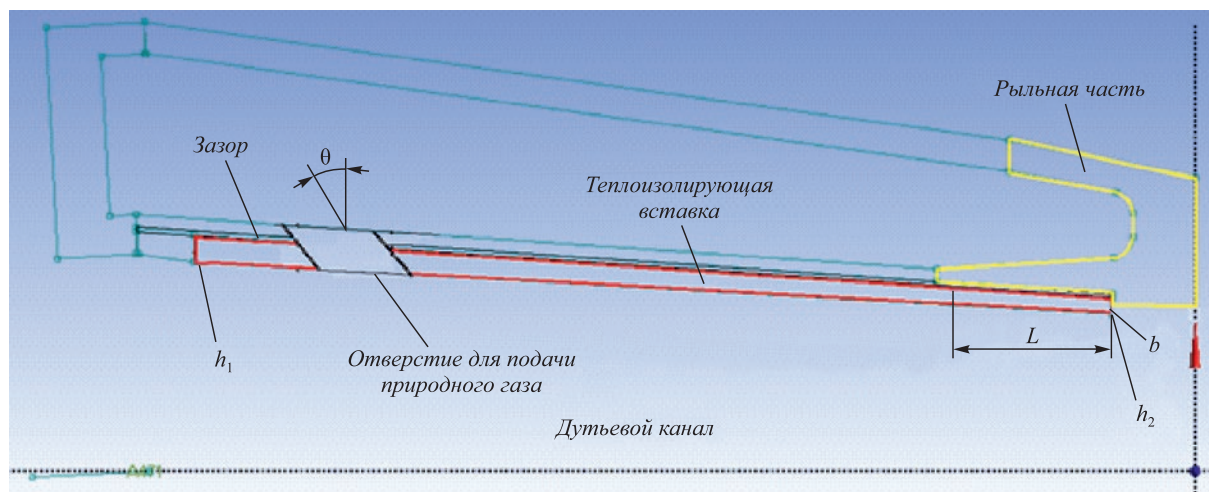


Рис. 1. Схема продольного сечения воздушной фурмы:

h_1 – толщина вставки со стороны фланца, мм; h_2 – толщина вставки со стороны рыльной части, мм; L – удлинение вставки в рыльную часть, мм; b – выступ вставки в дутьевой канал, мм; θ – угол между нормалью к стенке внутреннего стакана и осью отверстия для подачи природного газа, град.

Fig. 1. Scheme of longitudinal section of the air tuyere:

h_1 – insert thickness from the flange side, mm; h_2 – insert thickness from the snout side, mm; L – elongation of the snout insert, mm; b – protrusion of the insert into the blowing channel, mm; θ – angle between the normal to the side of the inner cup and axis of the hole for natural gas supplying, deg.

Таблица 1

Варианты конструкции теплоизолирующей вставки

Table 1. Design options for a heat-insulating insert

Вариант	h_1 , мм	h_2 , мм	L , мм	b , мм	θ , град.
1	10	10	0	2	0
2	10	8	0	0	0
3	10	8	75	0	0
4	13	8	75	0	0
5	13	8	75	0	30
6	13	8	75	2	30
7	13	8	75	2	0

Помимо представленных в табл. 1 вариантов, рассматривались также три варианта конструкции, не содержащие вставок: фурма, в которой она не предусмотрена (вариант 8); конструкция по варианту 1, в которой она разрушена (вариант 9); конструкция по варианту 4, в которой вставка разрушена (вариант 10).

Схема расчетной области была создана в приложении Design Modeler, а расчетная сетка – в приложении ANSYS Meshing.

При моделировании решались уравнения переноса импульса (в трехмерной постановке), уравнение неразрывности (для сжимаемой среды), уравнения

стандартной $k-\epsilon$ модели турбулентности (два уравнения), уравнения конвективной диффузии для четырех компонентов (в рамках модели *Species Transport*). Учет взаимодействия между турбулентностью и химией осуществляли в рамках подмодели *Finite Rate/Eddy Dissipation*, позволяющей учитывать и кинетику, и турбулентное перемешивание, а также проверить факт горения в рассматриваемой системе, не делая каких-либо априорных предположений о нем. Рассматривалась одноступенчатая реакция горения природного газа, кинетические характеристики которой взяты из базы данных ANSYS Fluent.

Теплофизические свойства используемых материалов представлены в табл. 2.

Коэффициенты теплоотдачи от окружающей среды (печи) к наружному стакану $\alpha_{н.с}$ и рывальной части α_p определяли для цилиндрической стенки на основании экспериментальных данных: $\alpha_p = 263 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, $\alpha_{н.с} = 110 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Граничные условия на входе и выходе из фурмы представлены в табл. 3.

Результаты моделирования представлены в табл. 4.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА

Создание выступа вставки в дутьевом канале приводит к улучшению перемешивания горячего дутья и природного газа (вариант 1 по сравнению с вариантом 2).

Таблица 2

Некоторые теплофизические свойства материалов, используемые при моделировании

Table 2. Some thermophysical properties of materials in simulation

Свойства	Медная часть фурмы	Стальная часть фурмы	Вставка	Материал в зазоре, отделяющем вставку от внутреннего стакана, рывальной части и фланца***	Вода, охлаждающая фурму	Метано-воздушная смесь в дутьевом канале
Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·К)	222*	35	8,3	0,4	0,356**	0,0454
Теплоемкость c , Дж/(кг·К)	390	600	1291	840	4182	
Плотность ρ , кг/м ³	8940	7800	3583	1200	998,2	
Температурный коэффициент линейного расширения β , °C ⁻¹			$6.5 \cdot 10^{-6}$			
Модуль Юнга E , Па			$1,82 \cdot 10^{10}$			
Коэффициент Пуассона μ			0,17			

* Представлен эффективный коэффициент теплопроводности с учетом напыления алюминиевого газотермического покрытия.

** Представлен эффективный коэффициент теплопроводности воды, охлаждающей фурму, с учетом пленочного кипения воды.

*** Зазор, отделяющий вставку от внутреннего стакана, рывальной части и фланца, заполнен чередующимися продольными и поперечными полосами силикатного герметика (затвердевающего в процессе работы фурмы) и воздуха, поэтому для заполняющего его материала заданы свойства, близкие к свойствам пустотелого силикатного кирпича.

Таблица 3

Граничные условия во входных и выходных сечениях фурмы, задаваемые при моделировании

Table 3. Boundary conditions in inlet and outlet sections of the tuyere in simulation

Показатель	Условия		
	горячее дутье	природный газ	вода
На входе в фурму			
Состав	30 % O ₂	100 % CH ₄	100 % H ₂ O
Температура, К	1473	300	298
Массовый расход, кг/с	4,539	0,283	8,3
На выходе из фурмы			
Давление дутья (избыточное), Па	405 300		506 625

Таблица 4

Расчетные параметры работы воздушной фурмы со вставками разной конструкции

Table 4. Design operation parameters of the air tuyere with inserts of different designs

Показатель*	Варианты расчета									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$Q_{д.вых}$, кВт	6736,6	6673,1	6740,4	6636,4	6334,9	6284,5	6635,6	6288,3	6932,3	6826,7
$Q_{в.вых}$, кВт	248,9	244,6	216,4	213,7	210,9	214,1	217,4	363,4	402,4	392,9
$Q_{реак}$, кВт	935,8	867,6	907,3	800,5	495,7	449,9	803,9	602,4	1286,4	1171,0
$T_{д.вых}$, К	1421,9	1410,9	1422,0	1408,6	1382,9	1378,3	1410,5	1364,7	1453,7	1436,2
$T_{в.вых}$, К	305,35	305,23	304,4	304,34	304,25	304,35	304,45	308,59	309,76	309,47
$T_{пов.р.тор}$, К	512,8	512,4	511,8	511,7	505,8	517,6	524,9	508,0	528,4	545,9
$T_{зав}$, К	712,2	716,3	729,9	711,9	694,7	692,2	713,5	—	—	—
T_p , К	445,4	440,8	423,9	423,8	419,8	426,4	431,3	440,1	464,1	458,2
$T_{вн.с}$, К	343,1	342,4	341,0	338,4	337,6	337,1	339,2	464,1	473,9	473,0
$T_{вст}$, К	1207,0	1204,6	1230,0	1203,8	1167,1	1162,1	1206,8	—	—	—
CO ₂ _{вых}	0,0153	0,0139	0,0147	0,013	0,0079	0,0073	0,0134	0,0097	0,0207	0,0199
H ₂ O _{вых}	0,0126	0,0114	0,012	0,0107	0,0065	0,0059	0,0109	0,00794	0,017	0,0163
V_d , м/с	142,6	141,2	141,9	144,7	144,6	144,2	144,4	143,8	124,5	120,8
$\sigma_{вст}$, МПа	70,7	66,7	65,4	54,2	42,0	47,6	57,7	—	—	—

$Q_{д.вых}$ – количество тепла, выходящее из фурмы с горячим дутьем, кВт; $Q_{в.вых}$ – количество тепла, выходящее из фурмы с водой, кВт; $Q_{реак}$ – количество тепла, выделяющееся в результате реакции горения газа, кВт; $T_{д.вых}$ – температура горячего дутья на выходе из фурмы, К; $T_{в.вых}$ – температура воды на выходе из фурмы, К; $T_{пов.р.тор}$ – температура торцевой поверхности рыльной части со стороны печи, К; $T_{зав}$ – температура в зазоре между вставкой и внутренним стаканом, К; T_p – температура рыльной части, К; $T_{вн.с}$ – температура внутреннего стакана, К; $T_{вст}$ – температура вставки, К; V_d – средняя скорость горячего дутья в дутьевом канале фурмы, м/с; CO₂ _{вых} – массовая доля углекислого газа на выходе из дутьевого канала; H₂O _{вых} – массовая доля воды на выходе из дутьевого канала; $\sigma_{вст}$ – максимальные температурные напряжения во вставке, МПа.

В результате увеличивается количество теплоты за счет реакции горения, а, следовательно, растут тепловой поток и температура на выходе из дутьевого канала. Одновременно увеличивается температура охлаждающей воды и рыльной части, а также напряжения во вставке.

Увеличение длины вставки (вариант 3) сопровождается увеличением количества теплоты, выделившейся

в результате реакции горения по сравнению с вариантом 2, но не достигает значения, получаемого в варианте 1. Таким образом, выступ вставки в дутьевой канал на 2,0 мм оказывает большее влияние на процесс горения природного газа, чем увеличение ее длины на 75 мм. Однако увеличение длины вставки приводит к дополнительному сохранению тепла в дутьевом кана-

ле. В результате тепловой поток и температура дутья на выходе из фурмы превышают соответствующие значения по варианту 1, а температура воды на выходе из фурмы оказываются меньше, чем по вариантам 1 и 2. Поскольку вставка защищает большую долю рыхлой части, то температура вставки повышается, а рыхлой части снижается по сравнению с предыдущими вариантами. Также повышается и температура в материале зазора, отделяющем вставку от внутреннего стакана и рыхлой части. Это свидетельствует о более интенсивных тепловых потоках на стенках дутьевого канала в рыхлой части фурмы.

Сужение дутьевого канала за счет увеличения толщины вставки в варианте 4 приводит к увеличению скорости дутья в нем, что смещает начало области горения в сторону фурменной зоны [17, 18]. Количество теплоты, выделившейся в результате реакции горения в дутьевом канале, уменьшается, что приводит к снижению всех тепловых и температурных показателей для дутья, воды, медных частей фурмы и вставки.

Увеличение угла между нормалью к стенке внутреннего стакана и осью отверстия для подачи природного газа до 30° (вариант 5) сопровождается тем, что природный газ сильнее прижимается к стенке фурмы потоком горячего дутья. В результате, из-за примерно двукратного уменьшения количества теплоты, выделившейся при реакции горения, снижаются все тепловые и температурные показатели для дутья, воды, медных частей фурмы и вставки (рис. 2 – 4). Температурные напряжения имеют минимальные значения (табл. 4), что должно способствовать повышению стойкости вставки.

Теплота реакции горения хорошо коррелирует с содержанием продуктов реакции в дутье (рис. 5).

Расчеты показали, что выступ удлиненной вставки в дутьевой канал, образованный утонением стенки рыхлой части от места контакта со вставкой до ее торца (вариант 6), приводит к тому, что природный газ сильнее прижимается к стенке и хуже перемешивается с дутьем (рис. 6). В результате снижаются количество теплоты, выделившейся в результате реакции горения, тепловой поток и температура дутья на выходе из дутьевого канала [19, 20]. Поскольку рыхлая часть стала тоньше, повышается ее температура, что приводит к росту температуры и энтальпии отходящей воды системы охлаждения фурмы (табл. 4). Снижение степени прохождения реакции горения в дутьевом канале подтверждается уменьшением содержания CO_2 и H_2O (табл. 4).

На основании проведенного анализа можно оценить влияние выступа вставки в дутьевой канал на количество теплоты, выделившейся в результате реакции горения газа (для различных вариантов конструкции). Так, для варианта с короткой серийной вставкой и при перпендикулярности оси отверстия для подачи природного газа к стенке внутреннего стакана, выступ вставки в дутьевой канал оказывает существенное влияние на повышение количества теплоты, выделившейся в результате реакции горения газа (см. табл. 4, варианты 1 и 2). А для удлиненной на 75 мм вставки в рыхлую часть фурмы (при сохранении перпендикулярности оси отверстия для подачи природного газа и стенки внутреннего стакана) наличие выступа вставки в дутьевом канале приводит к незначительному повышению количества теплоты, выделившейся в результате реакции горения газа (см. табл. 4, варианты 4 и 7). При сочетании удлиненной на 75 мм вставки в рыхлую часть фурмы и угла между нормалью к стенке внутреннего стакана

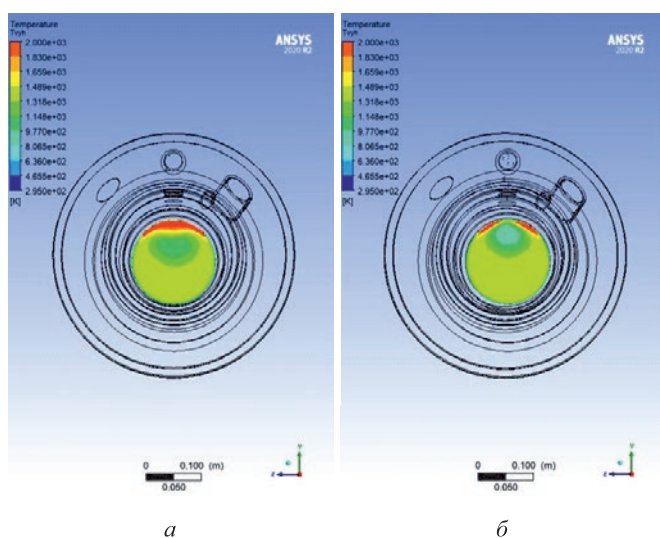


Рис. 2. Распределение температуры дутья на выходе из фурмы:
а – вариант 1; б – вариант 5

Fig. 2. Distribution of blast temperature at the tuyere outlet:
а – option 1; б – option 5

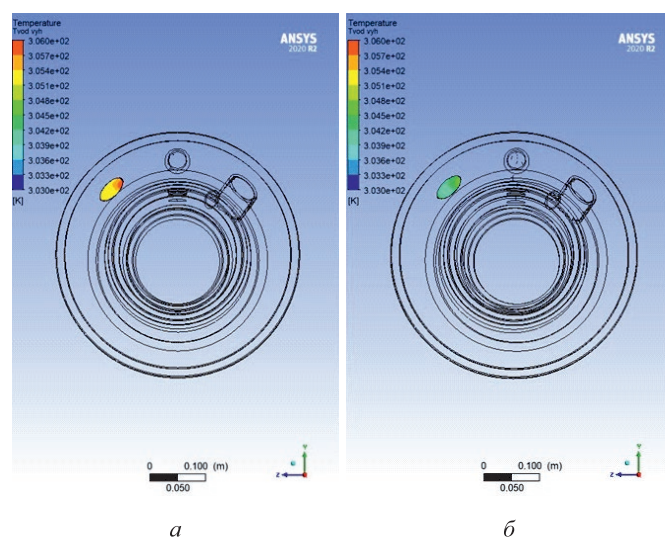


Рис. 3. Распределение температуры воды на выходе из фурмы:
а – вариант 1; б – вариант 5

Fig. 3. Distribution of water temperature at the tuyere outlet:
а – option 1; б – option 5

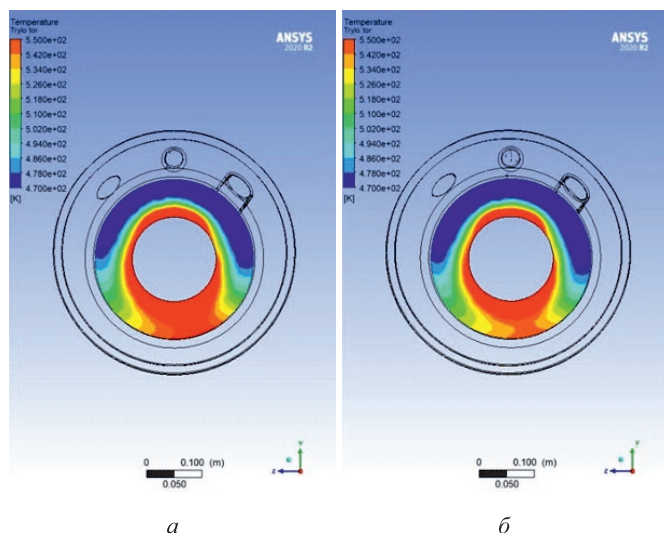


Рис. 4. Распределение температуры торца рыльной части фурмы:
а – вариант 1; б – вариант 5

Fig. 4. Temperature distribution of the tuyere snout end:
а – option 1; б – option 5

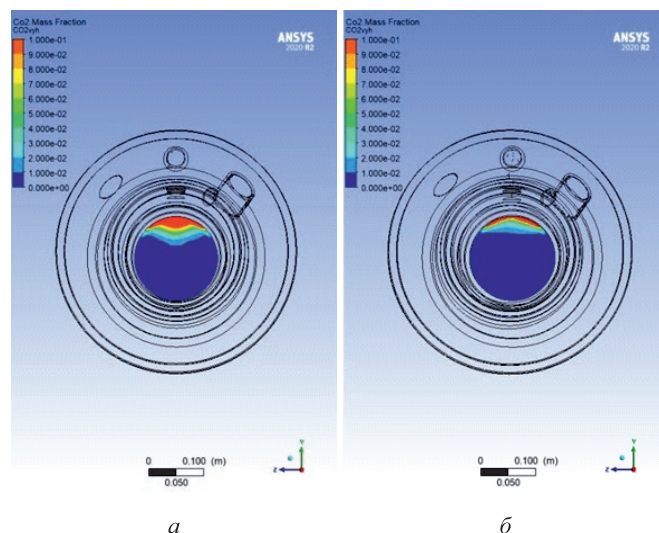


Рис. 5. Распределение массовой доли CO_2 на выходе из фурмы:
а – вариант 1; б – вариант 5

Fig. 5. Distribution of CO_2 mass fraction at the tuyere outlet:
а – option 1; б – option 5

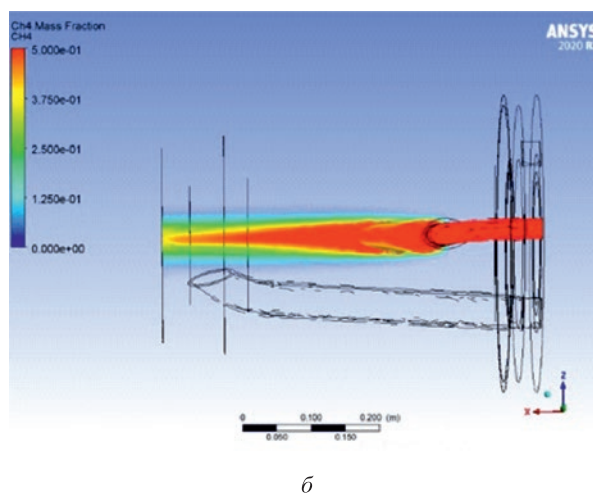
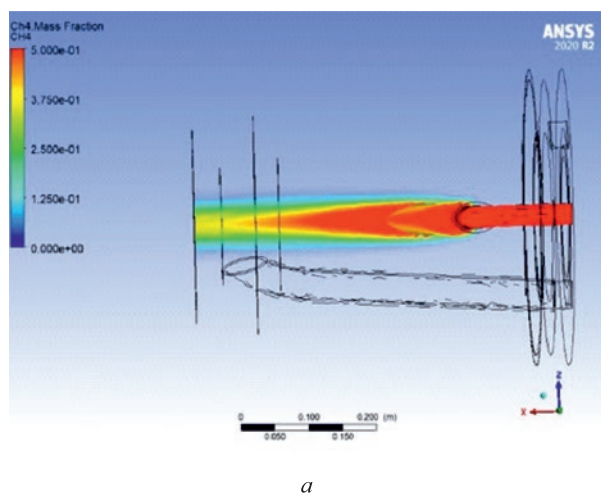


Рис. 6. Распределение массовой доли CH_4 в дутьевом канале фурмы со стороны газовой трубки:
а – вариант 5; б – вариант 6

Fig. 6. Distribution of CH_4 mass fraction in the tuyere blowing channel from the side of gas tube:
а – option 5; б – option 6

и осью отверстия для подачи природного газа, равного 30° , наличие выступа вставки в дутьевом канале приводит к понижению количества теплоты, выделяющейся в реакции горения газа (см. табл. 4, варианты 5 и 6).

Вариант 8 (фурма без вставки) характеризуется значительным повышением температуры внутреннего стакана (более, чем на 120°C), охлаждающей фурму воды (более, чем на $3,2^\circ\text{C}$) и, следовательно, повышением потока теплоты, уносимой водой, на выходе из фурмы (более, чем на 110 кВт) (см. табл. 4, вариант 1).

В случае разрушения серийной вставки (конструкции по варианту 1) образовавшаяся ступенька в рыльной части создает условия для лучшего перемешива-

ния природного газа и горячего дутья, а увеличенная полость дутьевого канала вызывает снижение скорости дутья (вариант 9). Все это приводит к более активному горению газа в дутьевом канале. В результате значительно увеличиваются как тепловой поток, уходящий с дутьем из фурмы, так и тепловые потери через дутьевой канал.

Аналогичная картина складывается и для случая разрушения удлиненной вставки конструкции, соответствующей варианту 4. Однако в этом случае (вариант 10) по сравнению с серийной вставкой (вариант 9) процесс горения газа начинается ближе к выходу из дутьевого канала, а рабочий объем канала становится больше.

В результате теплота, выделяющаяся в результате реакции горения газа, содержание продуктов горения, уносимая уходящим потоком теплота и температура дутья на выходе из фурмы, тепловые потери с охлаждающей водой и температура воды на выходе из фурмы, температура рывальной части, скорость дутья в дутьевом канале для варианта 10 становятся ниже, чем в варианте 9, а температура торца рывальной части – выше.

Следует отметить, что вариант 1 в настоящее время штатно используется, а вариант 5 успешно прошел апробацию на ДП № 4, 5 ПАО «Северсталь»¹.

Выводы

Выступ вставки в дутьевой канал на 2 мм улучшает перемешивание природного газа и дутья, способствует горению газа в дутьевом канале, что приводит к повышению тепловых потерь через дутьевой канал и снижению стойкости вставки.

С заглублением вставки в рывальную часть дополнительно на 75 мм значительно снижаются тепловые потери через дутьевой канал.

Увеличение толщины удлиненной вставки с 10 до 13 мм со стороны фланца с последующим ее утонением до 8 мм по направлению дутья сопровождается увели-

чением скорости дутья, что приводит к уменьшению теплового потока на выходе из дутьевого канала, снижению через него тепловых потерь и повышению стойкости вставки.

Расположение оси отверстия для подачи природного газа под углом 30° относительно нормали к стенке внутреннего стакана приводит к тому, что газ прижимается к стенке вставки потоком горячего дутья, что вызывает снижение температуры потока дутья и повышение стойкости вставки, как и при увеличении толщины вставки.

Область расширения дутьевого канала, образовавшаяся после разрушения вставок, способствует активному горению газа в дутьевом канале, что приводит к значительному увеличению теплового потока, уходящего с дутьем из фурмы.

Для повышения стойкости вставки и снижения тепловых потерь через дутьевой канал следует рекомендовать удлиненную вставку переменной толщины, изменяющейся с 13 до 8 мм по направлению дутья, не выступающую в дутьевой канал, имеющую угол между нормалью к стенке внутреннего стакана и осью отверстия для подачи природного газа 30° (вариант 5).

Для получения максимального теплосодержания дутья предпочтителен вариант с удлиненной вставкой переменной толщины, изменяющейся с 10 до 8 мм по направлению дутья, и осью отверстия для подачи природного газа, перпендикулярной стенке внутреннего стакана (вариант 3).

¹ В работе принимали участие Е.А. Волков, А.Л. Теревов, Р.Н. Максимов, В.В. Сухановский, Е.А. Никонов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Бородулин А.В., Васильев А.П., Глущенко Е.Л. и др. Об информативности тепловых потерь рабочего пространства доменных печей // Сборник материалов II Международной научно-практической конференции «Автоматизированные печные агрегаты и энергосберегающие технологии в металлургии». Москва: МИСиС, 2002. С. 424–426.
2. Бондаренко А.А., Горбик А.С., Дышлевич Г. Г. Исследование теплонапряженности различных участков фурм // Сталь. 1983. № 7. С. 11–12.
3. Dai B., Long H.-M., Ji Y.-L., Rao J.-T., Liu Y.-C. Theoretical and practical research on relationship between blast air condition and hearth activity in large blast furnace // Metallurgical Research and Technology. 2020. Vol. 117. No. 1. Article 113. <https://doi.org/10.1051/metal/2020007>
4. Song L., Xiaojie L., Qing L., Xusheng Z., Yana Q. Study on the appropriate production parameters of a gas-injection blast furnace // High Temperature Materials and Processes. 2020. Vol. 39. No. 1. P. 10–25. <https://doi.org/10.1515/htmp-2020-0005>
5. Пат. № 2779514 B2 2240207 A JP, C21B7/16. Фурма для доменной печи / А. Kikuo (JP). № 8960188; заявлено 13.03.89.
6. Радюк А.Г., Титлянов А.Е., Сидорова Т.Ю. Моделирование теплового состояния воздушных фурм доменных печей // Известия вузов. Черная металлургия. 2016. Т. 59. № 9. С. 622–627. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2016-9-622-627>
7. Радюк А.Г., Титлянов А.Е., Скрипаленко М.М. Моделирование температурного поля воздушных фурм доменных печей с помощью DEFORM 2D // Металлург. 2016. № 10. С. 14–17.
8. Радюк А.Г., Титлянов А.Е., Тарасов Ю.С., Сидорова Т.Ю. Снижение тепловых потерь на воздушных фурмах доменных печей
1. Borodulin A.V., Vasil'ev A.P., Glushchenko E.L., etc. On informative value of heat losses in working space of blast furnaces. In: *Proceedings of the Second Int. Conf. "Automated Furnace Systems and Energy-Saving Technologies in Metallurgy"*. Moscow: MISIS, 2002, pp. 424–426. (In Russ.).
2. Bondarenko A.A., Gorbik A.S., Dyshlevich G.G. Investigation of heat stress of various parts of the tuyeres. *Stal'*. 1983, no. 7, pp. 11–12. (In Russ.).
3. Dai B., Long H.-M., Ji Y.-L., Rao J.-T., Liu Y.-C. Theoretical and practical research on relationship between blast air condition and hearth activity in large blast furnace. *Metallurgical Research and Technology*. 2020, vol. 117, no. 1, article 113. <https://doi.org/10.1051/metal/2020007>
4. Song L., Xiaojie L., Qing L., Xusheng Z., Yana Q. Study on the appropriate production parameters of a gas-injection blast furnace. *High Temperature Materials and Processes*. 2020, vol. 39, no. 1, pp. 10–25. <https://doi.org/10.1515/htmp-2020-0005>
5. Kikuo A. *Tuyere for a blast furnace*. Patent no. 2779514 B2 2240207 A JP, C21B7/16, no. 8960188.
6. Radyuk A.G., Titlyanov A.E., Sidorova T.Yu. Modeling of the thermal state of air tuyeres for blast furnaces. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2016, vol. 59, no. 9, pp. 622–627. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2016-9-622-627>
7. Radyuk A.G., Titlyanov A.E., Skripalenko M.M. Modeling of the temperature field of blast furnace tuyeres using Deform-2D Software. *Metallurgist*. 2017, vol. 60, no. 9–10, pp. 1011–1015. <https://doi.org/10.1007/s1015-017-0400-5>
8. Radyuk A.G., Titlyanov A.E., Tarasov Yu.S., Sidorova T.Yu. Decreasing the heat losses at the air tuyeres in blast furnaces. *Steel in*

- путем теплоизоляции дутьевого канала // *Сталь*. 2019. № 4. С. 7–10.
9. Волков Е.А., Радюк А.Г., Теребов А.Л., Титлянов А.Е. Повышение эффективности работы теплоизолирующих вставок в дутьевом канале воздушных фурм доменных печей // *Металлург*. 2021. № 4. С. 5–8.
 10. Денисов М.А. Математическое моделирование теплофизических процессов. ANSYS и CAE-проектирование: Учебное пособие. Екатеринбург: УрФУ, 2011. 149 с.
 11. Денисов М.А. Компьютерное проектирование. ANSYS: Учебное пособие. Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2014. 77 с.
 12. Xu H., Sun C., Liao Z., Xu J., Kou M. Numerical simulation of temperature and stress distributions inside the furnace tuyere // *Proceedings for the 8th Int. Conf. on Modeling and Simulation of Metallurgical Processes in Steelmaking, STEELSIM 2019*. 2019. P. 51–55. <http://doi.org/10.33313/503/005>
 13. Liu X., Tang G., Okosun T., Silaen A.K., Street S.J., Zhou C.Q. Investigation of heat transfer phenomena in blast furnace Tuyere/Blowpipe region // *ASME 2017 Heat Transfer Summer Conference*. Paper No. HT2017-4961, V001T02A007. 8 p. <https://doi.org/10.1115/HT2017-4961>
 14. Zhu J., Jin Y., Luo X., Ye C., Yuan H., Ai F. Simulation of size of tuyere raceway and the tuyere blast volume distribution for blast furnace // *Tezhong Zhuzao Ji Youse Hejin/Special Casting and Non-ferrous Alloys*. 2017. Vol. 37. No. 3. P. 253–257. <http://doi.org/10.15980/j.tzzz.2017.03.006>
 15. Pistorius P.C., Gibson J., Jampani M. Natural gas utilization in blast furnace ironmaking: Tuyere injection, shaft injection and prereduction // *Applications of Process Engineering Principles in Materials Processing, Energy and Environmental Technologies*. Wang S., Free M., Alam S., Zhang M., Taylor P. eds. The Minerals, Metals & Materials Series. Springer, Cham. P. 283–292. https://doi.org/10.1007/978-3-319-51091-0_26
 16. Li Y.-L., Cheng S.-S., Chen C. Mathematical model of adjusting blast volume of blast furnace tuyeres // *Dongbei Daxue Xuebao/Journal of Northeastern University*. 2016. Vol. 37. No. 3. P. 357–362. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1005-3026.2016.03.012>
 17. Dong Z., Wang J., Zuo H., She X., Xue Q. Analysis of gas-solid flow and shaft-injected gas distribution in an oxygen blast furnace using a discrete element method and computational fluid dynamics coupled model // *Particuology*. 2017. Vol. 32. P. 63–72. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2016.07.008>
 18. Jiang J., Zhu R., Qiu S. Effect of CO₂ injection into blast furnace tuyeres on the pulverized coal combustion // *High Temperature Materials and Processes*. 2021. Vol. 40. No. 1. P. 131–140. <https://doi.org/10.1515/htmp-2021-0018>
 19. Murao A., Fukada K., Matsuno H., Sato M., Akaotsu S., Saito Y., Matsushita Y., Aoki H. Effect of natural gas injection point on combustion and gasification efficiency of pulverized coal under blast furnace condition // *Tetsu-To-Hagane/Journal of the Iron and Steel Institute of Japan*. 2018. Vol. 104. No. 5. P. 243–252. <https://doi.org/10.2355/tetsutohagane.TETSU-2017-087>
 20. Chai Y.-F., Zhang J.-L., Shao Q.-J., Ning X.-J., Wang K.-D. Experiment research on pulverized coal combustion in the tuyere of oxygen blast furnace // *High Temperature Materials and Processes*. 2019. Vol. 38. P. 42–49. <https://doi.org/10.1515/htmp-2017-0141>
- Translation*. 2019, vol. 49, no. 4, pp. 257–260. <https://doi.org/10.3103/S0967091219040119>
9. Volkov E.A., Radyuk A.G., Terebov A.L., Titlyanov A.E. Increasing the operational efficiency of insulation liners in the air passage of blast-furnace tuyeres. *Metallurgist*. 2021, vol. 65, no. 3–4, pp. 363–367. <https://doi.org/10.1007/s11015-021-01165-2>
 10. Denisov M.A. *Mathematical Modeling of Thermophysical Processes. ANSYS and CAE-design: Manual*. Yekaterinburg: UrFU, 2011, 149 p. (In Russ.).
 11. Denisov M.A. *Computer Design. ANSYS: Manual*. Yekaterinburg: UrFU, 2014, 77 p. (In Russ.).
 12. Xu H., Sun C., Liao Z., Xu J., Kou M. Numerical simulation of temperature and stress distributions inside the furnace tuyere. *Proceedings of the 8th Int. Conf. on Modeling and Simulation of Metallurgical Processes in Steelmaking, STEELSIM 2019*, 2019, pp. 51–55. <http://doi.org/10.33313/503/005>
 13. Liu X., Tang G., Okosun T., Silaen A.K., Street S.J., Zhou C.Q. Investigation of heat transfer phenomena in blast furnace Tuyere/Blowpipe region. *ASME 2017 Heat Transfer Summer Conf.*, paper no. HT2017-4961, V001T02A007, 8 p. <https://doi.org/10.1115/HT2017-4961>
 14. Zhu J., Jin Y., Luo X., Ye C., Yuan H., Ai F. Simulation of size of tuyere raceway and the tuyere blast volume distribution for blast furnace. *Tezhong Zhuzao Ji Youse Hejin/Special Casting and Non-ferrous Alloys*. 2017, vol. 37, no. 3, pp. 253–257. <http://doi.org/10.15980/j.tzzz.2017.03.006>
 15. Pistorius P.C., Gibson J., Jampani M. Natural gas utilization in blast furnace ironmaking: Tuyere injection, shaft injection and prereduction. In: *Applications of Process Engineering Principles in Materials Processing, Energy and Environmental Technologies*. Wang S., Free M., Alam S., Zhang M., Taylor P. eds. The Minerals, Metals & Materials Series. Springer, Cham, pp. 283–292. https://doi.org/10.1007/978-3-319-51091-0_26
 16. Li Y.-L., Cheng S.-S., Chen C. Mathematical model of adjusting blast volume of blast furnace tuyeres. *Dongbei Daxue Xuebao/Journal of Northeastern University*. 2016, vol. 37, no. 3, pp. 357–362. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1005-3026.2016.03.012>
 17. Dong Z., Wang J., Zuo H., She X., Xue Q. Analysis of gas-solid flow and shaft-injected gas distribution in an oxygen blast furnace using a discrete element method and computational fluid dynamics coupled model. *Particuology*. 2017, vol. 32, pp. 63–72. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2016.07.008>
 18. Jiang J., Zhu R., Qiu S. Effect of CO₂ injection into blast furnace tuyeres on the pulverized coal combustion. *High Temperature Materials and Processes*, 2021, vol. 40, no. 1, pp. 131–140. <https://doi.org/10.1515/htmp-2021-0018>
 19. Murao A., Fukada K., Matsuno H., Sato M., Akaotsu S., Saito Y., Matsushita Y., Aoki H. Effect of natural gas injection point on combustion and gasification efficiency of pulverized coal under blast furnace condition. *Tetsu-To-Hagane/Journal of the Iron and Steel Institute of Japan*, 2018, vol. 104, no. 5, pp. 243–252. <https://doi.org/10.2355/tetsutohagane.TETSU-2017-087>
 20. Chai Y.-F., Zhang J.-L., Shao Q.-J., Ning X.-J., Wang K.-D. Experiment research on pulverized coal combustion in the tuyere of oxygen blast furnace. *High Temperature Materials and Processes*. 2019, vol. 38, pp. 42–49. <https://doi.org/10.1515/htmp-2017-0141>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Сардорбек Дилшод угли Сайфуллаев, магистрант кафедры «Инжиниринг технологического оборудования», Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

ORCID: 0000-0003-4012-1782

E-mail: tgtu1@mail.ru

Sardorbek D. Saifullaev, MA Student of the Chair “Engineering of Technological Equipment”, National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS)

ORCID: 0000-0003-4012-1782

E-mail: tgtu1@mail.ru

Сергей Валерьевич Албул, старший преподаватель кафедры «Инжиниринг технологического оборудования», Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

ORCID: 0000-0003-1802-7378

E-mail: albul@isis.ru

Олег Анатольевич Кобелев, д.т.н., профессор, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», главный специалист ГК «РОСАТОМ», Центральный научно-исследовательский институт технологии машиностроения, ОАО НПО «ЦНИИТМАШ»

E-mail: oakobelev@cniitmash.com

Игорь Анисимович Левицкий, к.т.н., доцент кафедры энергоэффективных и ресурсосберегающих промышленных технологий, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

E-mail: lewwwis@mail.ru

Александр Германович Радюк, д.т.н., профессор, ведущий научный сотрудник кафедры обработки металлов давлением, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

ORCID: 0000-0001-6758-9911

E-mail: radjuk@rambler.ru

Александр Евгеньевич Титлянов, к.т.н., старший научный сотрудник кафедры обработки металлов давлением, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

E-mail: radjuk@rambler.ru

Sergei V. Albul, Senior Lecturer of the Chair “Engineering of Technological Equipment”, National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS)

ORCID: 0000-0003-1802-7378

E-mail: albul@isis.ru

Oleg A. Kobelev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS), Chief Specialist of State Corporation “ROSATOM”, JSC Russian State Research Center “CNIITMASH”

E-mail: oakobelev@cniitmash.com

Igor’ A. Levitskii, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair “Energy-Efficient and Resource-Saving Industrial Technologies”, National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS)

E-mail: lewwwis@mail.ru

Aleksandr G. Radyuk, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Leading Researcher of the Chair “Metal Forming”, National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS)

ORCID: 0000-0001-6758-9911

E-mail: radjuk@rambler.ru

Aleksandr E. Titlyanov, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Chair “Metal Forming”, National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS)

E-mail: radjuk@rambler.ru

Вклад авторов

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Сайфуллаев С.Д. – проведение расчетов и моделирования.

Албул С.В. – анализ результатов исследований, подготовка текста.

Кобелев О.А. – научное руководство, формирование выводов.

Левицкий И.А. – постановка целей и задач исследования, научное консультирование.

Радюк А.Г. – постановка целей и задач исследования, анализ исследования, подготовка текста.

Титлянов А.Е. – формирование концепции, научное руководство.

S.D. Saifullaev – calculations and modeling.

S.V. Albul – analysis of the research results, preparation of the text.

O.A. Kobelev – scientific leadership, the formation of conclusions.

I.A. Levitskii – setting the research goals and objectives, scientific consulting.

A.G. Radyuk – setting the research goals and objectives, research analysis, preparation of the text.

A.E. Titlyanov – concept formation, scientific leadership.

Поступила в редакцию 01.07.2021

После доработки 25.08.2021

Принята к публикации 25.11.2021

Received 01.07.2021

Revised 25.08.2021

Accepted 25.11.2021



К 90-ЛЕТИЮ ВЛАДИМИРА НИКОЛАЕВИЧА ПЕРЕТЯТКО



7 ноября 2021 года Владимиру Николаевичу Перетяцко, профессору, доктору технических наук, профессору-консультанту кафедры «Обработка металлов давлением и металловедение. ЕВРАЗ ЗСМК» Сибирского государственного индустриального университета (СибГИУ) исполнилось 90 лет.

Владимир Николаевич окончил в 1954 году Сибирский металлургический институт (СМИ) имени Серго Орджоникидзе (в настоящее время СибГИУ) по специальности «Обработка черных металлов давлением» и получил квалификацию инженера-металлурга. Был приглашен работать старшим лаборантом в СМИ. Одновременно поступил в очную аспирантуру.

Один из самых молодых докторов наук СССР (получил звание в 38 лет), профессор, в 40 лет он возглавил кафедру технологии и автоматизации кузнечно-штамповочного производства (ТиАКШП). Начиная с 70-х годов, кафедра ТиАКШП выпускала четыре группы, в среднем 100 инженеров ежегодно. За выпускниками «выстраивалась очередь» работодателей, молодых специалистов «ждали» заводы Ленинграда, Риги, Киева, Комсомольска-на-Амуре, Владивостока... В Кемеровской области инженеры-металлурги требовались для Кузнецкого металлургического комбината (где четыре

пресса изготавливали детали для ремонта), Кузнецкого машиностроительного завода горного оборудования, Кемеровского электромаша (для штамповки корпусов автобусов (было и такое производство в Кузбассе)).

Владимир Николаевич Перетяцко – известный в нашей стране и за рубежом специалист в области обработки металлов давлением. Под его руководством и при непосредственном участии выполнялись гранты Министерства образования РФ по фундаментальным исследованиям в области технических наук раздела «Металлургия», подраздела «Прокатное производство», в рамках которых проведен ряд основополагающих исследований по формоизменению металла при прокатке железнодорожных рельсов. По программе Министерства образования РФ «Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники» Владимиром Николаевичем выполнен ряд работ по разделам «Ресурсосберегающие технологии на металлургическом производстве» и «Технологии и технологические совмещенные модули для металлургического производства».

Теоретические положения, разработанные В.Н. Перетяцко, позволили решить широкий круг задач, направленных на улучшение качества металлопродукции на ведущих металлургических предприятиях страны, легли в основу разработки технологий нагрева и деформирования металла. Это позволило усовершенствовать качество прокатки высоколегированных и двухслойных сталей различных марок.

Владимир Николаевич – автор более 500 научных и учебно-методических работ (в том числе 30 изданы за рубежом), семи монографий, 17 авторских свидетельств и патентов. Им подготовлены и изданы лекционные курсы на английском языке (пять в Египте, два в Мексике) и три курса на немецком языке в Германии. Перетяцко В.Н. является членом-корреспондентом Российской инженерной академии. За 58 лет научно-педагогической деятельности им подготовлено более 2500 инженеров, 33 кандидата наук и 7 докторов наук. Почти 30 лет он был членом редакционной коллегии журнала «Известия вузов. Черная металлургия».

Владимир Николаевич начал педагогическую деятельность в 1955 году в СМИ, обогащал и совершенствовал ее в зарубежных учебных заведениях. В 1964 году В.Н. Перетяцко был направлен для чтения лекций в Магдебургскую Высшую техническую школу (ГДР) сроком на один год. А в 1968-м году Министерство высшего образования сочло необходимым командировать

ученого в Эль-Таббинский металлургический институт (Египет) для организации кафедры «Обработка металлов давлением», где он проработал в течение двух лет.

Владимир Николаевич обладает большим опытом научно-педагогической деятельности. За высокие достижения он награжден медалью «Ветеран труда», знаками «За отличные успехи в работе» и «Почетный работник высшего профессионального образования», «Заслуженный деятель науки и техники РСФСР», медалью Кемеровской области «70 лет Кемеровской области». В 2010 году Владимир Николаевич удостоен звания «Почетный гражданин Кемеровской области», в 2013 году – «Почетный профессор Кузбасса», а в 2016 году – «Герой Кузбасса».

Профессионал высокого уровня, доброжелательный, «подтянутый и собранный» профессор пользуется заслуженным уважением и авторитетом у коллег и студентов. Говоря о своем успехе, он всегда вспоминает жену, Валентину Дмитриевну Перетятко, с которой прожил в браке 62 года (год назад она ушла из жизни). Сегодня ученый окружен любовью сына, дочери, внучек и правнучек. «Сохранить приемлемое здоровье для 90 лет, здравый рассудок и спокойствие мне помогла атмосфера в институте – месте, где я проводил большую часть времени, и дома, где меня понимали и принимали. В жизни не было никаких нервных срывов, никаких

трудностей в работе, комфорт и уважение в семье. Быть может, неосторожно так говорить, но мне интересно дожить до ста лет...», – слова Владимира Николаевича.

Слова Ларисы Владимировны Филипповой, дочери профессора: «С детства у меня была абсолютная уверенность, что папа знает все. Не было вопроса, на который он не мог ответить. Как «папина дочка», старалась брать с него пример, что далеко не всегда получалось. Но кое-что удавалось. В частности, я неоднократно слышала от папы, что, будучи студентом, он ухитрялся сдавать по два экзамена в один день (тогда это было возможно), причем оба на «пять» (он вообще учился на отлично). И для меня сессии, сдача экзаменов стали любимым занятием. Заходила в аудиторию первая из группы, чтобы успеть пообщаться с преподавателем. И сегодня я много советуюсь с папой по самым разным темам. Он в курсе всего происходящего, следит за политическими событиями, но в центре внимания – профессиональная тематика».

Редакционная коллегия и редакция журнала, коллектив университета и друзья сердечно поздравляют Владимира Николаевича с юбилеем, желают ему энергии и здоровья, благополучия и дальнейших творческих успехов!

Редколлегия журнала



А.М. ГЛЕЗЕР И В.Е. ГРОМОВ В СПИСКЕ САМЫХ ЦИТИРУЕМЫХ УЧЕНЫХ МИРА



Известные российские ученые в области физики конденсированного состояния и физического материаловедения А.М. Глезер и В.Е. Громов вошли в составленный издательством Elsevier список 2 % самых цитируемых ученых мира за 2020 год. Александр Маркович Глезер – профессор, доктор физико-математических наук, директор института металловедения и физики металлов им. Г.В. Курдюмова ЦНИИЧермет им. академика И.П. Бардина, профессор кафедры физического материаловедения НИТУ «МИСиС». Виктор Евгеньевич Громов – профессор, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой естественнонаучных дисциплин Сибирского государственного индустриального университета.

Составитель рейтинга – издательство Elsevier является одним из крупнейших научных издательских домов мира, который ежегодно выпускает около четверти всех статей из издаваемых в мире научных журналов. Компания ведет базу данных научной периодики и цитирований Scopus. В архивах издательства находится порядка 7 миллионов публикаций университетов из

180 стран мира. Более 30 миллионов ученых, студентов, специалистов различных отраслей получают доступ к информации издательства. В год проводится более 240 миллионов загрузок статей. С 2017 года международная база данных Scopus возобновила индексирование журнала «Известия вузов. Черная металлургия», в котором А.М. Глезер и В.Е. Громов являются членами редакционной коллегии.

Scopus – наиболее популярная библиографическая и реферативная база данных и инструмент для отслеживания цитируемости статей, опубликованных в научных изданиях. Индексирует статьи по техническим, медицинским и гуманитарным наукам 5000 издателей. Индекс цитирования является одним из самых распространенных наукометрических показателей и характеристик продуктивности ученого, его востребованности в научном мире.

Поздравляем ученых с замечательным успехом и искренне желаем дальнейших творческих достижений.

Редколлегия журнала

УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ, ПОМЕЩЕННЫХ В ЖУРНАЛЕ «ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ. ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ» ЗА 2021 ГОД, ТОМ 64

СТАЛИ ОСОБОГО НАЗНАЧЕНИЯ

- Клевцов Г.В., Валиев Р.З., Фесенюк М.В., Клевцова Н.А., Тюрков М.Н., Абрамова М.М., Рааб Г.И. Прочность и механизм разрушения при кручении ультрамелкозернистой аустенитной стали медицинского назначения 11

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

- Аксенова В.В., Алимбаев С.А., Павлов А.В., Мустафин Р.М. Брикетирование пористых глиноземсодержащих материалов на органических связующих 5
- Бельский С.М., Шопин И.И., Шкарин А.Н. Об адекватности параметров профиля поперечного сечения полосы. Сообщение 1. Предсказательный интервал 1
- Бельский С.М., Шопин И.И., Шкарин А.Н. Об адекватности параметров профиля поперечного сечения полосы. Сообщение 2. Локальные утолщения и утонения 3
- Григорьев А.М., Григорович К.В., Ем А.Ю., Морозов А.О. Взаимодействие расплава рельсовой стали с огнеупорной футеровкой 7
- Григорьев А.М., Кузнецов М.С., Шепелев Д.С., Алексеев Е.М., Григорович К.В. Оптимизация технологии производства непрерывнолитой заготовки рельсовой стали с целью повышения чистоты по неметаллическим включениям 5
- Дмитриев А.Н., Смирнова В.Г., Вязникова Е.А., Долматов А.В., Витькина Г.Ю. Влияние структуры обожженных окатышей на прочность и разрушение при испытании на статическое сжатие 11
- Дмитриев А.Н., Смороков А.А., Кантаев А.С., Никитин Д.С., Витькина Г.Ю. Фтораммонийный способ переработки титановых шлаков 3
- Ефремов Д.Б., Герасимова А.А. Получение магнитов из материала системы Fe – Cr – Co методами селективного лазерного спекания 10
- Жучков В.И., Заякин О.В., Акбердин А.А. Перспективы использования бора в металлургии. Сообщение 1 7
- Жучков В.И., Заякин О.В., Акбердин А.А. Перспективы использования бора в металлургии. Сообщение 2 9
- Зайдес С.А., Фам Ван Ань, Климова Л.Г. Повышение качества калиброванной стали поверхностным деформированием. Часть 2. Влияние охватывающего поверхностного деформирования на остаточные напряжения в цилиндрических прутках 5
- Запарий Вас.В., Мельников Н.Н., Гижевский Б.А., Запарий В.В. Вклад советской металлургии в создание и начало серийного производства советского тяжелого танка серии «КВ» (1939 – 1941 гг.) 9
- Кантюков Р.Р., Запелов Д.Н., Вагапов Р.К. Исследование коррозионной активности сред и стойкости используемых материалов в условиях присутствия агрессивного диоксида углерода 11
- Козырев Н.А., Крюков Р.Е., Усольцев А.А., Кибко Н.В., Башенко Л.П. Разработка новой порошковой проволоки на основе пыли газоочистки силикомарганца 12

- Козырев Н.А., Михно А.Р., Усольцев А.А., Крюков Р.Е., Симачев А.С. О возможности использования шлака силикомарганца и ковшевого электросталеплавильного шлака при изготовлении сварочных флюсов 10
- Колмаков А.Г., Иванников А.Ю., Каплан М.А., Кирсанкин А.А., Севостьянов М.А. Коррозионностойкие стали в аддитивном производстве 9
- Максимов Е.А., Шаталов Р.Л., Шаламов В.Г. Разработка методики расчета остаточных напряжений и параметров пружинения листа на роликовой правильной машине 1
- Метелкин А.А., Шешуков О.Ю., Савельев М.В., Шевченко О.И., Егизарьян Д.К. Применение ионной теории для расчета сульфидной емкости шлаков 2
- Науменко В.В., Сметанин К.С., Мунтин А.В., Баранова О.А., Ковтунов С.В. Особенности формирования структуры и механических свойств в прокате различной толщины из низкоуглеродистой микролегированной стали в условиях литейно-прокатного комплекса 9
- Плешивцев К.Н., Шешуков О.Ю., Метелкин А.А., Шевченко О.И. Изучение процесса удаления водорода в циркуляционном вакууматоре в условиях КЦ-2 ПАО «НЛМК» 8
- Полевой Е.В., Симонов Ю.Н., Козырев Н.А., Шевченко Р.А., Башенко Л.П. Исследование фазовых и структурных превращений при формировании сварного соединения из рельсовой стали. Сообщение 1. Термокинетическая диаграмма распада переохлажденного аустенита рельсовой стали R350LHT 2
- Полевой Е.В., Симонов Ю.Н., Козырев Н.А., Шевченко Р.А., Башенко Л.П. Исследование фазовых и структурных превращений при формировании сварного соединения из рельсовой стали. Сообщение 2. Изотермическая диаграмма кинетики распада переохлажденного аустенита рельсовой стали R350LHT 4
- Полевой Е.В., Симонов Ю.Н., Козырев Н.А., Шевченко Р.А., Михно А.Р. Исследование фазовых и структурных превращений при формировании сварного соединения из рельсовой стали. Сообщение 3. Использование термокинетической и изотермической диаграммы распада аустенита для выбора оптимальных режимов электроконтактной сварки 6
- Рыбенко И.А., Протопопов Е.В. Термодинамическое моделирование процессов восстановления железа 11
- Савельев С.Г., Кондратенко М.Н. Системное исследование технологических параметров, определяющих интенсивность агломерационного процесса 3
- Самусев С.В., Кондрушин А.В., Фадеев В.А. Исследование формоизменения при непрерывной формовке прямых труб 1
- Сараев Ю.Н., Безбородов В.П., Перовская М.В., Семенчук В.М. Модификация поверхностного слоя стали соединениями с высокой температурой плавления методами электрошлаковой наплавки 9
- Снитко С.А., Яковченко А.В., Горбатько С.М. Метод учета остаточных технологических напряжений при моделировании напряженно-деформированного состояния диска железнодорожного колеса. Сообщение 1 5

Снитко С.А., Яковченко А.В., Горбатюк С.М. Метод учета остаточных технологических напряжений при моделировании напряженно-деформированного состояния диска железнодорожного колеса. Сообщение 2	7
Солоненко В.В., Протопопов Е.В., Темлянец М.В., Якушевич Н.Ф., Сафонов С.О. Особенности процессов пыле- и дымообразования при газокислородной прокатке конвертерной ванны	2
Сурикова Н.С., Власов И.В., Деревягина Л.С., Гордиенко А.И., Наркевич Н.А. Влияние режимов поперечно-винтовой прокатки на механические свойства и вязкость разрушения трубной стали	1
Темлянец М.В., Базайкина О.Л., Темлянцев Е.Н., Целлермаер В.Я. Моделирование термонапряжений при упрочнении поверхности изделия тепловым импульсом	11
Уманский А.А., Юрьев А.Б. Разработка методики совершенствования прокатки рельсовых сталей на основе комплексного критерия оптимизации	11
Уманский А.А., Юрьев А.Б., Дорофеев В.В., Думова Л.В. Исследования напряженно-деформированного состояния металла на начальной стадии прокатки железнодорожных рельсов	8
Уманский А.А., Юрьев А.Б., Думова Л.В. Исследования закономерностей течения металла и трансформации дефектов при прокатке в черновых клетях универсального рельсобалочного стана	10
Черемискина Н.А., Щукина Н.В., Лошкарев Н.Б., Лавров В.В. Особенности конструкции термической печи с барабанным механизмом перемещения заготовок	2
Шешуков О.Ю., Катаев В.В. Влияние титана и циркония на структуру и жаростойкость низкоуглеродистых железоалюминиевых сплавов	9

РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Нохрина О.И., Рожихина И.Д., Рыбенко И.А., Голодова М.А., Израильский А.О. Гидрометаллургическое обогащение полиметаллических и железомарганцевых руд	4
Рыбенко И.А., Нохрина О.И., Рожихина И.Д., Голодова М.А., Ходосов И.Е. Исследование процесса восстановления железа из концентратов гидрометаллургического обогащения	10

ЭКОЛОГИЯ И РАЦИОНАЛЬНОЕ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

Глушакова О.В., Черникова О.П. Влияние предприятий черной металлургии на качество атмосферного воздуха как экологической составляющей устойчивого развития территорий. Сообщение 1	4
Глушакова О.В., Черникова О.П. Влияние предприятий черной металлургии на качество атмосферного воздуха как экологической составляющей устойчивого развития территорий. Сообщение 2	8
Голик В.И., Дмитрак Ю.В., Разоренов Ю.И., Масленников С.А., Ляшенко В.И. Механохимическая технология извлечения железа из хвостов обогащения	4
Мешалкин В.П., Бутусов О.Б., Дови В.Дж., Белозерский А.Ю., Челноков В.В. Оценка воздействия хими-	

ческих загрязнений предприятий черной металлургии на лесные массивы с использованием спутниковых фотоизображений

Шешуков О.Ю., Егизарьян Д.К., Лобанов Д.А. Безотходная переработка ковшевого и электропечного шлака ...	3
---	---

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Алеутдинова М.И., Фадин В.В. О разрушении поверхностных слоев вольфрама и стальсодержащих материалов при скольжении с током по молибдену	2
Беломытцев М.Ю. Исследование окалиностойкости жаропрочного никелевого сплава со структурой γ' -фазы	1
Дудкина Н.Г., Арисова В.Н. Структура и свойства поверхностного слоя стали 40Х, подвергнутой электрохимической обработке с динамическим силовым воздействием	4
Иванов И.В., Эмурлаев К.И., Руктуев А.А., Тюрин А.Г., Батаев И.А. Структура высокоэнтропийного сплава AlCoCrFeNi после деформации по схеме одноосного сжатия и термической обработки	10
Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Загуляев Д.В., Коновалов С.В., Рубаникова Ю.А. Повышение функциональных свойств сплавов электронно-пучковой обработкой	2
Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Коновалов С.В., Шлярова Ю.А., Воробьев С.В. Структурно-фазовые изменения высокоэнтропийного сплава при облучении импульсным электронным пучком	11
Иванов Ю.Ф., Осинцев К.А., Громов В.Е., Коновалов С.В., Панченко И.А. Деформационное поведение высокоэнтропийного сплава системы Al–Co–Cr–Fe–Ni, изготовленного методом проволоочно-дугового аддитивного производства	1
Католиков В.Д., Логачев И.А., Комолова О.А., Железный М.В., Семин А.Е. Процесс азотирования при получении порошка и исследование структуры сплава ЭП741НП, легированного азотом	1
Костина М.В., Криворотов В.И., Костина В.С., Кудряшов А.Э., Мурадян С.О. Особенности химического состава и структурно-фазового состояния, обуславившие снижение коррозионной стойкости деталей из стали 18Cr-10Ni	3
Малушин Н.Н., Романов Д.А. Физическая природа упрочнения теплостойкого металла высокой твердости, сформированного плазмой в среде азота	12
Маркидинов А.В., Старостенков М.Д., Лубяной Д.А., Захаров П.В., Липунов В.Н. Моделирование процесса заживления пор цилиндрической формы под воздействием ударных волн в кристалле, подвергнутом сдвиговой деформации	6
Никулин С.А., Рогачев С.О., Белов В.А., Комиссаров А.А., Турилина В.Ю., Шплис Н.В., Николаев Ю.А. Влияние длительного высокотемпературного воздействия на ударную вязкость основного металла и металла шва сварного соединения стали 22К	7

Осинцев К.А., Громов В.Е., Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф., Панченко И.А. Высокоэнтропийные сплавы: структура, механические свойства, механизмы деформации и применение	4
Осколкова Т.Н., Глезер А.М., Симачев А.С. Поверхностное упрочнение твердосплавного инструмента на основе карбида вольфрама концентрированными потоками энергии	12
Симачев А.С., Осколкова Т.Н., Уманский А.А., Головатенко А.В. Исследование неметаллических включений в различных зонах кристаллизации рельсовой стали марки Э90ХАФ	2
Смирнов А.Н., Попова Н.А., Абабков Н.В., Князев К.В., Никоненко Е.Л. Влияние степени деформации сварных соединений аустенитных сталей на параметры субструктуры и поля внутренних напряжений в зоне линии сплавления	8
Чжан Юн-Цзюнь Анализ микроструктуры графитизированной стали после деформации сжатием в условиях комнатной температуры методом дифракции обратно рассеянных электронов	3
Юрьев А.А., Кормышев В.Е., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Шлярова Ю.А. Физическая природа упрочнения поверхности рельсов при длительной эксплуатации	12

ИННОВАЦИИ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ ПРОМЫШЛЕННОМ И ЛАБОРАТОРНОМ ОБОРУДОВАНИИ, ТЕХНОЛОГИЯХ И МАТЕРИАЛАХ

Колмогоров Г.Л., Мельникова Т.Е. Гидродинамический эффект технологической смазки и формирование режимов трения при листовой прокатке	12
Кузнецов В.А., Кузнецова Е.С., Громов В.Е. Модель объекта регулирования температуры параметрами электростимулирующего воздействия	6
Лехов О.С., Михалев А.В. Расчет температуры и термоупругих напряжений в бойках с буртами установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформирования при получении стальных сортовых заготовок. Сообщение 2	2
Лехов О.С., Шевелев М.М. Оценка качества стальных трехслойных биметаллических полос при получении на установке непрерывного литья и деформации	10
Никитин А.Г., Епифанцев Ю.А., Медведева К.С. Математическая модель определения количества упоров, расположенных на валке одновалковой дробильной машины	12
Никитин А.Г., Фастыковский А.Р., Шабунов М.Е., Курочкин Н.М., Баженов И.А. Перспективы развития энергосберегающих способов дробления хрупких материалов	6
Одинокое В.И., Евстигнеев А.И., Дмитриев Э.А., Александров С.Ю., Усанов Г.И. Математическое моделирование процесса заполнения жидким металлом кристаллизатора УНРС при его подаче из вращающегося погружного стакана	4
Седых Л.В., Борисов П.В., Пашков А.Н., Горбатюк Н.В., Суркова Р.Ю., Маматкулов Ж.Х. Разработка конструкции и технологии изготовления импеллера флотационной машины на основе аддитивных технологий	5

Чиченев Н.А., Горбатюк С.М., Горовая Т.Ю., Фортунатов А.Н. Снижение внеплановых простоев оборудования при проведении ремонтов и модернизации на основе прочностного анализа	12
---	----

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Акбердин А.А., Ким А.С., Султангазиев Р.Б. Поверхностное натяжение расплавов системы $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{B}_2\text{O}_3$	1
Бердников В.И., Гудим Ю.А. К термодинамике восстановления железа из оксидов	5
Бердников В.И., Гудим Ю.А. Химические реакции при восстановлении железа из оксидов в среде монооксида углерода	3
Большов Л.А., Корнейчук С.К., Большова Э.Л. Вагнеровский параметр взаимодействия азота с кобальтом в жидких сплавах на основе никеля	5
Большов Л.А., Корнейчук С.К., Большова Э.Л. Вагнеровский параметр взаимодействия азота с хромом в жидких сплавах на основе никеля	9
Большов Л.А., Корнейчук С.К., Большова Э.Л. Термодинамика растворов азота в жидком никеле	3
Винокуров Е.Г., Фарафонов В.В., Мешалкин В.П. Высокоэнтропийные сплавы и периодическая таблица элементов Д.И. Менделеева	3
Вусихис А.С., Леонтьев Л.И., Селиванов Е.Н. Термодинамическое моделирование восстановления железа и никеля из расплава $\text{B}_2\text{O}_3-\text{CaO}-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{NiO}$ смесями $\text{CO}-\text{CO}_2$ и $\text{H}_2-\text{H}_2\text{O}$	5
Вусихис А.С., Леонтьев Л.И., Селиванов Е.Н. Термодинамическое моделирование восстановления железа и цинка из расплава $\text{B}_2\text{O}_3-\text{CaO}-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{ZnO}$ смесями $\text{CO}-\text{CO}_2$ и $\text{H}_2-\text{H}_2\text{O}$	7
Вусихис А.С., Леонтьев Л.И., Селиванов Е.Н., Сергеева С.В., Тюшняков С.Н. Термодинамическое моделирование восстановления железа и никеля из оксидных расплавов	3
Вусихис А.С., Селиванов Е.Н., Сергеева С.В., Леонтьев Л.И. Термодинамическое моделирование восстановления металлов из расплавов высокожелезистой окисленной никелевой руды	1
Косдаулетов Н., Мухамбетгалеев Е., Рошин В.Е. Разделение компонентов железомарганцевой руды бесконтактным и контактным карботермическим восстановлением	10
Крутский Ю.Л., Гудыма Т.С., Дюкова К.Д., Кузьмин Р.И., Крутская Т.М. Дибориды некоторых переходных металлов: свойства, области применения и методы получения. Часть 2. Дибориды хрома и циркония (обзор)	6
Крутский Ю.Л., Черкасова Н.Ю., Гудыма Т.С., Нецкина О.В., Крутская Т.М. Дибориды некоторых переходных металлов. Свойства, области применения и методы получения. Часть 1. Дибориды титана и ванадия (обзор)	2
Макровец Л.А., Самойлова О.В., Михайлов Г.Г., Бакин И.В. Термодинамический анализ раскислительной способности стронция в жидком железе в присутствии алюминия	10

Макровец Л.А., Самойлова О.В., Михайлов Г.Г., Бакин И.В. Фазовые равновесия, реализующиеся при раскислении силикостронцием низкоуглеродистого расплава на основе железа	6
Протопопов Е.В., Темлянец М.В., Якушевич Н.Ф., Солоненко В.В., Сафонов С.О. Исследование особенностей дожигаания отходящих газов в конвертерах при использовании двухфазных кислородных фурм	12
Уполовникова А.Г., Бабенко А.А., Смирнов Л.А., Михайлова Л.Ю. Прямое микролегирование стали церием под шлаками системы $\text{CaO-SiO}_2\text{-Ce}_2\text{O}_3$ –15 % Al_2O_3 –8 % MgO дополнительными восстановителями	8

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Богатова М.Ж., Чибизова С.И. Статистическое моделирование температурных режимов работы нагревательных печей листовых станов горячей прокатки	5
Вильданов С.К., Подгородецкий Г.С. Применение методов математической статистики к измерению температуры стали в сталеразливочном и промежуточном ковшах при непрерывной разливке стали	7
Корнет М.Е., Раскина А.В., Корнеева А.А. Непараметрический алгоритм управления температурным режимом металла на участке конвертер – МНЛЗ	6
Лицин К.В., Цуканов А.В. Разработка автоматизированного электропривода системы управления двухкоординатным станком сварки	5
Мышляев Л.П., Венгер К.Г., Грачев В.В., Ивушкин К.А. Задачи идентификации структур материалов на основе фрактальных представлений	4
Одионов В.И., Дмитриев Э.А., Евстигнеев А.И., Александров С.Ю. Моделирование нового способа подачи и перемешивания жидкого металла в кристаллизаторе установки непрерывной разливки стали ..	3
Рябчиков М.Ю., Рябчикова Е.С., Шманев Д.Е., Кокорин И.Д. Управление охлаждением стальной полосы при гибком производстве оцинкованного листового проката	7
Сайфуллаев С.Д., Албул С.В., Кобелев О.А., Левицкий И.А., Радюк А.Г., Титлянов А.Е. Исследование в среде ANSYS влияния конструкционных параметров на тепловые процессы в воздушной фуре доменной печи	12
Спирин Н.А., Лавров В.В., Рыболовлев В.Ю., Шнайдер Д.А., Краснобаев А.В., Гурий И.А. Цифровая трансформация пирометаллургических технологий: состояние, научные проблемы и перспективы развития	8

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

Кадыков В.Н., Мусатова А.И., Койнов Р.С. Разработка комплекса нормативных моделей функционирования подразделений металлургического предприятия	8
--	---

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Бердников В.И., Гудим Ю.А. Химические реакции при восстановлении железа из оксидов водородом	1
--	---

В ПОРЯДКЕ ДИСКУССИИ

Громов В.Е., Рубаникова Ю.А., Коновалов С.В., Осинцев К.А., Воробьев С.В. Формирование улучшенных механических свойств высокоэнтропийного сплава Cantor	8
Громов В.Е., Шлярова Ю.А., Коновалов С.В., Воробьев С.В., Перегудов О.А. Применение высокоэнтропийных сплавов	10
Чуманов И.В., Алексеев И.А., Сергеев Д.В. Моделирование поведения электромагнитных сил постоянного тока, действующих на каплю жидкого металла в процессе электрошлакового переплава	7

ОТКЛИКИ И РЕЦЕНЗИИ

Якушевич Н.Ф., Гизатулин Р.А. Отзыв на книгу Рощина В.Е., Рощина А.В. «Физика пирометаллургических процессов»	6
---	---

ПОЗДРАВЛЕНИЯ

А.М. Глезер и В.Е. Громов в списке самых цитируемых ученых мира	12
60 лет Михаилу Рудольфовичу Филонову	6
К 90-летию Владимира Николаевича Перетягко	12
К 70-летию Анатолия Алексеевича Бабенко	2
К 70-летию Константина Всеволодовича Григоровича	9
К 80-летию Василия Ефимовича Рощина	6
К 90-летию Владимира Ивановича Жучкова	7
К юбилею Валерия Павловича Мешалкина	8
В память Глебова Александра Георгиевича	10
Костина М.В., Жекова Л.Ц. Памяти профессора Цоло Ра-шева (1933 – 2019)	1
Памяти Геннадия Николаевича Еланского	7
Памяти Юрия Сергеевича Карабасова	12

INDEX OF ARTICLES

“IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY” FOR 2021. VOL. 64

SUPERDUTY STEEL

- Klevtsov G.V., Valiev R.Z., Fesenyuk M.V., Klevtsova N.A., Tyur'kov M.N., Abramova M.M., Raab G.I. Strength and fracture mechanism during torsion of ultrafine-grained austenitic steel for medical applications 11

METALLURGICAL TECHNOLOGIES

- Aksenova V.V., Alimbaev S.A., Pavlov A.V., Mustafin R.M. Briquetting of porous alumina-containing materials with organic binders 5
- Bel'skii S.M., Shopin I.I., Shkarin A.N. On adequacy of parameters of strip's cross-section profile. Part 1. Predictive interval 1
- Bel'skii S.M., Shopin I.I., Shkarin A.N. On adequacy of parameters of strip cross-section profile. Part 2. Local thickenings and thinnings 3
- Cheremiskina N.A., Shchukina N.V., Loshkarev N.B., Lavrov V.V. Design features of thermal furnace with a drum mechanism for blanks transportation 2
- Dmitriev A.N., Smirnova V.G., Vyaznikova E.A., Dolmatov A.V., Vit'kina G.Yu. Influence of structure of burned pellets on strength and destruction in static compression tests 11
- Dmitriev A.N., Smorokov A.A., Kantaev A.S., Nikitin D.S., Vit'kina G.Yu. Fluorammonium method of titanium slag processing 3
- Efremov D.B., Gerasimova A.A. Production of magnets from the material of Fe – Cr – Co system by selective laser sintering 10
- Grigor'ev A.M., Grigorovich K.V., Em A.Yu., Morozov A.O. Interaction of rail steel melt with refractory lining 7
- Grigor'ev A.M., Kuznetsov M.S., Shepelev D.S., Alekseev E.M., Grigorovich K.V. Optimization of production technology of continuous cast rail steel for increasing its purity by non-metallic inclusions 5
- Kantuyukov R.R., Zapevalov D.N., Vagapov R.K. Media corrosiveness and materials resistance at presence of aggressive carbon dioxide 11
- Kolmakov A.G., Ivannikov A.Yu., Kaplan M.A., Kirsankin A.A., Sevost'yanov M.A. Corrosion-resistant steels in additive manufacturing 9
- Kozyrev N.A., Kryukov R.E., Usol'tsev A.A., Kibko N.V., Bashchenko L.P. Development of a new powder wire based on silica manganese dust and gas cleaning 12
- Kozyrev N.A., Mikhno A.R., Usol'tsev A.A., Kryukov R.E., Simachev A.S. On possibility of using silicomanganese slag and ladle electric steelmaking slag in manufacture of welding fluxes 10
- Maksimov E.A., Shatalov R.L., Shalamov V.G. Calculation of residual stresses and parameters of sheet springing on roller leveler 1
- Metelkin A.A., Sheshukov O.Yu., Savel'ev M.V., Shevchenko O.I., Egiazar'yan D.K. Application of ionic theory to calculate sulfide capacity of slags 2
- Naumenko V.V., Smetanin K.S., Muntin A.V., Baranova O.A., Kovtunov S.V. Features of the formation of

- structure and mechanical properties in rolled products of various thicknesses of low-carbon microalloyed steel produced by casting and rolling complex 9
- Pleshivtsev K.N., Sheshukov O.Yu., Metelkin A.A., Shevchenko O.I. Hydrogen removal in circulating vacuum degasser under conditions of PJSC “NLMK” 8
- Polevoi E.V., Simonov Yu.N., Kozyrev N.A., Shevchenko R.A., Bashchenko L.P. Phase and structural transformations when forming a welded joint from rail steel. Report 1. Thermokinetic diagram of decomposition of supercooled austenite of R350LHT rail steel 2
- Polevoi E.V., Simonov Yu.N., Kozyrev N.A., Shevchenko R.A., Bashchenko L.P. Phase and structural transformations when forming a welded joint from rail steel. Report 2. Isothermal diagram of decomposition of supercooled austenite of R350LHT rail steel 4
- Polevoi E.V., Simonov Yu.N., Kozyrev N.A., Shevchenko R.A., Mikhno A.R. Phase and structural transformations when forming a welded joint from rail steel. Report 3. The use of thermokinetic and isothermal diagrams of austenite decomposition for selection of optimal modes of electric contact welding 6
- Rybenko I.A., Protopopov E.V. Thermodynamic modeling of iron recovery processes 11
- Samusev S.V., Kondrushin A.V., Fadeev V.A. Deformation at continuous forming of longitudinal welded pipes 1
- Saraev Yu.N., Bezborodov V.P., Perovskaya M.V., Semenchuk V.M. Modification of steel surface layer by electroslag surfacing using compounds with high melting point 9
- Savel'ev S.G., Kondratenko M.N. Technological parameters determining the sintering process intensity 3
- Sheshukov O.Yu., Kataev V.V. Influence of titanium and zirconium on structure and heat-resistance of low-carbon iron-aluminium alloys 9
- Snitko S.A., Yakovchenko A.V., Gorbatyuk S.M. Accounting method for residual technological stresses in modeling the stress-deformed state of a railway wheel disk. Report 1 5
- Snitko S.A., Yakovchenko A.V., Gorbatyuk S.M. Accounting method for residual technological stresses in modeling the stress-deformed state of a railway wheel disk. Report 2 7
- Solonenko V.V., Protopopov E.V., Temlyantsev M.V., Yakushevich N.F., Safonov S.O. Nature of dust and smoke generation during gas-oxygen blasting in converter bath 2
- Surikova N.S., Vlasov I.V., Derevyagina L.S., Gordienko A.I., Narkevich N.A. Influence of cross-screw rolling modes on mechanical properties and fracture toughness of pipe steel 1
- Temlyantsev M.V., Bazaikina O.L., Temlyantseva E.N., Tsellermaer V.Ya. Modeling of thermal stresses during hardening the product surface by thermal pulse 11
- Umanskii A.A., Yur'ev A.B. Improving the technology of rolling rail steels by a comprehensive optimization parameter ... 11
- Umanskii A.A., Yur'ev A.B., Dorofeev V.V., Dumova L.V. Stress-strain state of metal at the initial stage of railway rails rolling 8
- Umanskii A.A., Yur'ev A.B., Dumova L.V. Regularities of metal flow and defects transformation during rolling in roughing stands of a universal rail and structural mill 10

Zaides S.A., Pham Van Anh, Klimova L.G. Quality improvement of calibrated steel by surface deformation. Part 2. Effect of enveloping surface deformation on residual stresses in cylindrical bars	5
Zaparii Vas.V., Mel'nikov N.N., Gizhevskii B.A., Zaparii V.V. Contribution of soviet metallurgy to creation and serial production of KV heavy tank (1939 – 1941)	9
Zhuchkov V.I., Zayakin O.V., Akberdin A.A. Prospects for using boron in metallurgy. Report 1	7
Zhuchkov V.I., Zayakin O.V., Akberdin A.A. Prospects for using boron in metallurgy. Report 2	9

RESOURCE SAVING IN FERROUS METALLURGY

Nokhrina O.I., Rozhikhina I.D., Rybenko I.A., Golodova M.A., Izrail'skii A.O. Hydrometallurgical enrichment of polymetallic and ferromanganese ore	4
Rybenko I.A., Nokhrina O.I., Rozhikhina I.D., Golodova M.A., Khodosov I.E. Iron reduction from concentrates of hydrometallurgical dressing	10

ECOLOGY AND RATIONAL USE OF NATURAL RESOURCES

Glushakova O.V., Chernikova O.P. Influence of ferrous metallurgy enterprises on atmospheric air quality as an ecological component of territories sustainable development. Report 1	4
Glushakova O.V., Chernikova O.P. Influence of ferrous metallurgy enterprises on atmospheric air quality as an ecological component of territories sustainable development. Report 2	8
Golik V.I., Dmitrak Yu.V., Razorenov Yu.I., Maslennikov S.A., Lyashenko V.I. Mechanochemical technology of iron extraction from enrichment tailings	4
Meshalkin V.P., Butusov O.B., Dovi V.G., Belozerskii A. Yu., Chelnokov V.V. Assessment of the impact of chemical pollution of ferrous metallurgy enterprises on forests using satellite photographs	11
Sheshukov O.Yu., Egiazar'yan D.K., Lobanov D.A. Wasteless processing of ladle furnace and electric arc furnace slag	3

MATERIAL SCIENCE

Aleutdinova M.I., Fadin V.V. Deterioration of surface layers of tungsten and steel-containing materials in current collection sliding against molybdenum	2
Belomytsev M.Yu. Stability to oxidation resistance of heat-resistant nickel alloy with γ' -phase structure	1
Dudkina N.G., Arisova V.N. Surface layer of 40Kh steel after electromechanical treatment with dynamic force impact	4
Ivanov I.V., Emurlaev K.I., Ruktuev A.A., Tyurin A.G., Bataev I.A. Structure of AlCoCrFeNi high-entropy alloy after uniaxial compression and heat treatment	10
Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Kononov S.V., Shlyarova Yu.A., Vorob'ev S.V. Structural phase variations in high-entropy alloy at irradiation by pulsed electron beam	11
Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Zagulyaev D.V., Kononov S.V., Rubannikova Yu.A. Increase of alloys functional properties by electronic beam processing	2

Ivanov Yu.F., Osintsev K.A., Gromov V.E., Kononov S.V., Panchenko I.A. Deformation behavior of high-entropy alloy system Al – Co – Cr – Fe – Ni achieved by wire-arc additive manufacturing	1
Katolikov V.D., Logachev I.A., Komolova O.A., Zheleznyi M.V., Semin A.E. Nitriding during powder production and study of the structure of EP741NP alloy doped with nitrogen	1
Kostina M.V., Krivorotov V.I., Kostina V.S., Kudryashov A.E., Muradyan S.O. Features of chemical composition and structural-phase state decreasing corrosion resistance of parts from 18Cr-10Ni steel	3
Malushin N.N., Romanov D.A. Physical nature of hardening of heat-resistant metal of high hardness formed by plasma in nitrogen medium	12
Markidonov A.V., Starostenkov M.D., Lubyanoi D.A., Zakharov P.V., Lipunov V.N. Modeling of healing pores of cylindrical form under the action of shock waves in a crystal subjected to shear deformation	6
Nikulin S.A., Rogachev S.O., Belov V.A., Komissarov A.A., Turilina V.Yu., Shplis N.V., Nikolaev Yu.A. Influence of long-term high-temperature action on impact toughness of base metal and weld metal of 22K steel welded joint	7
Osintsev K.A., Gromov V.E., Kononov S.V., Ivanov Yu.F., Panchenko I.A. High-entropy alloys: Structure, mechanical properties, deformation mechanisms and application	4
Oskolkova T.N., Glezer A.M., Simachev A.S. Surface hardening of tungsten carbide carbide-based carbide tools by concentrated energy flows	12
Simachev A.S., Oskolkova T.N., Umanskii A.A., Golovatenko A.V. Non-metallic inclusions in different zones of crystallization of E90KhAF rail steel	2
Smirnov A.N., Popova N.A., Ababkov N.V., Knyaz'kov K.V., Nikonenko E.L. Influence of deformation degree of austenitic steels welded joints on structural state and internal stresses fields in weld line zone	8
Yur'ev A.A., Kormyshev V. E., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Shlyarova Yu.A. Physical nature of rail surface hardening during long-term operation	12
Zhang Yong-jun EBSD analysis of graphitized steel microstructure after compression deformation at room temperature	3

INNOVATIONS IN METALLURGICAL INDUSTRIAL AND LABORATORY EQUIPMENT, TECHNOLOGIES AND MATERIALS

Chichenov N.A., Gorbatyuk S.M., Gorovaya T.Yu., Fortunatov A.N. Reduction of equipment unplanned downtime during repairs and modernization based on strength analysis	12
Kolmogorov G.L., Mel'nikova T.E. Hydrodynamic effect of technological lubrication and friction modes formation at sheet rolling	12
Kuznetsov V.A., Kuznetsova E.S., Gromov V.E. Model of the object of temperature control by electrostimulating action parameters	6
Lekhov O.S., Mikhalev A.V. Calculation of temperature and thermoelastic stresses in backups with collars of the unit of combined continuous casting and deformation in steel billets production. Report 2	2

Lekhov O.S., Shevelev M.M. Evaluation of the quality of three-layer steel bimetallic strips obtained on a unit of continuous casting and deformation	10
Nikitin A.G., Epifantsev Yu.A., Medvedeva K.S. Mathematical model for determining the number of stop blocks on the roll of a single-roll crushing machine	12
Nikitin A.G., Fastyskovskii A.R., Shabunov M.E., Kurochkin N.M., Bazhenov I.A. Prospects for energy-saving methods of crushing brittle materials	6
Odinokov V.I., Evstigneev A.I., Dmitriev E.A., Aleksandrov S.Yu., Usanov G.I. Mathematical modeling of filling the CCM mold with liquid metal during its supply from a rotating submersible nozzle	4
Sedykh L.V., Borisov P.V., Pashkov A.N., Gorbatyuk N.V., Surkova R.E., Mamatkulov J. Development of flotation machine impeller on the base of additive technologies	5

PHYSICO-CHEMICAL BASICS OF METALLURGICAL PROCESSES

Akberdin A.A., Kim A.S., Sultangaziev R.B. Surface tension of melts of $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{B}_2\text{O}_3$ system	1
Berdnikov V.I., Gudim Yu.A. Chemical reactions during iron reduction from oxides in carbon monoxide environment	3
Berdnikov V.I., Gudim Yu.A. On thermodynamics of iron reduction from oxides	5
Bol'shov L.A., Korneichuk S.K., Bol'shova E.L. Thermodynamics of nitrogen solutions in liquid nickel	3
Bol'shov L.A., Korneichuk S.K., Bol'shova E.L. Wagner interaction coefficient between nitrogen and chromium in liquid nickel-based alloys	9
Bol'shov L.A., Korneichuk S.K., Bol'shova E.L. Wagner interaction coefficient between nitrogen and cobalt in liquid nickel-based alloys	5
Kosdauletov N., Mukhambetgaliev E.K., Roshchin V.E. Separation of ferromanganese ore components by non-contact and contact carbothermic reduction	10
Krutsikii Yu.L., Cherkasova N.Yu., Gudyma T.S., Netskina O.V., Krutskaya T.M. Diborides of transition metals: Properties, application and production. Review. Part 1. Titanium and vanadium diborides	2
Krutsikii Yu.L., Gudyma T.S., Dyukova K.D., Kuz'min R.I., Krutskaya T.M. Diborides of transition metals: Properties, application and production. Review. Part 2. Chromium and zirconium diborides	6
Makrovets L.A., Samoilova O.V., Mikhailov G.G., Bakin I.V. Phase equilibrium occurring during low-carbon iron-based melt deoxidation with silicostrontium	6
Makrovets L.A., Samoilova O.V., Mikhailov G.G., Bakin I.V. Thermodynamic analysis of strontium deoxidizing ability in liquid iron at presence of aluminum	10
Protopopov E.V., Temlyantsev M.V., Yakushevich N.F., Solonenko V.V., Safonov S.O. Investigation of the features of afterburning of exhaust gases in converters when using two-tier oxygen tuyeres	12
Upolovnikova A.G., Babenko A.A., Smirnov L.A., Mikhailova L.Yu. Direct microalloying of steel with cerium under slags of $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Ce}_2\text{O}_3-15\% \text{Al}_2\text{O}_3-8\% \text{MgO}$ system with additional reducing agents	8
Vinokurov E.G., Farafonov V.V., Meshalkin V.P. High-entropy alloys and the periodic table of elements	3
Vusikhis A.S., Leont'ev L.I., Selivanov E.N. Thermodynamic modeling of iron and zinc reduction from $\text{B}_2\text{O}_3-\text{CaO}-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{ZnO}$ melt by $\text{CO}-\text{CO}_2$ and $\text{H}_2-\text{H}_2\text{O}$ mixtures	7

Vusikhis A.S., Leont'ev L.I., Selivanov E.N. Thermodynamic modeling of nickel and iron reduction from $\text{B}_2\text{O}_3-\text{CaO}-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{NiO}$ melt by $\text{CO}-\text{CO}_2$ and $\text{H}_2-\text{H}_2\text{O}$ mixtures	5
Vusikhis A.S., Leont'ev L.I., Selivanov E.N., Sergeeva S.V., Tyushnyakov S.N. Thermodynamic simulation of iron and nickel reduction from oxide melts	3
Vusikhis A.S., Selivanov E.N., Sergeeva S.V., Leont'ev L.I. Thermodynamic modeling of metal reduction from melts of high-iron oxidized nickel ore	1

INFORMATION TECHNOLOGIES AND AUTOMATIC CONTROL IN FERROUS METALLURGY

Bogatova M.Zh., Chibizova S.I. Statistical modeling of temperature operating modes of heating furnaces for hot strip mills	5
Kornet M.E., Raskina A.V., Korneeva A.A. Nonparametric control algorithm for metal temperature mode on site BOF – CCM	6
Litsin K.V., Tsukanov A.V. Automated electric drive for the control system of two-coordinate welding machine	5
Myshlyayev L.P., Wenger K.G., Grachev V.V., Ivushkin K.A. Problem of identification of materials structures based on fractal representations	4
Odinokov V.I., Dmitriev E.A., Evstigneev A.I., Aleksandrov S.Yu. Simulation of a new method for supplying and stirring liquid metal in a CCM mold	3
Ryabchikov M.Yu., Ryabchikova E.S., Shmanev D.E., Korokin I.D. Strip cooling control for flexible production of galvanized flat steel	7
Saifullaev S.D., Albul S.V., Kobelev O.A., Levitskii I.A., Radyuk A.G., Titlyanov A.E. Investigation of the influence of design parameters on thermal processes in a blast furnace tuyere using ANSYS software	12
Spirin N.A., Lavrov V.V., Rybolovlev V.Yu., Shnaider D.A., Krasnobaev A.V., Gurin I.A. Digital transformation of pyrometallurgical technologies: State, scientific problems and prospects of development	8
Vil'danov S.K., Podgorodetskii G.S. Mathematical statistics for measurement of steel temperature in steel-pouring ladle and tundish at steel continuous casting	7

ECONOMIC EFFICIENCY OF METALLURGICAL PRODUCTION

Kadykov V.N., Musatova A.I., Koinov R.S. Development of a set of regulatory models for metallurgical enterprise divisions functioning	8
---	---

SHORT REPORTS

Berdnikov V.I., Gudim Yu.A. Chemical reactions during iron reduction from oxides with hydrogen	1
--	---

IN THE ORDER OF DISCUSSION

Chumanov I.V., Alekseev I.A., Sergeev D.V. Modeling the behavior of direct current electromagnetic forces acting on a drop of liquid metal during electroslog remelting	7
---	---

Gromov V.E., Rubannikova Yu.A., Konovalov S.V., Osintsev K.A., Vorob'ev S.V. Generation of increased mechanical properties of Cantor high-entropy alloy	8
Gromov V.E., Shlyarova Yu.A., Konovalov S.V., Vorob'ev S.V., Peregudov O.A. Application of high-entropy alloys	10

RESPONSES, REVIEWS

Yakushevich N.F., Gizatulin R.A. Review on the book of Roshchin V.E. and Roshchin A.V. "Physics of Pyrometallurgical Processes"	6
---	---

CONGRATULATIONS

A.M. Glezer and V.E. Gromov in the list of the most cited scientists	12
--	----

To the 60 th Anniversary of Mikhail Rudol'fovich Filonov	6
To the 70 th Anniversary of Anatolii Alekseevich Babenko	2
To the 70 th Anniversary of Konstantin Vsevolodovich Grigorovich	9
To the 80 th Anniversary of Valerii Pavlovich Meshalkin	8
To the 80 th Anniversary of Vasilii Efimovich Roshchin	6
To the 90 th Anniversary of Vladimir Ivanovich Zhuchkov	7
To the 90 th Anniversary of Vladimir Nikolaevich Pereyat'ko	12
In memory of Gennadii Nikolaevich Elanskii	7
In memory of Glebov Aleksander Georgievich	10
In memory of Yurii Sergeevich Karabasov	12
Kostina M.V., Zhekova L.Ts. In memory of Professor Tsolo Rashev (1933 – 2019)	1

НАУКОМЕТРИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЖУРНАЛА

В 2017 году международная база данных Scopus возобновила индексирование журнала «Известия ВУЗов. Черная металлургия». На инфографике отражены текущие показатели.

Данные предоставлены сайтами www.scopus.com и www.scimagojr.com.

ИЗВЕСТИЯ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

Издатель:



Национальный исследовательский
технологический университет «МИСиС»

ISSN: 03680797

Периоды индексирования:
1971, 1974 – 1988,
2001 – 2004,
2017 – н.в.

Учредители:



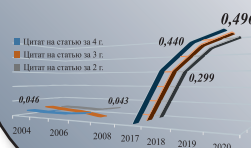
Национальный исследовательский
технологический университет «МИСиС»



СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ



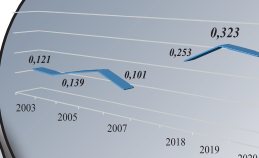
СРЕДНЕЕ
ЦИТИРОВАНИЕ
НА СТАТЬЮ



ОБЩЕЕ
КОЛИЧЕСТВО
ЦИТИРОВАНИЙ

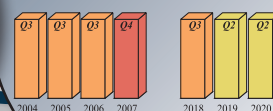


SJR



7

H Index



2020 – Q2
Metals and Alloys

Над номером работали:

Леонтьев Л.И., главный редактор

Протопопов Е.В., заместитель главного редактора

Ивани Е.А., заместитель главного редактора

Башенко Л.П., заместитель ответственного секретаря

Потапова Е.Ю., заместитель главного редактора по развитию

Долицкая О.А., научный редактор

Запольская Е.М., ведущий редактор

Киселева Н.Н., ведущий редактор

Расенец В.В., верстка, иллюстрации

Острогорская Г.Ю., менеджер по работе с клиентами

Подписано в печать 11.01.2022. Формат 60×90 ¹/₈. Бум. офсетная № 1.
Печать цифровая. Усл. печ. л. 10,75. Заказ 14124. Цена свободная.

Отпечатано в типографии Издательского Дома МИСиС.
119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4.
Тел./факс: (499) 236-76-17

IZVESTIYA

FERROUS METALLURGY

IN MEMORY OF YURII SERGEEVICH KARABASOV

DEVELOPMENT OF A NEW CORED WIRE BASED ON SILICA MANGANESE GAS-CLEANING DUST

SURFACE HARDENING OF CARBIDE TOOLS BASED ON TUNGSTEN CARBIDE BY CONCENTRATED ENERGY FLOWS

PHYSICAL NATURE OF HARDENING OF HEAT-RESISTANT METAL OF HIGH HARDNESS FORMED BY PLASMA IN NITROGEN MEDIUM

PHYSICAL NATURE OF RAIL SURFACE HARDENING DURING LONG-TERM OPERATION

REDUCTION OF EQUIPMENT UNPLANNED DOWNTIME DURING REPAIRS AND MODERNIZATION BASED ON STRENGTH ANALYSIS

HYDRODYNAMIC EFFECT OF TECHNOLOGICAL LUBRICATION AND FRICTION MODES FORMATION AT SHEET ROLLING

MATHEMATICAL MODEL FOR DETERMINING THE NUMBER OF STOP BLOCKS ON THE ROLL OF A SINGLE-ROLL CRUSHING MACHINE

FEATURES OF EXHAUST GASES AFTERBURNING IN A CONVERTER WHEN USING TWO-TIER OXYGEN LANCES FOR REFINING

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF DESIGN PARAMETERS ON THERMAL PROCESSES IN A BLAST FURNACE TUYERE USING ANSYS SOFTWARE

TO THE 90TH ANNIVERSARY OF VLADIMIR NIKOLAEVICH PERETYAT'KO

A.M. GLEZER AND V.E. GROMOV IN THE LIST OF THE MOST CITED SCIENTISTS

INDEX OF ARTICLES "IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY" FOR 2021, VOL. 64