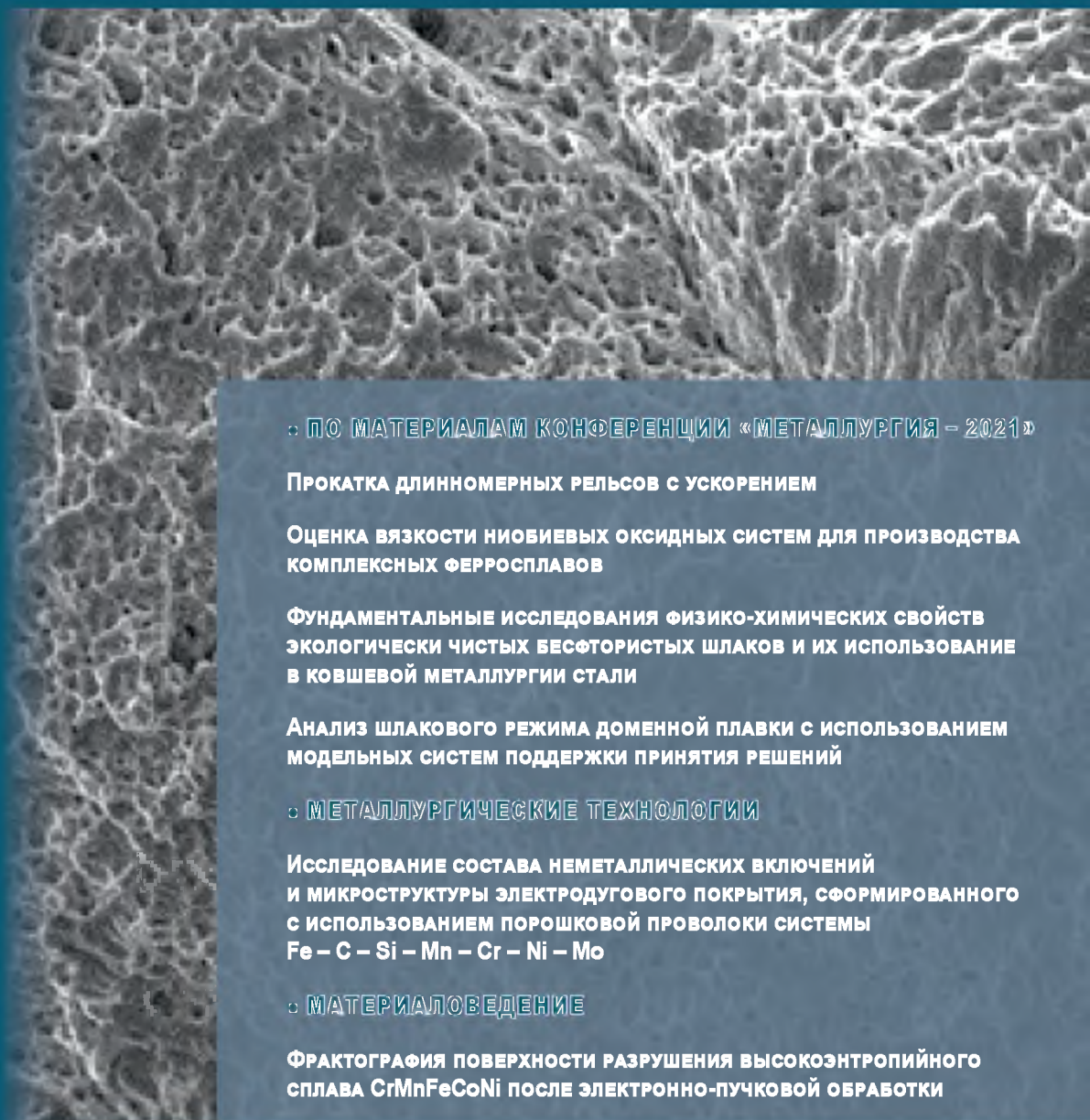


ИЗВЕСТИЯ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

Том 65 Номер 6 2022



• ПО МАТЕРИАЛАМ КОНФЕРЕНЦИИ «МЕТАЛЛУРГИЯ – 2021»

Прокатка длинномерных рельсов с ускорением

Оценка вязкости ниобиевых оксидных систем для производства комплексных ферросплавов

Фундаментальные исследования физико-химических свойств экологически чистых бесфтористых шлаков и их использование в ковшевой металлургии стали

Анализ шлакового режима доменной плавки с использованием модельных систем поддержки принятия решений

• МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Исследование состава неметаллических включений и микроструктуры электродугового покрытия, сформированного с использованием порошковой проволоки системы Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo

• МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Фрактография поверхности разрушения высокоэнтропийного сплава CrMnFeCoNi после электронно-пучковой обработки



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

ИЗВЕСТИЯ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

Том 65, Номер 6, 2022

Научно-технический журнал
Издается с января 1958 г. ежемесячно

IZVESTIYA

FERROUS METALLURGY

Volume 65, Number 6, 2022

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: redjizv@sibsiu.ru

Редакционная коллегия:

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

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

Григорович 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

Куernos 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

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 «ВНИИМЕТМАШ», 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 Гуоци, Институт перспективных материалов университета
Циньхуа, г. Шеньжень, Китай

Темлянецов 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

Шешуков 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

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».

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.

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: redjizvz@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

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 RANS, 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

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 Guo, 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

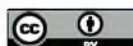
Michael Zinigrad, Dr. Sci. (Physical Chemistry), Prof., Rector, Ariel University, Israel

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

XXII Международная научно-практическая конференция «Металлургия: технологии, инновации, качество». г. Новокузнецк, 10 – 11 ноября 2021 г («Металлургия – 2021») 380

22th International Scientific and Practical Conference “Metallurgy: Technologies, Innovations, Quality”. Novokuznetsk, November 10 – 11, 2021 (“Metallurgy – 2021”) ... 380

ПО МАТЕРИАЛАМ КОНФЕРЕНЦИИ
«МЕТАЛЛУРГИЯ – 2021»

BASED ON THE MATERIALS
OF THE CONFERENCE “METALLURGY – 2021”

Соловьев В.Н., Белолипецкая Е.С. Прокатка длинномерных рельсов с ускорением 381
Черникова О.П., Златицкая Ю.А. Ресурсоэффективность металлургического производства 390
Заякин О.В., Шартдинов Р.Р., Сметанников А.Н., Кель И.Н. Оценка вязкости ниобиевых оксидных систем для производства комплексных ферросплавов 399
Бабенко А.А., Смирнов Л.А., Протопопов Е.В., Уполонникова А.Г., Сметанников А.Н. Фундаментальные исследования физико-химических свойств экологически чистых бесфтористых шлаков и их использование в ковшевой металлургии стали 406
Павлов А.В., Спирин Н.А., Бегинюк В.А., Лавров В.В., Гурин И.А. Анализ шлакового режима доменной плавки с использованием модельных систем поддержки принятия решений 413

Solov'ev V.N., Belolipetskaya E.S. Rolling of long-length rails with acceleration 381
Chernikova O.P., Zlatitskaya Yu.A. Resource efficiency of metallurgical production 390
Zayakin O.V., Shartdinov R.R., Smetannikov A.N., Kel' I.N. Viscosity of niobium oxide systems for production of complex ferroalloys 399
Babenko A.A., Smirnov L.A., Protopopov E.V., Upolonnikova A.G., Smetannikov A.N. Fundamental studies of physicochemical properties of environmentally friendly fluorine-free slags and their use in ladle steel industry 406
Pavlov A.V., Spirin N.A., Beginyuk V.A., Lavrov V.V., Gurin I.A. Analysis of slag mode of blast furnace melting using model decision support systems 413

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

METALLURGICAL TECHNOLOGIES

Козырев Н.А., Осетковский И.В., Усольцев А.А., Полевой Е.В., Михно А.Р. Исследование состава неметаллических включений и микроструктуры электродугового покрытия, сформированного с использованием порошковой проволоки системы Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo 421

Kozyrev N.A., Osetkovskii I.V., Usol'tsev A.A., Polevoi E.V., Mikhno A.R. Composition of non-metallic inclusions and microstructure of electric arc coating formed using the flux-cored wire of Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo system 421

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

MATERIAL SCIENCE

Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Осинцев К.А., Воробьев С.В., Панченко И.А. Фрактография поверхности разрушения высокоэнтропийного сплава CrMnFeCoNi после электронно-пучковой обработки 427

Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Osintsev K.A., Vorob'ev S.V., Panchenko I.A. Fractography of fracture surface of CrMnFeCoNi high-entropy alloy after electron-beam processing 427

ИННОВАЦИИ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ
ПРОМЫШЛЕННОМ И ЛАБОРАТОРНОМ
ОБОРУДОВАНИИ, ТЕХНОЛОГИЯХ
И МАТЕРИАЛАХ

INNOVATIONS IN METALLURGICAL
INDUSTRIAL AND LABORATORY
EQUIPMENT, TECHNOLOGIES
AND MATERIALS

Никитин А.Г., Баженов И.А., Герасимов С.П. Анализ эксплуатационного ресурса привода волочильного стана 434

Nikitin A.G., Bazhenov I.A., Gerasimov S.P. Analysis of the drawing mill drive operation 434

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
И АВТОМАТИЗАЦИЯ
В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ**

Кулаков С.М., Койнов Р.С., Ляховец М.В., Тараборина Е.Н. Автоматизированное управление сложными металлургическими агрегатами на основе метода прецедентов	437
Памяти Михаила Васильевича Астахова	447
Подгородецкий Геннадий Станиславович (23.01.1958 – 21.06.2022)	448

**INFORMATION TECHNOLOGIES
AND AUTOMATIC CONTROL
IN FERROUS METALLURGY**

Kulakov S.M., Koinov R.S., Lyakhovets M.V., Taraborina E.N. Automated control of complex metallurgical units based on the CBR method	437
In memory of Mikhail Vasil'evich Astakhov	447
Podgorodetskii Gennadii Stanislavovich (23.01.1958 – 21.06.2022)	448



Оригинальная статья

УДК 621.791.042.3

DOI 10.17073/0368-0797-2022-6-421-426

<https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2323>



ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ И МИКРОСТРУКТУРЫ ЭЛЕКТРОДУГОВОГО ПОКРЫТИЯ, СФОРМИРОВАННОГО С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКИ СИСТЕМЫ Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo

Н. А. Козырев, И. В. Осетковский, А. А. Усольцев,
Е. В. Полевой, А. Р. Михно

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

Аннотация. Изучен состав неметаллических включений и микроструктура электродугового покрытия, полученного с использованием порошковой проволоки системы Fe–C–Si–Mn–Cr–Ni–Mo. Формирование электродугового покрытия осуществлялось с помощью аппарата для автоматической дуговой сварки ASAW-1250 с использованием исследуемой порошковой проволоки. С целью снижения загрязненности наплавленного металла оксидными неметаллическими включениями в состав порошковой проволоки вводили пыль газоочистки алюминиевого производства (вместо аморфного углерода). Состав электродугового покрытия определяли с помощью спектрометра XRF-1800. Микроструктуру электродуговых покрытий изучали методом оптической микроскопии. Изучение фазового и элементного составов проводили методами сканирующей электронной микроскопии на приборе MIRA 3 LMH. Неметаллические включения в электродуговом покрытии состоят из оксидов кремния, фтора, кальция, алюминия и магния. Более темная составляющая во включении в виде прямолинейных кристаллов направлена от поверхности в глубь включения. По фазовому составу включения и более темные составляющие близки, но несколько отличаются по содержанию химических элементов. Во включении наблюдается небольшая темная составляющая округлой формы (оксиды алюминия и магния). Следы серы выделяются по контуру глобулей. Металлографический анализ поверхности показал, что микроструктура наплавленного слоя представляет собой грубоиглочатый мартенсит. Структура равномерная, имеет дендритное (столбчатое) строение, характерное для литого металла. Результаты проведенных исследований позволяют выработать мероприятия по снижению содержания неметаллических включений (элементы фтора, натрия и алюминия), которые, в свою очередь, могут неблагоприятно влиять на физико-механические свойства наплавленного слоя, например, путем использования рафинирующих добавок для снижения загрязненности наплавленного слоя неметаллическими включениями.

Ключевые слова: порошковая проволока, электродуговое покрытие, состав неметаллических включений, микроструктура, твердость

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Кемеровской области в рамках научного проекта № 20-48-420003 p_a «Развитие физико-химических и технологических основ создания принципиально нового способа сварки дифференцированно термоупрочненных железнодорожных рельсов».

Для цитирования: Козырев Н.А., Осетковский И.В., Усольцев А.А., Полевой Е.В., Михно А.Р. Исследование состава неметаллических включений и микроструктуры электродугового покрытия, сформированного с использованием порошковой проволоки системы Fe–C–Si–Mn–Cr–Ni–Mo // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 6. С. 421–426.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-6-421-426>

Original article

COMPOSITION OF NON-METALLIC INCLUSIONS AND MICROSTRUCTURE OF ELECTRIC ARC COATING FORMED USING THE FLUX-CORED WIRE OF Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo SYSTEM

N. A. Kozyrev, I. V. Osetkovskii, A. A. Usol'tsev,
E. V. Polevoi, A. R. Mikhno

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

Abstract. The article considers the study of composition of the non-metallic inclusions and microstructure of the electric arc coating using the flux-cored wire of Fe–C–Si–Mn–Cr–Ni–Mo system. Formation of the electric arc coating was carried out using the ASAW-1250 automatic arc welding machine by the investigated wire. In order to influence the level of contamination of the deposited metal with non-metallic oxide inclusions, aluminum gas purification

dust was introduced into the flux-cored wire (instead of amorphous carbon). Composition of the electric arc coating was determined using XRF-1800 spectrometer. Microstructure of the electric arc coatings was studied by optical microscopy. The phase and elemental compositions were studied using scanning electron microscopy on MIRA 3 LMH instrument. Non-metallic inclusions in the electric arc coating consist of oxides of silicon, fluorine, calcium, aluminum and magnesium oxides. The darker component in the inclusion, which looks like rectilinear crystals directed from the surface deep into the inclusion, has a similar phase composition, but differs somewhat in the content of chemical elements. A small dark component of a rounded shape (aluminum and magnesium oxides) is observed in the inclusion. Traces of sulfur are highlighted along the contour of the globules. Metallographic analysis of the deposited surface showed that the microstructure of the deposited layer is a coarse-needle martensite. The structure is uniform, has a dendritic (columnar) structure characteristic for cast metal. The results of the conducted investigations allow measures to be developed to reduce the content of non-metallic inclusions containing elements of fluorine, sodium and aluminum, which in turn may adversely affect the physical and mechanical properties of the deposited layer, for example, by using refining additives to reduce the contamination of the deposited layer with non-metallic inclusions.

Keywords: flux-cored wire, electric arc coating, composition of non-metallic inclusions, microstructure, hardness

Funding: The research was supported by the RFBR and the Kemerovo region within the framework of the scientific project No. 20-48-420003 p a "Development of physico-chemical and technological foundations for the creation of a fundamentally new method of welding differentially heat-strengthened railway rails".

For citation: Kozыrev N.A., Osetkovskii I.V., Usol'tsev A.A., Polevoi E.V., Mikhno A.R. Composition of non-metallic inclusions and microstructure of electric arc coating formed using the flux-cored wire of Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo system. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 6, pp. 421–426. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-6-421-426>

ВВЕДЕНИЕ

Вопросам наплавки абразивно-изнашивающихся изделий в настоящее время уделяется большое внимание. Особый интерес вызывают наплавочные проволоки систем Fe–C–Si–Mn–Cr–Ni–Mo типа А и В по классификации МИС [1–3], а также порошковые проволоки, основанные на тех же принципах легирования [4–6].

Рабочие поверхности технологического оборудования для снижения быстрого износа необходимо упрочнять. Формирование на рабочей поверхности технологического оборудования электродугового покрытия методом наплавки обеспечивает продление срока службы металлических изделий [7–9].

Электродуговое покрытие увеличивает срок эксплуатации оборудования, уменьшает количество запасных частей, расходы на обслуживание и увеличивает эффективность его эксплуатации [9–11].

Представляет интерес разработка технологичных наплавочных материалов [12–15], обеспечивающих в наплавленном металле структуры низкоуглеродистого мартенсита.

Перспективным направлением в создании технологичных формировании износостойких покрытий и наплавки электродуговым способом является применение экономно-легированных технологичных наплавочных материалов [13–15]. Сдерживающим фактором развития рассматриваемого направления является отсутствие данных о зависимостях и закономерностях влияния различных факторов на структуру и свойства покрытий. Поэтому особый интерес представляют исследования, в которых изучаются микроструктура электродуговых покрытий и состав неметаллических включений, получаемых при наплавке [16].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Процессы наплавки и изготовления порошковой проволоки, а также состав наполнителя для ис-

следуемой порошковой проволоки описаны в работах [16–20].

Состав электродугового покрытия определяли с помощью спектрометра XRF-1800 [17, 18, 20]. Структурный анализ наплавленного электродугового покрытия проводили в диапазоне увеличений 100–1000 на микроскопе OLYMPUS GX-51 (в светлом поле).

Твердость наплавленного металла определяли на микротвердомере компании Qness от поверхности наплавки на образцах размером 20×20×20 мм в глубину через 1,0 мм методом Виккерса нагрузкой 49 Н (HV 5) с последующим переводом в единицы Роквелла.

С целью определения химического состава неметаллических включений в наплавленном слое, а также распределения элементов по включениям проводили исследования на сканирующем электронном микроскопе MIRA 3 LMH [21]. Последний позволяет проводить быстрый поиск и идентификацию по морфологии и химическому составу неметаллических включений на поверхности исследуемых металлографических шлифов, обеспечивает проведение качественного и количественного рентгеноспектрального микроанализов с помощью энергодисперсионного спектрометра, определяет химический состав микрообъемов твердого вещества, устанавливает характер распределения и состава карбидной, карбонитридной и оксидокарбидной фаз.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящей работе определяются составы неметаллических включений в электродуговом покрытии, сформированном с использованием порошковой проволоки системы Fe–C–Si–Mn–Cr–Ni–Mo. В работах [18–20] установлен оптимальный состав порошковой проволоки системы Fe–C–Si–Mn–Cr–Ni–Mo для получения электродуговых покрытий, обеспечивающих требуемый уровень эксплуатационных свойств.

Для определения состава неметаллических включений в электродуговом покрытии были наплавлены

многокомпонентные слои на подложку из стали марки 09Г2С. Состав электродугового покрытия, полученного с использованием исследуемой проволоки, следующий: 0,58 % С; 0,64 % Si; 0,92 % Mn; 1,15 % Cr; 0,35 % Mo; 0,37 % Ni; 0,51 % V; 0,076 % S; 0,02 % Р. Твердость электродугового покрытия 41,5 – 58,0 HRC.

При исследовании поверхности шлифа в образце выявлены в малом количестве однотипные силикатные включения глобулярного вида. Размер выявленных

включений не превышает 47 мкм. Наблюдается большое количество мелких включений сульфидов глобулярной формы диаметром до 3 мкм.

Количественный анализ химического состава включений проводили по двум выявленным включениям по двум спектрам в каждом. Результаты анализа неметаллических включений, выявленных в пробах, представлены в табл. 1 – 3.

Т а б л и ц а 2

Химический состав неметаллического включения диаметром 47 мкм

Table 2. Chemical composition of the nonmetallic inclusion with a diameter of 47 μm

Элемент	Количество элемента в спектре			
	1 (основа)	2	3 (темная фаза)	4 (контур)
O	38,40	44,12	37,05	7,12
F	13,30	–	9,61	5,94
Mg	9,12	16,94	16,32	2,75
Al	10,81	36,97	12,20	2,58
Si	14,23	–	15,37	3,67
S	–	–	–	26,03
Ca	12,12	0,17	7,80	3,92
Mn	2,02	1,79	0,62	48,00
Fe	–	–	1,02	–

Т а б л и ц а 3

Химический состав (СЭМ)

Table 3. Chemical composition (SEM)

Диаметр, мкм	Химический состав (СЭМ)	
	по элементам	по процентам
33	основа – Si/Mn/Mg/Al/Ca	22,0/10,7/9,9/3,5/1,6
47	основа – Si/F/Ca/Al/Mg темная фаза – Mg/Si/Al/Ca	14,2/13,3/12,0/10,8/9 16,3/15,4/12,2/7,8

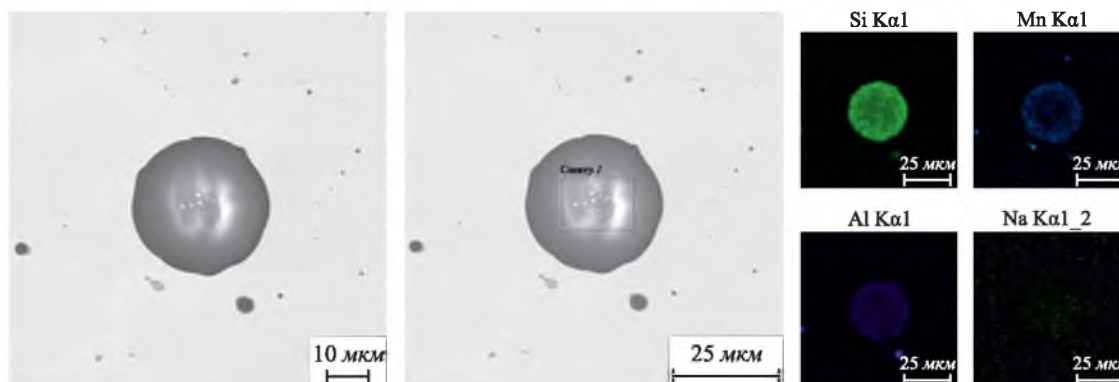


Рис. 1. Неметаллические включения диаметром 33 мкм

Fig. 1. Nonmetallic inclusions with a diameter of 33 μm in the sample

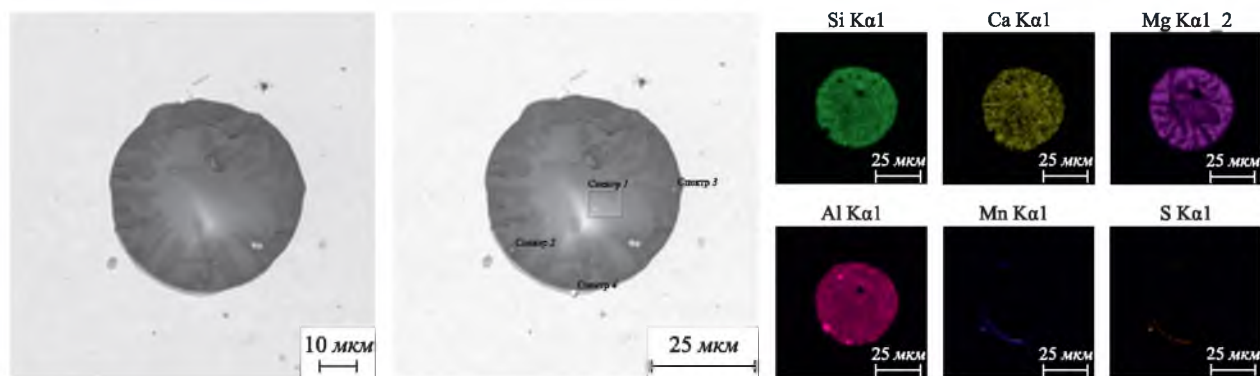


Рис. 2. Неметаллические включения диаметром 47 мкм

Fig. 2. Nonmetallic inclusions with a diameter of 47 μm in the sample

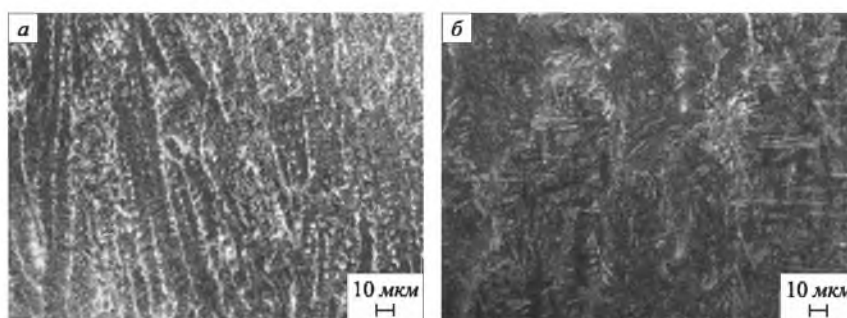


Рис. 3. Микроструктура образца

Fig. 3. Sample microstructure

Распределение элементов на выбранной площади всех включений представлено на рис. 1, 2.

Анализ химического состава включения диаметром 33 мкм в образце показал, что его фазовый состав однородный и основными составляющими являются оксиды кремния, марганца и магния, с малым содержанием алюминия и натрия (рис. 1, табл. 1).

Основа включения диаметром 47 мкм состоит из оксидов кремния, фтора, кальция, алюминия и магния. Более темная составляющая во включении в виде прямолинейных кристаллов направлена от поверхности в глубь включения. По фазовому составу включения и более темные составляющие близки, но несколько отличаются по содержанию химических элементов. Также во включении наблюдаются небольшие темные составляющие округлой формы, состоящие из оксидов алюминия и магния (рис. 2, табл. 2). Следы серы выделяются по контуру глобулей (рис. 2, табл. 2).

Металлографический анализ поверхности показал, что микроструктура наплавленного слоя представляет собой грубоиглольчатый мартенсит. Структура равно-

мерная, имеет дендритное (столбчатое) строение, характерное для литого металла (рис. 3).

Выводы

Проведенный анализ химического состава неметаллических включений указывает, что в составе покрытия, полученного электродуговым способом, присутствуют неметаллические включения, состоящие в основном из оксидов кремния, фтора, кальция, алюминия и магния. Выявленные неметаллические включения могут неблагоприятно влиять на физико-механические свойства наплавленного слоя (снижение износостойкости, хрупкость наплавленного слоя), поэтому рационально использовать рафинирующие добавки для снижения загрязненности наплавленного слоя неметаллическими включениями.

Анализ микроструктуры покрытия, полученного электродуговым способом, показывает, что структура металла представляет собой грубоиглольчатый мартенсит и имеет дендритное (столбчатое) строение, характерное для литого металла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. 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>

1. 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>

2. 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>
3. 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>
4. 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*. 2016. Vol. 46. No. 1. P. 1–7. <https://doi.org/10.1080/02670844.2016.1176718>
5. Natalenko V.S., Pavlov A.P. Indicators of hardness of the coating obtained by electrocontact welding composite filler materials // *Journal of Advanced Research in Technical Science*. 2019. Vol. 2. No. 14. P. 153–156. <https://doi.org/10.26160/2474-5901-2019-14-153-156>
6. 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.
7. 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. P. 784–790. <https://doi.org/10.1179/1743294414Y.0000000331>
8. Сказочкин А.В., Бондаренко Г.Г., Жуковский П. Особенности измерения твердости металлической поверхности, модифицированной ультрадисперсными частицами минералов // *Приборы и методы измерений*. 2020. Т. 11. № 3. С. 212–221. <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2020-11-3-212-221>
9. 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>
10. 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>
11. Kirchgaßner M., Badisch E., Franek F. Behaviour of iron-based hardfacing alloys under abrasion and impact // *Wear Journal*. 2008. Vol. 265. No. 5–6. P. 772–779. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.01.004>
12. Луговая В.А., Ярошик В.В. Особенности наплавки композиционных сплавов при упрочнении рабочих поверхностей тел вращения // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета*. 2015. Вып. 40 (59). С. 166–173.
13. Еремин А.Е., Еремин Е.Н., Филиппов Ю.О., Маталасова А.Е., Кац В.С. Структура и свойства высокохромистого металла запорной арматуры наплавленного серийно выпускаемыми сварочными проволоками // *Омский научный вестник*. 2014. Вып. 1 (127). С. 55–58.
14. Тепляшин М.В., Комков В.Г., Стариенко В.А. Разработка экономолегированного сплава для восстановления бил молотковых мельниц // *Ученые заметки ТОГУ*. 2013. Т. 4. № 4. С. 1543–1549.
15. Емелюшин А.Н., Петроченко Е.В., Нефедьев С.П. Исследование структуры и ударно-абразивной износостойкости покрытий системы Fe – C – Cr – Mn – Si, дополнительно легированных азотом // *Сварочное производство*. 2011. № 10. С. 18–22.
16. Гусев А.И., Романов Д.А., Козырев Н.А., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф. Структура сварного шва износостойкой наплавки порошковой проволокой системы Fe–C–Si–Mn–Cr–Ni–Mo // *Вестник Сибирского государственного промышленного университета*. 2021. № 2 (36). С. 3–11.
17. Козырев Н.А., Крюков Р.Е., Гусев А.И., Осетковский И.В. Эксплуатационные показатели новых порошковых проволок Fe–C–Si–Mn–Cr–Ni–Mo для наплавки защитных пластин шнеков очистных комбайнов // *Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов*. 2019. № 5. С. 195–202.
18. Осетковский И.В., Козырев Н.А., Гусев А.И., Крюков Р.Е., Попова М.В. Износостойкость металла, наплавленного порошковыми проволоками систем Fe – C – Si – Mn – Ni – Mo – W – V
2. 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>
3. 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>
4. 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*. 2016, vol. 46, no. 1, pp. 1–7. <https://doi.org/10.1080/02670844.2016.1176718>
5. Natalenko V.S., Pavlov A.P. Indicators of hardness of the coating obtained by electrocontact welding composite filler materials. *Journal of Advanced Research in Technical Science*. 2019, vol. 2, no. 14, pp. 153–156. <https://doi.org/10.26160/2474-5901-2019-14-153-156>
6. 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.
7. 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>
8. Skazochkin A.B., Bondarenko G.G., Zhukovskii P. Features of measuring the hardness of a metal surface modified with ultrafine particles of minerals. *Devices and Methods of Measurements*. 2020, vol. 11, no. 3, pp. 212–221. (In Russ.). <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2020-11-3-212-221>
9. 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>
10. 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>
11. Kirchgaßner M., Badisch E., Franek F. Behaviour of iron-based hardfacing alloys under abrasion and impact. *Wear Journal*. 2008, vol. 265, no. 5–6, pp. 772–779. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.01.004>
12. Lugovaya V.A., Yaroshik V.V. Features of surfacing of composite alloys during hardening of working surfaces of rotation bodies. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*. 2015, no. 40 (59), pp. 166–173. (In Russ.).
13. Eremin A.E., Eremin E.N., Filippov Yu.O., Matalasova A.E., Kats V.S. Structure and properties of high-chromium metal of shut-off valves deposited with mass-produced welding wires. *Omskii nauchnyi vestnik*. 2014, no. 1 (127), pp. 55–58. (In Russ.).
14. Teplyashin M.V., Komkov V.G., Starienko V.A. Development of an economically doped alloy for restoration of hammer mill bits. *Uchenye zametki TOGU*. 2013, vol. 4, no. 4, pp. 1543–1549. (In Russ.).
15. Emelyushin A.N., Petrochenko E.V., Nefed'ev S.P. Investigation of structure and impact-abrasive wear resistance of coatings of Fe–C–Cr–Mn–Si systems additionally alloyed with nitrogen. *Svarochnoe proizvodstvo*. 2011, no. 10, pp. 18–22. (In Russ.).
16. Gusev A.I., Romanov D.A., Kozyrev N.A., Gromov V.E., Ivanov Yu.F. Structure of the weld of wear-resistant surfacing with a flux-cored wire of Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo system. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta*. 2021, no. 2 (36), pp. 3–11. (In Russ.).
17. Kozyrev N.A., Kryukov R.E., Gusev A.I., Osetkovskii I.V. Performance indicators of new Fe – C – Si – Mn – Sg – Ni – Mo flux-cored wire for surfacing protective plates of augers of cleaning combines. *Naukiemkie tekhnologii razrabotki i ispol'zovaniya mineral'nykh resursov*. 2019, no. 5, pp. 195–202. (In Russ.).
18. Osetkovskii I.V., Kozyrev N.A., Gusev A.I., Kryukov R.E., Popova M.V. Wear resistance of metal deposited with powder wires of Fe–C–Si–Mn–Ni–Mo–W–V and Fe–C–Si–Mn–Cr–Ni–Mo–V

- и Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo – V // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2017. № 4 (22). С. 21–24.
19. Пат. 2641590 РФ. МПК8 B23 K35/36 В 23 K35/36 Порошковая проволока / Козырев Н.А., Гусев А.И., Галевский Г.В., Крюков Р.Е., Осетковский И.В., Усольцев А.А., Козырева О.А.; заявл. 22.06.2016; опубл. 18.01.2018. Бюл. № 2.
 20. Гусев А.И., Козырев Н.А., Кибко Н.В., Попова М.В., Осетковский И.В. Исследование свойств порошковой проволоки системы Fe – C – Si – Mn – Cr – Mo – Ni – V – Co для упрочнения узлов и деталей оборудования горнорудной и угледобывающей отраслей // Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов. 2017. № 3. С. 135–140.
 21. Мамонтов М.М., Коновалов А.Н., Полевой Е.В., Шелухин А.А. Выявление внутренних дефектов в готовых рельсах // Путь и путевое хозяйство. 2018. № 7. С. 2–6.
 19. Kozyrev N.A., Gusev A.I., Galevskii G.V., Kryukov R.E., Osetkovskii I.V., Usol'tsev A.A., Kozyreva O.A. *Flux-cored wire*. Patent RF no. 2641590 MPK8 B23 K35/36 B 23 K35/36. *Byulleten' izobretenii*. 2018, no. 2. (In Russ.).
 20. Gusev A.I., Kozyrev N.A., Kibko N.V., Popova M.V., Osetkovskii I.V. Investigation of properties of the flux-cored wire of Fe – C – Si – Mn – Cr – Mo – Ni – V – Co system for hardening of nodes and parts of equipment of mining and coal mining industries. *Naukoemkie tekhnologii razrabotki i ispol'zovaniya mineral'nykh resursov*. 2017, no. 3, pp. 135–140. (In Russ.).
 21. Mamontov M.M., Konovalov A.N., Polevoi E.V., Shelukhin A.A. Identification of internal defects in finished rails. *Put' i putevye khozyaistvo*. 2018, no. 7, pp. 2–6. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Николай Анатольевич Козырев, д.т.н., профессор, проректор по научной и инновационной деятельности, Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0002-7391-6816
E-mail: kozyrev_na@mtsp.sibsiu.ru

Иван Васильевич Осетковский, аспирант кафедры материаловедения, литейного и сварочного производства, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: dadlic@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

Егор Владимирович Полевой, к.т.н., начальник бюро металловедения и термической обработки технического отдела рельсовой площадки, АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат»
E-mail: egor.polevoj@evraz.com

Алексей Романович Михно, аспирант кафедры материаловедения, литейного и сварочного производства, Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0002-7305-6692
E-mail: mikno-mm131@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nikolai A. Kozyrev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Vice-Rector for Research and Innovation, Siberian State Industrial University
ORCID: 0000-0002-7391-6816
E-mail: kozyrev_na@mtsp.sibsiu.ru

Ivan V. Osetkovskii, Postgraduate of the Chair "Materials, Foundry and Welding Production", Siberian State Industrial University
E-mail: dadlic@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

Egor V. Polevoi, Cand. Sci. (Eng.), Head of Bureau of Metal Science and Heat Treatment of Technical Department of the Rail Site, JSC "EVRAZ – Joint West Siberian Metallurgical Plant"
E-mail: egor.polevoj@evraz.com

Aleksei R. Mikhno, Postgraduate of the Chair "Materials, Foundry and Welding Production", Siberian State Industrial University
ORCID: 0000-0002-7305-6692
E-mail: mikno-mm131@mail.ru

ВКЛАД АВТОРОВ

Н. А. Козырев – формирование основной идеи исследований, разработка методологии работы, анализ результатов исследований.
И. В. Осетковский – выполнение металлографических исследований, анализ результатов исследований.
А. А. Усольцев – разработка плана исследований, организация испытаний образцов, сбор данных исследований, анализ результатов исследований.
Е. В. Полевой – формирование основной идеи исследований, разработка плана исследований, постановка задач, анализ результатов исследований.
А. Р. Михно – исследование образцов на электронном микроскопе, анализ результатов исследований, подготовка материалов для статьи.

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

N. A. Kozyrev – formation of the main idea and methodology of the research, analysis of the research results.
I. V. Osetkovskii – performance of metallographic studies, analysis of the research results.
A. A. Usol'tsev – development of the research plan, organization of the sample testing, collection of the research data, analysis of the research results.
E. V. Polevoi – formation of the main idea and plan of the research, formulation of the tasks, analysis of the research results.
A. R. Mikhno – examination of the samples on an electron microscope, analysis of the research results, preparation of materials for the article.

Поступила в редакцию 23.02.2022
 После доработки 09.03.2022
 Принята к публикации 11.03.2022

Received 23.02.2022
 Revised 09.03.2022
 Accepted 11.03.2022

Над номером работали:

Леонтьев Л.И., *главный редактор*

Протопопов Е.В., *заместитель главного редактора*

Ивани Е.А., *заместитель главного редактора*

Бащенко Л.П., *заместитель ответственного секретаря*

Потапова Е.Ю., *заместитель главного редактора по развитию*

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 27.06.2022. Формат 60×90 ¹/₈. Бум. офсетная № 1.
Печать цифровая. Усл. печ. л. 9,25. Заказ 15198. Цена свободная.

Отпечатано в типографии Издательского Дома МИСиС.
119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4.
Тел./факс: (499) 236-76-17

IZVESTIYA

FERROUS METALLURGY

ROLLING OF LONG-LENGTH RAILS WITH ACCELERATION

RESOURCE EFFICIENCY OF METALLURGICAL PRODUCTION

VISCOSITY OF NIOBIUM OXIDE SYSTEMS FOR PRODUCTION OF COMPLEX FERROALLOYS

FUNDAMENTAL STUDIES OF PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES OF ENVIRONMENTALLY FRIENDLY FLUORINE-FREE SLAGS AND THEIR USE IN LADLE STEEL INDUSTRY

ANALYSIS OF SLAG MODE OF BLAST FURNACE MELTING USING MODEL DECISION SUPPORT SYSTEMS

COMPOSITION OF NON-METALLIC INCLUSIONS AND MICROSTRUCTURE OF ELECTRIC ARC COATING FORMED USING THE FLUX-CORED WIRE OF Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo SYSTEM

FRACTOGRAPHY OF FRACTURE SURFACE OF CrMnFeCoNi HIGH-ENTROPY ALLOY AFTER ELECTRON-BEAM PROCESSING

ANALYSIS OF THE DRAWING MILL DRIVE OPERATION

AUTOMATED CONTROL OF COMPLEX METALLURGICAL UNITS BASED ON THE CBR METHOD

IN MEMORY OF MIKHAIL VASIL'EVICH ASTAKHOV

PODGORODETSKII GENNADII STANISLAVOVICH (23.01.1958 – 21.06.2022)