

# ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

Научно-технический журнал

Издается с января 1958 г. Выпускается 6 раз в год

2025 Том 68 № 2  
Vol. No.

# IZVESTIYA FERROUS METALLURGY

Scientific and Technical Journal

Published since January 1958. Issued 6 times a year

# 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:

**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  
**А. А. Бродов**, к.экон.н., ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина», г. Москва  
**Е. П. Волынкина**, 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., академик РАЕН, ОАО «Электростальский завод тяжелого машиностроения», 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  
**В. П. Мешалкин**, академик РАН, д.т.н., профессор, РХТУ им. Д.И. Менделеева, г. Москва

В соответствии п. 5 Правил формирования перечня ВАК журнал «Известия вузов. Черная металлургия» входит в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, публикация в которых учитывается при защитах кандидатских и докторских диссертаций как индексируемый в МБД.

## Главный редактор:

**Леопольд Игоревич Леонтьев**, академик РАН, советник, Президиум РАН; д.т.н., профессор, НИТУ «МИСИС»; главный научный сотрудник, Институт металлургии УрО РАН  
Россия, 119049, Москва, Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

## Заместитель главного редактора:

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

## Издатель:

Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

## Адреса подразделений редакции:

### в Москве

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

### в Новокузнецке

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

**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., профессор, 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

## Founders:



## Editorial Board:

**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, 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 R. 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.), Academician of RANS, Electrosteel Heavy Engineering Works JSC, 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. 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

## Editor-in-Chief:

**Leopol'd I. Leont'ev**, Academician, Adviser of the Russian Academy of Sciences; Dr. Sci. (Eng.), Prof., NUST "MISIS"; Chief Researcher, Institute of Metallurgy UB RAS, Moscow  
4 Leninskii Ave., Moscow 119049, Russian Federation  
National University of Science and Technology "MISIS"

## Deputy Editor-in-Chief:

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

## Publisher:

National University of Science and Technology "MISIS"

## Editorial Office Address:

**in Moscow**  
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@sis.ru

**in Novokuznetsk**  
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

**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, Sydney, 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  
**Marcus Speidel**, Dr. Natur. Sci., Prof., Swiss Academy of Materials, Switzerland  
**Nikolai A. Spirin**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Ural Federal University, Yekaterinburg  
**Guoi Tang**, 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.), Advisor, ALE "Kuzbass Association of Waste Processors", Novokuznetsk  
**Aleksei B. Yur'ev**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Rector, 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

*In accordance with paragraph 5 of the Rules for the formation of the Higher Attestation Commission list journal "Izvestiya. Ferrous metallurgy" is included in the list of leading peer-reviewed scientific journals, publication in which is taken into account in the defense of candidate and doctoral dissertations, as indexed in international data bases.*

**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.

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

К юбилею Алексея Борисовича Юрьева! ..... 112

To the Anniversary of Aleksei Borisovich Yur'ev ..... 112

ИСТОРИЯ ОТРАСЛИ

HISTORY OF METALLURGY

Тресвятский Л.А., Протопопов Е.В., Уманский А.А.,  
Худолеев А.Н. Кузнечная броня: первые рубежи  
победы ..... 114

Tresvyatskii L.A., Protopopov E.V., Umanskii A.A., Khu-  
doleev A.N. Kuznetsk armor: The first frontiers of vic-  
tory ..... 114

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

METALLURGICAL TECHNOLOGIES

Юнусов А.М., Полевой Е.В., Юнин Г.Н., Оскол-  
кова Т.Н. Опыт производства рельсов из бейнит-  
ной стали марок 30ХГ2С2АФМ и 30ХГ2САФН ..... 124

Yunusov A.M., Polevoi E.V., Yunin G.N., Oskolkova T.N.  
Experience in producing rails from bainitic steels  
30KhG2S2AFM and 30KhG2SAFN ..... 124

ЭКОЛОГИЯ И РАЦИОНАЛЬНОЕ  
ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

ECOLOGY AND RATIONAL USE  
OF NATURAL RESOURCES

Ульева Г.А., Туысхан К., Мацугина Е.М., Волоки-  
тина И.Е., Ахметова Г.Е. Современное состояние  
проблемы утилизации отходов производства ..... 131

Ulyeva G.A., Tuyskhan K., Matsugina E.M., Voloki-  
tina I.E., Akhmetova G.E. Actual progress of produc-  
tion waste disposal problems ..... 131

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

MATERIALS SCIENCE

Зоря И.В., Полетаев Г.М., Бебихов Ю.В., Семенов А.С.  
Инициация плавления на границах зерен наклона в  
аустените в зависимости от угла разориентации ..... 139  
Ишмаметов Д.А., Помельникова А.С., Петелин А.Л.  
К вопросу о влиянии добавок оксидов редкоземель-  
ных элементов на кинетику образования бориро-  
ванных слоев и диффузию бора по границам зерен  
при борировании сталей ..... 148

Zorya I.V., Poletaev G.M., Bebikhov Yu.V., Semenov A.S.  
Initiation of melting at tilt grain boundaries in austenite  
depending on the misorientation angle ..... 139  
Ishmametov D.A., Pomel'nikova A.S., Petelin A.L. On the  
influence of rare-earth oxide additives on kinetics of  
borated layer formation and boron diffusion along grain  
boundaries during steel boriding ..... 148

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

PHYSICO-CHEMICAL BASICS  
OF METALLURGICAL PROCESSES

Большов Л.А., Корнейчук С.К., Большова Э.Л. Термо-  
динамические параметры взаимодействия второго  
порядка азота с никелем и хромом в жидкой стали... 158  
Дмитриев А.Н., Бурова Ю.Е., Г.Ю. Витькина Г.Ю.,  
Барбин Н.М., Терентьев Д.И. Термодинамическое  
моделирование процесса восстановления железо-  
рудных материалов водородсодержащими газами .... 163  
Смирнов К.И., Гамов П.А., Рошин В.Е., Самолин В.С.  
Термодинамический анализ условий разделения  
железа и титана в ильменитовом концентрате селек-  
тивным восстановлением элементов ..... 171  
Шешуков О.Ю., Михеенков М.А., Егизарьян Д.К.,  
Михеенков А.М., Клеоновский М.В., Матю-  
хин О.В. Особенности формирования фазового  
состава сталеплавильных шлаков и оценка возмож-  
ности получения на их основе минеральных вяжу-  
щих веществ с низкой генерацией CO<sub>2</sub> ..... 179

Bol'shov L.A., Korneichuk S.K., Bol'shova E.L. Thermo-  
dynamic second-order interaction coefficients of nitro-  
gen with nickel and chromium in liquid steel ..... 158  
Dmitriev A.N., Burova Yu.E., Vit'kina G.Yu., Bar-  
bin N.M., Terent'ev D.I. Thermodynamic modelling  
of reduction of iron ore materials by hydrogen-contain-  
ing gases ..... 163  
Smirnov K.I., Gamov P.A., Roshchin V.E., Samolin V.S.  
Thermodynamic analysis of conditions for iron and ti-  
tanium separation in ilmenite concentrate by selective  
reduction of elements ..... 171  
Sheshukov O.Yu., Mikheenkova M.A., Egiazar'yan D.K.,  
Mikheenkova A.M., Kleonovskii M.V., Matyu-  
khin O.V. Peculiarities of the phase composition  
formation of steelmaking slags and evaluation of the  
possibility of obtaining mineral binders with low CO<sub>2</sub>  
generation on their basis ..... 179

**СОДЕРЖАНИЕ** *(продолжение)*

**CONTENTS** *(Continuation)*

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
И АВТОМАТИЗАЦИЯ  
В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ**

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

**Зимин А.В., Корнет М.Е., Буркова И.В., Зимин В.В.**

Использование цифровых имитационных моде-  
лей для оптимизация сложных производственных  
объектов ..... 188

**Zimin A.V., Kornet M.E., Burkova I.V., Zimin V.V.**

Using digital simulation models to optimize the ope-  
ration of complex production facilities ..... 188