

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY

fermet.misis.ru

2023 Том 66 № 2
Vol. 66 No. 2

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Многослойные аморфно-кристаллические высокоэнтропийные
металлические пленки

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Раскислительная способность алюминия в железо-марганцевых
углеродсодержащих расплавах

ИННОВАЦИИ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ ПРОМЫШЛЕННОМ И ЛАБОРАТОРНОМ ОБОРУДОВАНИИ, ТЕХНОЛОГИЯХ И МАТЕРИАЛАХ

Анализ природы происхождения характерных дефектов мелющих шаров
из отбраковки непрерывнолитых заготовок рельсовой стали



ISSN 0368-0797
eISSN 2410-2091

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

Научно-технический журнал
Издается с января 1958 г. ежемесячно

2023 Том 66 № 2
Vol. No.

IZVESTIYA FERROUS METALLURGY

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:



Редакционная коллегия:

Г. В. Ашихмин, д.т.н., профессор, ОАО «Ин-т Цветметобработка», г. Москва
С. О. Байсанов, д.т.н., профессор, ХМИ им. Ж.Абишева, г. Караганда, Республика Казахстан
В. Д. Белов, д.т.н., профессор, НИТУ МИСИС, г. Москва
Бродов А.А., к.экон.н., ФГУП «ЦНИИЧермет им. И.П. Бардина», г. Москва
Е. П. Вольнкина, д.т.н., советник, ОЮЛ «Кузбасская Ассоциация переработчиков отходов», г. Новокузнецк
С. М. Горбатюк, д.т.н., профессор, НИТУ МИСИС, г. Москва
К. В. Григорович, академик РАН, д.т.н., ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН, г. Москва
В. Е. Гролов, д.ф.-м.н., профессор, СибГИУ, г. Новокузнецк
А. Н. Дмитриев, д.т.н., профессор, академик РАЕН, академик АИН РФ, г. Екатеринбург
А. В. Дуб, д.т.н., профессор, ЗАО «Наука и инновации», г. Москва
В. И. Жучков, д.т.н., профессор, ИМЕТ УрО РАН, г. Екатеринбург
Р. Ф. Зингер, д.т.н., профессор, Институт Фридриха-Александра, Германия
М. Зиниград, д.т.н., профессор, Институт Ариэля, Израиль
В. И. Золотухин, д.т.н., профессор, ТулГУ, г. Тула
А. Г. Колмаков, д.т.н., чл.-корр. РАН, ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН, г. Москва
В. М. Колокольцев, д.т.н., профессор, МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск
М. В. Костина, д.т.н., ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН, г. Москва
К. Л. Косырев, д.т.н., профессор, АО «НПО «ЦНИИТМаш», г. Москва
Ю. А. Курганова, д.т.н., профессор, МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва
Х. Линн, ООО «Линн Хай Терм», Германия
В. И. Лысак, академик РАН, д.т.н., профессор, ВолгГТУ, г. Волгоград

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».

Главный редактор:

Леопольд Игоревич Леонтьев, академик РАН, советник, Президиум РАН; д.т.н., профессор, Национальный исследовательский 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:

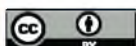
Россия, 119049, Москва, Ленинский просп., д. 4, стр. 1
Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»,
Тел.: +7 (495) 638-44-11
E-mail: fermet.misis@mail.ru, ferrous@misiss.ru

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

В. П. Мешалкин, академик РАН, д.т.н., профессор, РХТУ им. Д.И. Менделеева, г. Москва
Р. Р. Мулюков, д.ф.-м.-н., профессор, чл.-корр. ФГБУН ИПСМ РАН, г. Уфа
С. А. Никулин, д.т.н., профессор, чл.-корр. РАЕН, НИТУ МИСИС, г. Москва
А. Х. Нурумгалиев, д.т.н., профессор, КГИУ, г. Караганда, Республика Казахстан
О. И. Островский, д.т.н., профессор, Университет Нового Южного Уэльса, Сидней, Австралия
Л. Пиетрелли, д.т.н., Итальянское национальное агентство по новым технологиям, энергетике и устойчивому экономическому развитию, Рим, Италия
И. Ю. Пышминцев, д.т.н., РосНИТИ, г. Челябинск
А. И. Рудской, академик РАН, д.т.н., профессор, СПбПУ Петра Великого, г. Санкт-Петербург
Б. А. Сивак, к.т.н., профессор, АО АХК «ВНИИМЕТМАШ», г. Москва
Л. М. Симонян, д.т.н., профессор, НИТУ МИСИС, г. Москва
Л. А. Смирнов, академик РАН, д.т.н., профессор, ОАО «Уральский институт металлов», г. Екатеринбург
С. В. Солодов, к.т.н., НИТУ МИСИС, г. Москва
Н. А. Спирин, д.т.н., профессор, УрФУ, г. Екатеринбург
Г. Танг, Институт перспективных материалов университета Циньхуа, г. Шеньжень, Китай
М. В. Темлянец, д.т.н., профессор, СибГИУ, г. Новокузнецк
М. Р. Филонов, д.т.н., профессор, НИТУ МИСИС, г. Москва
И. В. Чуманов, д.т.н., профессор, ЮУрГУ, г. Челябинск
О. Ю. Шешуков, д.т.н., профессор, УрФУ, г. Екатеринбург
М. О. Шпайдель, д.ест.н., профессор, Швейцарская академия материаловедения, Швейцария
А. Б. Юрьев, д.т.н., ректор, СибГИУ, г. Новокузнецк
В. С. Юсупов, д.т.н., профессор, ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН, г. Москва

Индексирование: Scopus, Russian Science Citation Index (RSCI), Research Bible, Chemical Abstracts, 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:



Editorial Board:

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

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

Andrei N. Dmitriev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Academician, RANS, A.M. Prokhorov Academy of Engineering Sciences, Institute of Metallurgy, Ural Branch of RAS, Ural Federal University, Yekaterinburg

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

Mikhail I. Filonov, Dr. Sci. (Eng.), 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

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. Mendeleev 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

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

Editor-in-Chief:

Leopol'd 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 119049, Russian Federation
National University of Science and Technology "MISIS"
Tel.: +7 (495) 638-44-11

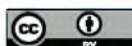
E-mail: fermet.misis@mail.ru, ferrous@sisis.ru

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

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 (RSCI), Research Bible, Chemical Abstracts, 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.**

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

- Князев С.В., Куценко А.И., Усольцев А.А., Козырев Н.А., Куценко А.А.** Перспективы и направления цифровой трансформации в литейном производстве 140
- Мусурзаева Б.Б.** Микроструктура и элементный анализ порошковых композиционных материалов на основе железа 148

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Теплякова Л.А., Кашин А.Д., Кунитсына Т.С.** Развитие сдвиговой деформации в пакетном мартенсите среднелегированных сталей при растяжении 154
- Баранникова С.А., Надежкин М.В., Исхакова П.В.** Исследование механических и акустических свойств деформируемых сплавов 162
- Беломытцев М.Ю.** Закономерности формирования аустенитного зерна в 12 %-ных хромистых жаропрочных ферритно-мартенситных сталях 168
- Бровер Г.И., Щербаклова Е.Е.** Структурная организация и свойства поверхностных слоев твердых сплавов системы WC-Co после импульсной лазерной обработки 177
- Капланский Ю.Ю., Агеев М.И., Бычкова М.Я., Фадеев А.А., Левашов Е.А.** Влияние размера пятна лазера на структуру и свойства жаропрочного сплава CompoNiAl-M5-3, полученного селективным лазерным сплавлением 184
- Иванов Ю.Ф., Прокопенко Н.А., Петрикова Е.А., Шугуров В.В., Тересов А.Д.** Многослойные аморфно-кристаллические высокоэнтропийные металлические пленки 191
- Зыкова А.П., Панфилов А.О., Чумаевский А.В., Воронцов А.В., Тарасов С.Ю.** Электронно-лучевое аддитивное производство композиционного сплава из нержавеющей стали и алюминиевой бронзы: микроструктура и механические характеристики 197

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

- Макровец Л.А., Самойлова О.В., Михайлов Г.Г.** Раскислительная способность алюминия в железо-марганцевых углеродсодержащих расплавах 206
- Немчинова Н.В., Тютрин А.А., Зайцева А.А.** Гидрометаллургическое рафинирование металлургического кремния 215

METALLURGICAL TECHNOLOGIES

- Knyazev S.V., Kutsenko A.I., Usol'tsev A.A., Kozyrev N.A., Kutsenko A.A.** Prospects and directions of digital transformation in foundry 140
- Musurzaeva B.B.** Microstructure and elemental analysis of iron-based powder composite materials 148

MATERIAL SCIENCE

- Tepliyakova L.A., Kashin A.D., Kunitsyna T.S.** Development of shear deformation in lath martensite of medium alloy steels under tension 154
- Barannikova S.A., Nadezhkin M.V., Iskhakova P.V.** Mechanical and acoustic properties of deformable alloys ... 162
- Belomytsev M.Yu.** Features of formation of austenite grains in 12 % Cr heat-resistant ferritic-martensitic steels 168
- Brover G.I., Shcherbakova E.E.** Structural organization and properties of surface layers of WC-Co hard alloys after pulsed laser processing 177
- Kaplanskii Yu.Yu., Ageev M.I., Bychkova M.Ya., Fadeev A.A., Levashov E.A.** Influence of laser spot size on structure and properties of high-temperature CompoNiAl-M5-3 alloy produced by selective laser melting 184
- Ivanov Yu.F., Prokopenko N.A., Petrikova E.A., Shugurov V.V., Teresov A.D.** Multilayer amorphous-crystalline high-entropy metal films 191
- Zykova A.P., Panfilov A.O., Chumaevskii A.V., Vorontsov A.V., Tarasov S.Yu.** Electron beam additive manufacturing of composite alloy from stainless steel and aluminum bronze: Microstructure and mechanical properties 197

**PHYSICO-CHEMICAL BASICS
OF METALLURGICAL PROCESSES**

- Makrovets L.A., Samoilova O.V., Mikhailov G.G.** Deoxidation capacity of aluminum in ferromanganese carbon-containing melts 206
- Nemchinova N.V., Tyutrin A.A., Zaitseva A.A.** Hydro-metallurgical refining of metallurgical silicon 215

**ИННОВАЦИИ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ
ПРОМЫШЛЕННОМ И ЛАБОРАТОРНОМ
ОБОРУДОВАНИИ, ТЕХНОЛОГИЯХ
И МАТЕРИАЛАХ**

**INNOVATIONS IN METALLURGICAL
INDUSTRIAL AND LABORATORY
EQUIPMENT, TECHNOLOGIES
AND MATERIALS**

- Уманский А.А., Морозов И.С., Протопопов Е.В., Симачев А.С., Думова Л.В.** Анализ природы происхождения характерных дефектов мелющих шаров из отбраковки непрерывнолитых заготовок рельсовой стали 222
- Ким А.А., Подглазова М.И., Шатохин К.С.** Погрешности бесконтактного измерения температуры 229

- Umanskii A.A., Morozov I.S., Protopopov E.V., Simachev A.S., Dumova L.V.** Occurrence of characteristic defects of grinding balls from rejects of continuously cast billets of rail steel 222
- Kim A.A., Podglazova M.I., Shatokhin K.S.** Errors of non-contact temperature measurement 229

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
И АВТОМАТИЗАЦИЯ
В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ**

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

- Ляховец М.В., Макаров Г.В., Саламатин А.С.** Формирование данных для цифровых тренажеров операторов металлургических процессов 236
- Павлов А.В., Спириин Н.А., Гуриин И.А., Лавров В.В., Бегинюк В.А., Истомин А.С.** Информационно-моделирующая система прогнозирования состава и свойств конечного шлака в доменной печи в режиме реального времени 244

- Lyakhovets M.V., Makarov G.V., Salamatin A.S.** Data generation for digital simulators of metallurgical process operators 236
- Pavlov A.V., Spirin N.A., Gurin I.A., Lavrov V.V., Beginyuk V.A., Istomin A.S.** Information-modeling system for prediction of the composition and properties of final slag in a blast furnace in real time 244

**ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА**

**ECONOMIC EFFICIENCY
OF METALLURGICAL PRODUCTION**

- Глушакова О.В., Черникова О.П.** Институционализация ESG-принципов на международном уровне и в Российской Федерации, их влияние на деятельность предприятий черной металлургии. Часть 1 253

- Glushakova O.V., Chernikova O.P.** Institutionalization of ESG-principles at the international level and in the Russian Federation, their impact on ferrous metallurgy enterprises. Part 1 253

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

УДК 621.771.65

DOI 10.17073/0368-0797-2023-2-222-228

Оригинальная статья
Original article

АНАЛИЗ ПРИРОДЫ ПРОИСХОЖДЕНИЯ ХАРАКТЕРНЫХ ДЕФЕКТОВ МЕЛЮЩИХ ШАРОВ ИЗ ОТБРАКОВКИ НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ ЗАГОТОВОК РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ

А. А. Уманский [✉], И. С. Морозов, Е. В. Протопопов,
А. С. Симачев, Л. В. Думова

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

[✉ umanskii@bk.ru](mailto:umanskii@bk.ru)

Аннотация. На основании металлографических исследований определены характерные дефекты мелющих шаров, прокатанных из отбраковки непрерывнолитых заготовок рельсовой стали марки К76Ф. Установлена взаимосвязь наличия внутренних дефектов шаров с их ударной стойкостью. Наибольшее влияние на снижение ударной стойкости шаров оказывают дефекты в виде внутренних трещин со скоплениями неметаллических включений в области их локализации и флокены. Такие дефекты являются причиной разрушения шаров при испытаниях на ударную стойкость в 62 и 17 % случаев соответственно. Влияние внутренних трещин без значительных скоплений неметаллических включений и закалочных микротрещин, расположенных по границам раздела фаз, оценивается на уровне 12 и 9 %. Установлены закономерности и механизм влияния химического состава отбраковки заготовок рельсовой стали К76Ф на вероятность разрушения производимых из них шаров при испытаниях на ударную стойкость. Увеличение содержания серы в заготовках рассматриваемой рельсовой стали снижает ударную стойкость производимых из них шаров, так как способствует образованию хрупких сульфидов, которые концентрируются в области расположения внутренних трещин. Повышение содержания водорода в рельсовой стали закономерно способствует увеличению вероятности образованию флокенов, которые значительно уменьшают устойчивость шаров к ударным нагрузкам. Увеличение концентрации углерода в исходных заготовках влияет на повышение вероятности разрушения шаров из стали К76Ф при копровых испытаниях, что объясняется образованием карбидов цементитного типа при достижении содержания углерода, соответствующего заэвтектоидной стали. В целом относительная степень влияния химического состава рельсовой стали марки К76Ф на ударную стойкость мелющих шаров составляет 48 %.

Ключевые слова: внутренние дефекты, макроструктура, мелющие шары, ударная стойкость, рельсовая сталь, непрерывнолитые заготовки, металлографические исследования

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда, проект № 22-29-20170 и гранта Кемеровской области – Кузбасса.

Для цитирования: Уманский А.А., Морозов И.С., Протопопов Е.В., Симачев А.С., Думова Л.В. Анализ природы происхождения характерных дефектов мелющих шаров из отбраковки непрерывнолитых заготовок рельсовой стали. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2023;66(2):222–228. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-2-222-228>

OCCURRENCE OF CHARACTERISTIC DEFECTS OF GRINDING BALLS FROM REJECTS OF CONTINUOUSLY CAST BILLETS OF RAIL STEEL

A. A. Umanskii [✉], I. S. Morozov, E. V. Protopopov,
A. S. Simachev, L. V. Dumova

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

[✉ umanskii@bk.ru](mailto:umanskii@bk.ru)

Abstract. On the basis of metallographic studies, the authors determined the characteristic defects of grinding balls rolled from the rejects of continuously cast billets of K76F rail steel. Relationship of the presence of internal defects of the balls with their impact resistance was established. Defects

in the form of internal cracks with accumulations of non-metallic inclusions in the area of their localization and flocks have the greatest impact on the reduction of balls impact resistance. Such defects are the cause of balls destruction during impact resistance tests in 62 and 17 % of cases, respectively. The effect of internal cracks without significant accumulations of non-metallic inclusions and quenching microcracks located along the boundaries of the phase interface was estimated at 12 and 9 %. The regularities and mechanism of influence of the rejects chemical composition of K76F rail steel billets on the probability of destruction of the balls produced from them during impact resistance tests were established. An increase in sulfur content in the billets of the studied rail steel reduces impact resistance of the balls produced from them, as it contributes to formation of non-plastic sulfides that concentrate in the area of internal cracks. An increase in hydrogen content in rail steel naturally contributes to an increase in probability of formation of the flocks, which significantly reduce the balls stability to shock loads. An increase in carbon content in the initial billets affects the increase in probability of destruction of K76F steel balls during copra tests. It is explained by formation of cementite-type carbides when carbon content corresponding to the eutectoid steel is reached. In general, the relative degree of influence of the K76F rail steel chemical composition on impact resistance of grinding balls is 48 %.

Keywords: internal defects, macrostructure, grinding balls, impact resistance, rail steel, continuously cast billets, metallographic studies

Acknowledgements: The research was supported the Russian Science Foundation (grant No. 22-29-20170) and the Kemerovo Region – Kuzbass.

For citation: Umanskii A.A., Morozov I.S., Protopopov E.V., Simachev A.S., Dumova L.V. Occurrence of characteristic defects of grinding balls from rejects of continuously cast billets of rail steel. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2023;66(2):222–228. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-2-222-228>

ВВЕДЕНИЕ

Мелющие (помольные) шары используются для подготовки (размола) исходных материалов в различных отраслях промышленности: металлургической, горнорудной, цементной [1 – 3]. Ключевыми характеристиками, определяющими эффективность работы и срок службы мелющих шаров, являются их твердость (поверхностная и объемная) и ударная стойкость [4 – 6]. Высокие значения указанных показателей достигаются, в основном, за счет дополнительного легирования исходных сталей хромом [7; 8] и применения термообработки шаров после их прокатки [9 – 11].

Рядом исследователей [12; 13] ранее установлено определяющее влияние внутренних дефектов шаров на их ударную стойкость. Однако контроль качества макроструктуры шаров не регламентирован в нормативно-технической документации на производство данного вида продукции и, соответственно, не производится. Отсутствие такого контроля шаров и заготовок для их производства в потоке производства, в свою очередь, обуславливает отсутствие обоснованной информации о характерных дефектах, являющихся причинами снижения эксплуатационного ресурса шаров в результате их раскола при ударных нагрузках.

Таким образом, исследования характерных дефектов мелющих шаров во взаимосвязи с их ударной стойкостью являются актуальными.

В настоящей работе в качестве объекта исследований использованы мелющие шары, произведенные ОАО «Гурьевский металлургический завод» («ОАО «ГМЗ») из отбраковки непрерывнолитых заготовок рельсовой стали, поставляемых компанией «Мечел». Следует отметить, что в последние годы переработка указанных заготовок в мелющие шары получила развитие в связи с увеличением количества отбраковки [14 – 17], в свою очередь обусловленным повышением требований к качеству рельсов [18; 19]. В настоящее время ОАО «ГМЗ» является одним из ведущих производителей мелющих шаров в России

и ежегодно прокатывает 25 – 40 тыс. т шаров из отбраковки заготовок рельсовой стали К76Ф, что составляет 30 – 50 % от общего объема выпуска данного вида продукции на предприятии. Результаты исследований природы происхождения дефектов мелющих шаров, произведенных из отбраковки заготовок рельсовых сталей, являются научной базой для повышения их ударной стойкости при массовом производстве, а их использование на практике потенциально обладает значительной экономической эффективностью.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования происхождения дефектов мелющих шаров, произведенных из отбраковки рельсовой стали, проводили методом металлографического анализа с использованием оптического микроскопа OLYMPUS GX-51 и рентгеноструктурного анализа с использованием дифрактометра Shimadzu XRD-6000.

В качестве объектов исследования использовали мелющие шары диаметром 60 мм из рельсовой стали марки К76Ф производства ОАО «Гурьевский металлургический завод», отбракованные по результатам копровых испытаний. Анализировали 20 партий шаров.

Исследовали параметры микроструктуры, ликвацию основных химических элементов и распределение твердости по сечению отбракованных мелющих шаров. Исследования ликвации химических элементов по сечению проводили с использованием спектрального анализа: методом рентгенофлуоресцентного анализа по ГОСТ 28033 – 89 (спектрометр Shimadzu XRF-1800) и фотоэлектрического спектрального анализа по ГОСТ 18895 – 97 (спектрометр ДФС-71).

Влияние параметров сталеплавильного передела на вероятность неудовлетворительных результатов копровых испытаний изучали с использованием множественного регрессионного анализа. В качестве объекта исследований использовали случайную выборку из 50 партий шаров диаметром 60 мм.

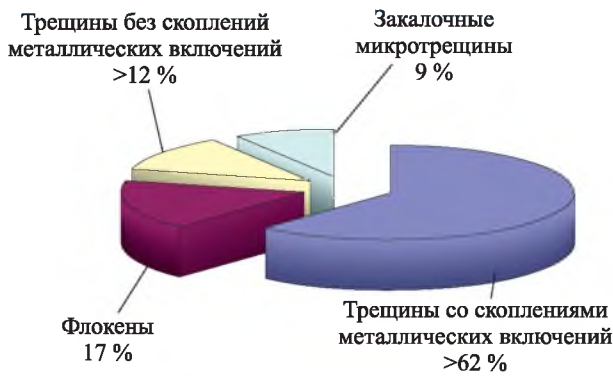


Рис. 1. Распределение дефектов мелющих шаров, произведенных из отбраковки рельсовой стали, по видам

Fig. 1. Distribution of defects of grinding balls produced from rail steel rejects, by type

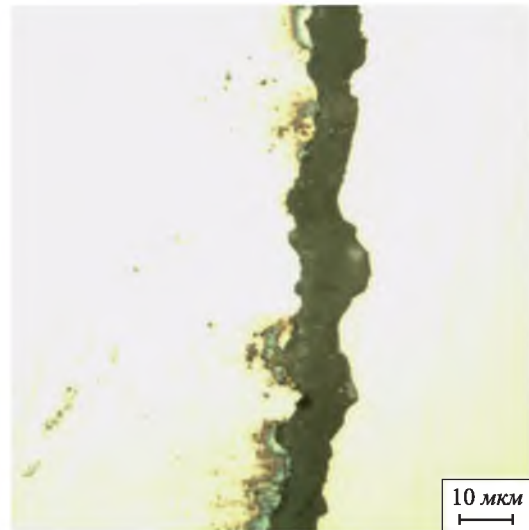


Рис. 2. Внутренняя трещина в мелющем шаре со скоплениями неметаллических включений

Fig. 2. Internal crack in grinding ball with clusters of non-metallic inclusions

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полученное распределение дефектов, явившихся причинами разрушения мелющих шаров из рельсовой стали К76Ф при испытаниях на ударную стойкость, по видам представлено на рис. 1. Наибольшую долю составляют трещины со скоплениями неметаллических включений (рис. 2). Неметаллические включения, скопления которых наблюдаются в области локализации дефектов, преимущественно представляют собой сложные оксиды ($Al_2O_3-CaO-MgO$, Al_2O_3-CaO , Al_2O_3-MgO), классифицируемые как непластичные или хрупкоразрушенные (способные вытягиваться в строчки при пластической деформации, но разрушающиеся при достижении определенной степени деформации), а также сульфиды марганца и железа. Основная масса неметаллических оксидных включений образуется в процессе раскисления стали. При этом следует отметить, что согласно существующей технологии производства рельсовых сталей раскисление алюминием не проводят и основным источником его поступления в сталь являются ферросплавы, где алюминий содержится в виде остаточной примеси. Концентрация сульфидных включений, образование

которых преимущественно происходит в процессе кристаллизации стали, напрямую определяется содержанием серы. При этом выраженное негативное влияние на качество проката оказывают сульфиды железа, уменьшения концентрации которых можно достичь повышением содержания марганца в стали. Вторым по распространенности видом дефекта являются флокены, идентифицированные в соответствии с общепринятой классификацией изломов [20]: на поверхности разрушения имеются участки в виде светлых пятен, имеющие более крупнокристаллическое строение по отношению к основному металлу (рис. 3).

Трещины без скоплений неметаллических включений (рис. 4) в области их локализации явились причиной неудовлетворительных испытаний мелющих шаров на ударную стойкость в 12 % случаев.

На основе вышесказанного можно констатировать, что дефекты, определяющие ударную стойкость мелю-



Рис. 3. Флокены в изломе шаров после испытаний на ударную стойкость

Fig. 3. Flocks in the balls fracture after impact resistance tests

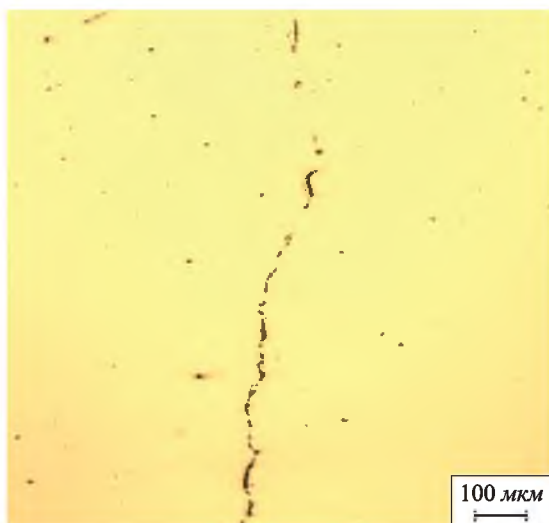


Рис. 4. Внутренняя трещина в шаре, расколшемся после 24 ударов

Fig. 4. Internal crack in the ball splitted up after 24 impacts

щих шаров из рельсовой стали К76Ф, имеют преимущественно сталеплавильное происхождение.

Для подтверждения полученных результатов дополнительно проведены статистические исследования влияния химического состава заготовок на отбраковку шаров по результатам копровых испытаний. Установлено, что повышения содержаний серы, водорода и углерода в стали в существующем диапазоне их концентрации (табл. 1) оказывают значимое влияние на увеличение отбраковки шаров при испытаниях на ударную стойкость:

$$B_{\text{копр}} = -12,9 + 3,7[H] + 102,3[S] + 11,8[C],$$

где $B_{\text{копр}}$ – отбраковка шаров по результатам копровых испытаний, %; [C], [S] – содержание углерода и серы в стали, %; [H] – содержание водорода в стали, ppm.

В соответствии с вышеприведенными результатами металлографических исследований влияние концентрации водорода в стали на вероятность разрушения шаров при копровых испытаниях связано с образованием флокенов, выявленных в изломе ряда расколшихся шаров, а влияние серы – с образованием непластичных сульфидов.

В структуре оставшихся 9 % шаров, не выдержавших испытания на ударную стойкость, выявлены микротрещины по границам раздела фаз мартенсита и троостита (рис. 5, а, б). Наличие троостита свидетельствует об отклонении от оптимального режима термообработки, а именно, о пониженной скорости охлаждения при закалке. Полученная двухфазная структура является дефектной по причине значительного различия механических свойств мартенсита и троостита, что повышает вероятность разрушения изделий при ударных нагрузках. Фактически диапазон изменения твердости в сердцевине шаров со структурой мартенсит + троостит составляет 7 – 8 HRC, что подтверждает вышеприведенный тезис о неравномерности распределения механических свойств. Следует отметить, что указанная неравномерность свойств усугубляется присутствием в микроструктуре сердцевины таких шаров помимо мартенсита и троостита карбидов цементитного типа (рис. 5, в). Наличие карбидов свидетельствует о повышенном (до заэвтектоидного состава) содержании углерода и обусловлено

Таблица 1

Статистические характеристики функций и параметра оптимизации для мелющих шаров из рельсовой стали К76Ф

Table 1. Statistical characteristics of functions and optimization parameter for grinding balls made of K76F rail steel

Наименование	Единицы измерения	Область изменения	Среднее значение	Среднее квадратическое отклонение
Брак по результатам копровых испытаний	%	0 – 15,2	3,8	1,1
Содержание в стали				
углерода	%	0,75 – 0,87	0,78	0,09
водорода	ppm	1,2 – 2,0	1,7	0,3
серы	%	0,008 – 0,018	0,012	0,003
фосфора	%	0,011 – 0,020	0,015	0,004
ванадия	%	0,07 – 0,11	0,09	0,01
кремния	%	0,28 – 0,41	0,35	0,04
никеля	%	0,04 – 0,07	0,05	0,01
хрома	%	0,04 – 0,09	0,07	0,01
меди	%	0,01 – 0,05	0,03	0,01
титана	%	0,001 – 0,006	0,003	0,001

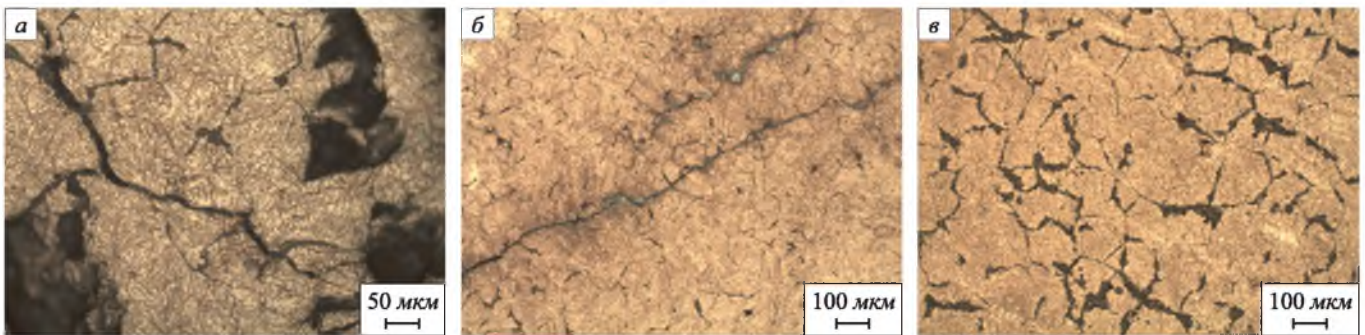


Рис. 5. Микроструктура шара, расколовшегося после 29 ударов:
а – микротрещина между двумя разрушенными частями поверхности шара;
б – образование микротрещины по границам зерен (место нахождения трооститной составляющей);
в – центральная зона шара

Fig. 5. Microstructure of the ball splitted up after 29 impacts:
a – a microcrack between two destroyed parts of the ball surface;
б – formation of a microcrack along the grain boundaries (location of the troostite component);
в – central zone of the ball

значительной его ликвацией (табл. 2). При этом следует отметить, что ликвация остальных химических элементов крайне незначительна.

Таким образом, отрицательное влияние повышения содержания углерода на ударную стойкость шаров обусловлено образованием карбидов цементитного типа при достижении содержания углерода, соответствующего заэвтектоидной стали.

Относительная суммарная степень влияния концентрации вышеприведенных химических элементов на отбраковку шаров по результатам копровых испытаний составила 48 %. Исходя из вышеизложенных результа-

тов, оставшиеся 52 % относительного влияния на ударную стойкость шаров связаны с параметрами технологии раскисления стали и параметрами термообработки шаров после их прокатки. Эффективным методом уменьшения концентрации глиноземистых оксидных включений является применение ферросплавов новых марок с пониженным содержанием алюминия. Это является актуальным, так как в ряде распространенных видов ферросплавов содержание алюминия может достигать значительной величины: в ферросилиции различных марок допустимое содержание алюминия составляет 1,0 – 3,5 %. Также снижению концентрации

Т а б л и ц а 2

Распределение содержания основных химических элементов по сечению шаров из рельсовой стали К76Ф

Table 2. Distribution of content of the main chemical elements over cross section of K76F rail steel balls

Количество элементов, % (по массе)	Место отбора пробы			
	Поверхность	Расстояние 1/4 диаметра от поверхности	Сердцевина	Требования ГОСТ Р 51685 – 2013
C	0,78	0,82 – 0,83	0,84 – 0,85	0,71 – 0,82*
Si	0,26 – 0,27	0,26 – 0,27	0,27	0,25 – 0,60
Mn	1,03 – 1,04	1,02 – 1,04	1,04 – 1,05	0,75 – 1,25
Cr	0,08	0,08	0,08	<0,20
Ni	0,04 – 0,05	0,05	0,05	<0,20
Cu	0,01 – 0,02	0,01	0,01	<0,20
Ti	0,001 – 0,002	0,001 – 0,003	0,003	<0,010
V	0,085 – 0,086	0,086 – 0,088	0,089 – 0,092	0,03 – 0,15
Mo	0,005	0,003 – 0,004	0,005 – 0,006	–
Nb	0,003 – 0,004	0,003	0,003	–
S	0,016 – 0,017	0,014 – 0,015	0,013 – 0,016	<0,020
P	0,015 – 0,017	0,014 – 0,016	0,015	<0,020

* допустимые отклонения составляют ±0,02 %.

неметаллических включений закономерно способствует уменьшению окисленности стали на выпуске из плавильных агрегатов, что достигается за счет совершенствования режимов продувки. Касательно влияния параметров термообработки на образование дефектов мелющих шаров можно отметить, что эффективным направлением по снижению вероятности появления закалочных трещин является применение закалочных сред с высокой охлаждающей способностью.

Выводы

На основании комплекса металлографических и статистических исследований определены характерные дефекты, наличие которых обуславливает снижение ударной стойкости мелющих шаров из отбраковки рельсовой стали марки К76Ф. Анализ природы данных дефектов показал, что они имеют преимущественно сталеплавленное происхождение (внутренние трещины со скоплениями неметаллических включений, флокены) и их образование находится в прямой взаимосвязи с содержанием серы, водорода и углерода в стали. Относительная степень влияния вышеуказанных химических элементов в рельсовой стали К76Ф в фактическом диапазоне изменения их концентрации на ударную стойкость мелющих шаров составила 48 %. Также выявлено значительное влияние на устойчивость мелющих шаров к ударным нагрузкам параметров их термообработки, что подтверждено наличием закалочных трещин в изломе 9 % шаров, не выдержавших копровые испытания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Рахутин М.Г., Бойко П.Ф. Пути совершенствования методов оценки основных характеристик мелющих шаров. *Уголь*. 2017;(12):49–52. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2017-12-49-52>
Rakhutin M.G., Boiko P.F. Ways to improve assessment methods of the main characteristics of grinding balls. *Ugol'*. 2017;(12):49–52. (In Russ.). <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2017-12-49-52>
- Крутилин А.Н., Бестужев Н.И., Бестужев А.Н., Каленкович Д.Н. Мелющие тела. Проблемы. Перспективы. *Литье и металлургия*. 2009;(4(53)):26–33.
Krutilin A.N., Bestuzhev N.I., Bestuzhev A.N., Kalenkovich D.N. Grinding bodies. Problems. Prospective. *Lit'e i metallurgiya*. 2009;(4(53)):26–33. (In Russ.).
- Aldrich C. Consumption of steel grinding media in mills – A review. *Minerals Engineering*. 2013;49:77–91. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.04.023>
- Найзабеков А.Б., Мухаметкалиев Б.С., Арбуз А.С., Лежнев С.Н. Снижение расхода стальных мелющих шаров путем улучшения технологии их производства. *Вести высших учебных заведений Черноземья*. 2016;(4(46)):78–86.
Naizabekov A.B., Mukhametkaliev B.S., Arbuz A.S., Lezhnev S.N. Reduction of consumption of steel grinding balls by improving their production technology. *Vesti vysshikh uchebnykh zavedenii Chernozem'ya*. 2016;(4(46)):78–86. (In Russ.).
- Lam M.M., Serov A.I., Smyrnov Y.N., Ternavskii A.N., Mykheiev V.V. Production of hard (class V) grinding balls at PJSC “DMPZ”. *Steel in Translation*. 2017;47(5):325–329. <https://doi.org/10.3103/S0967091217050072>
- Umucu Y., Deniz V. The effect of ball type in fine particles grinding on kinetic breakage parameters. *Inzynieria Mineralna*. 2015;16(1):197–203.
- Сталинский Д.В., Рудюк А.С., Солень В.К. Выбор материала и технологий термической обработки мелющих шаров, работающих преимущественно в условиях абразивного износа. *Сталь*. 2017;(6):64–69.
Stalinskii D.V., Rudyuk A.S., Solenyi V.K. Choice of material and technologies for heat treatment of grinding balls operating mainly in conditions of abrasive wear. *Stal'*. 2017;(6):64–69. (In Russ.).
- Bai X., Jin Y. Heat treatment of wear-resistant steel ball for large ball mills. *Heat Treatment of Metals*. 2017;42(5):193–196. <https://doi.org/10.13251/j.issn.0254-6051.2017.05.040>
- Arlazarov A., Bouaziz O., Masse J.P., Kegel F. Characterization and modeling of mechanical behavior of quenching and partitioning steels. *Materials Science and Engineering: A*. 2015; 620:293–300. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.10.034>
- Zhang J., Ding H., Misra R.D.K., Wang C. Enhanced stability of retained austenite and consequent work hardening rate through pre-quenching prior to quenching and partitioning in a Q-P microalloyed steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2014; 611:252–256. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.05.074>
- Camurri C., Carrasco C., Colàs R. Improving the working life of steel grinding balls by optimizing their hardness and tenacity. *Materials Science Forum*. 2014;783–786:2260–2265. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.783-786.2260>
- Ефременко В.Г. Металлографический анализ причин разрушения стальных катаных тел для барабанных мельниц. *Вестник Приазовского государственного технического университета*. 2000;(9):89–91.
Efremenko V.G. Metallographic analysis of causes of destruction of rolled steel bodies for drum mills. *Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2000;(9):89–91. (In Russ.).
- Уманский А.А., Головатенко А.В., Осколкова Т.Н., Симачев А.С., Щукин А.Г. Исследование влияния макро- и микроструктуры стальных помольных шаров на их ударную стойкость. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2019;62(4):283–289. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-4-283-289>
Umanskii A.A., Golovatenko A.V., Oskolkova T.N., Simachev A.S., Shchukin A.G. Influence of macro- and microstructure of steel grinding balls on their impact resistance. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019;62(4):283–289. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-4-283-289>
- Pater Z., Tomczak J., Bulzak T., Cyganek Z., Andrietti S., Barbelet M. An innovative method for producing balls from scrap rail heads. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018;97(1-4):893–901. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2007-9>
- Tomczak J., Pater Z., Bulzak T. The flat wedge rolling mill for forming balls from heads of scrap railway rails. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2018;63(1):5–12. <https://doi.org/10.24425/118901>
- Pater Z., Tomczak J., Bulzak T. A cross wedge rolling process for forming 70 mm diameter balls from heads of scrap

railway rails. *Procedia Manufacturing*. 2017;11:466–473. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.137>

17. Баранов Н.А., Тулупов О.Н. Производство мелющих шаров из рельсовой стали. *Актуальные проблемы современной науки, техники и образования*. 2017;(1) 96–99.
Baranov N.A., Tulupov O.N. Production of grinding balls from rail steel. *Aktual'nye problemy sovremennoi nauki, tekhniki i obrazovaniya*. 2017;(1):96–99. (In Russ.).
18. Головатенко А.В., Волков К.В., Александров И.В., Кузнецов Е.П., Дорофеев В.В., Сапелкин О.И. Ввод в эксплуатацию универсального рельсобалочного стана и освоение технологии производства рельсов на современном оборудовании в рельсобалочном цехе ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК». *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2014;6(1374):32–38.

Golovatenko A.V., Volkov K.V., Aleksandrov I.V., Kuznetsov E.P., Dorofeev V.V., Sapelkin O.I. Commissioning of universal rail-and-beam mill and mastering the technology of rail production on modern equipment in the rail-and-beam workshop of JSC “EVRAZ ZSMK”. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2014;6(1374):32–38. (In Russ.).

19. Shaburov D.V., Popov A.E., Zagumennov O.V. Rail production on a universal mill. *Steel in Translation*. 2016;46(7): 503–504. <https://doi.org/10.3103/S0967091216070111>
20. Герасимова Л.П., Ежов А.А., Маресев М.И. *Изломы конструкционных сталей: справочник*. М.: Металлургия; 1987:272.
Gerasimova L.P., Ezhov A.A., Maresev M.I. *Structural Steel Fractures: Handbook*. Moscow: Metallurgiya; 1987:272. (In Russ.).

Сведения об авторах

Information about the Authors

Александр Александрович Уманский, д.т.н., доцент кафедры металлургии черных металлов, Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0003-4403-9006
E-mail: umanskii@bk.ru

Иван Сергеевич Морозов, соискатель степени к.т.н. кафедры металлургии черных металлов, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: ismorozov23@mail.ru

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

Артем 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

Любовь Валерьевна Думова, соискатель степени к.т.н. кафедры металлургии черных металлов, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: doumova@bk.ru

Aleksandr A. Umanskii, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Prof of the Chair of Ferrous Metallurgy, Siberian State Industrial University
ORCID: 0000-0003-4403-9006
E-mail: umanskii@bk.ru

Ivan S. Morozov, Candidates for a Degree of Cand. Sci. (Eng.) of the Chair of Ferrous Metallurgy, Siberian State Industrial University
E-mail: ismorozov23@mail.ru

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

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

Lyubov' V. Dumova, Candidates for a Degree of Cand. Sci. (Eng.) of the Chair of Ferrous Metallurgy, Siberian State Industrial University
E-mail: doumova@bk.ru

Вклад авторов

Contribution of the Authors

А. А. Уманский – формирование плана проведения исследований; обобщение результатов металлографических и статистических исследований; формулирование общих выводов.

И. С. Морозов – проведение статистических исследований влияния химического состава рельсовой стали на отбраковку шаров по результатам копровых испытаний.

Е. В. Протопопов – научное обоснование закономерностей влияния химического состава рельсовой стали на образование дефектов мелющих шаров; анализ полученных результатов.

А. С. Симачев – проведение металлографических исследований характерных дефектов и изломов мелющих шаров.

Л. В. Думова – проведение аналитического обзора по тематике исследований; оформление графических материалов и статьи.

A. A. Umanskii – formation of research plan; generalization of the results of metallographic and statistical studies; formulation of general conclusions.

I. S. Morozov – conducting statistical studies on influence of rail steel chemical composition on balls rejection based on the results of copra tests.

E. V. Protopopov – scientific substantiation of regularities of influence of the rail steel chemical composition on formation of defects in grinding balls; analysis of the research results.

A. S. Simachev – conducting metallographic studies on characteristic defects and fractures of grinding balls.

L. V. Dumova – conducting analytical review on the subject of research; design of graphic materials and text.

Поступила в редакцию 26.05.2022
После доработки 29.08.2022
Принята к публикации 14.12.2022

Received 26.05.2022
Revised 29.08.2022
Accepted 14.12.2022

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 <https://www.scopus.com>, <https://www.scimagojr.com> и <https://www.scival.com>

Издатель:



МИСИС
УНИВЕРСИТЕТ
НАУКИ И ТЕХНОЛОГИЙ

Национальный исследовательский
технологический университет «МИСИС»

ISSN: **03680797**

Периоды индексирования:
1971, 1974 – 1988,
2001 – 2004,
2017 – н.в.

**Статистика
просмотра статей
с сайта fermet.misis.ru**



Год	Просмотры
2018	23 796
2019	27 195
2020	27 192
2021	29 381
2022	24 583

Science Index

1 место в рейтинге за 2021 г.
по тематике «Металлургия»

0,759 двухлетний
импакт-фактор РИНЦ



МИСИС
УНИВЕРСИТЕТ
НАУКИ И ТЕХНОЛОГИЙ

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ



ПОЛИТЕХ
Санкт-Петербургский
Политехнический Университет
Петра Великого



СибГИУ
Сибирский государственный
индустриальный университет



РосНИИ



НАУКА И ИННОВАЦИИ



Уральский
федеральный
университет
им. Петра Великого



ЕВРАЗ

9

H Index



2021 – Q2
Metals and Alloys

SJR



Год	SJR
2005	0,121
2006	0,139
2007	0,162
2018	0,323
2019	0,300
2020	0,369
2021	0,369

**Среднее
цитирование
на статью**



Год	Среднее цитирование
2004	0,240
2006	0,302
2008	0,311
2018	0,515
2019	0,492
2020	0,539
2021	0,539

**Общее
количество
цитирований**



Год	Общее количество цитирований
2005	21
2006	24
2007	22
2018	126
2019	41
2020	49
2021	208

**СITESCORE
2021**



Год	SiteScore
2018	0,2
2019	0,5
2020	0,8
2021	1,0

**SNIP 2021
0,689**



Над номером работали:

Л.И. Леонтьев, главный редактор

Е.В. Протопопов, заместитель главного редактора

Е.А. Ивани, заместитель главного редактора

Л.П. Бащенко, заместитель ответственного секретаря

Е.Ю. Потапова, заместитель главного редактора по развитию

О.А. Долицкая, научный редактор

Е.М. Запольская, ведущий редактор

А.О. Гашникова, ведущий редактор

В.В. Расенец, верстка, иллюстрации

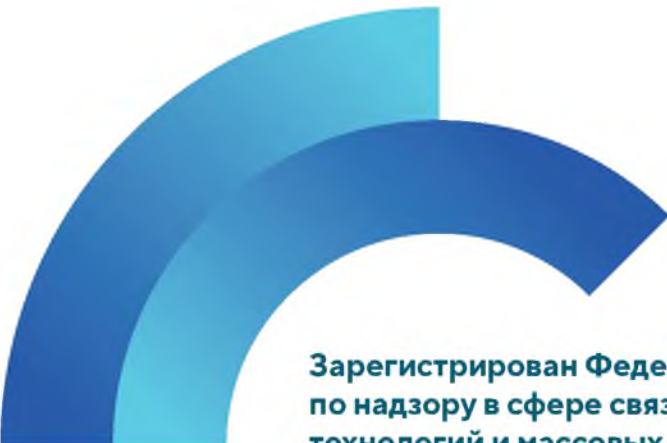
Г.Ю. Острогорская, менеджер по работе с клиентами

Подписано в печать 25.04.2023. Формат 60×90 ¹/₈. Бум. офсетная № 1.
Печать цифровая. Усл. печ. л. 16,5. Заказ 17169. Цена свободная.

Отпечатано в типографии Издательского Дома МИСИС.
119049, Москва, Ленинский пр-кт, д. 4, стр. 1.
Тел./факс: (499) 236-76-17



Prospects and directions of digital transformation in foundry
Microstructure and elemental analysis of iron-based powder composite materials
Development of shear deformation in lath martensite of medium alloy steels under tension
Mechanical and acoustic properties of deformable alloys
Features of formation of austenite grains in 12 % Cr heat-resistant ferritic-martensitic steels
Structural organization and properties of surface layers of WC-Co hard alloys after pulsed laser processing
Influence of laser spot size on structure and properties of high-temperature CompoNIAL-M5-3 alloy produced by selective laser melting
Multilayer amorphous-crystalline high-entropy metal films
Electron beam additive manufacturing of composite alloy from stainless steel and aluminum bronze: Microstructure and mechanical properties
Deoxidation capacity of aluminum in ferromanganese carbon-containing melts
Hydrometallurgical refining of metallurgical silicon
Occurrence of characteristic defects of grinding balls from rejects of continuously cast billets of rail steel
Errors of non-contact temperature measurement
Data generation for digital simulators of metallurgical process operators
Information-modeling system for prediction of the composition and properties of final slag in a blast furnace in real time
Institutionalization of ESG-principles at the international level and in the Russian Federation, their impact on ferrous metallurgy enterprises. Part 1



**Зарегистрирован Федеральной службой
по надзору в сфере связи, информационных
технологий и массовых коммуникаций.
Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС77-35456.**

Подписной индекс 70383.

