

ИЗВЕСТИЯ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

Том 63 Номер 1 2020



• МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

О ДВИЖЕНИИ БРИКЕТИРУЕМОЙ МАССЫ В ЭКСТРУДЕРЕ. ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ.
СООБЩЕНИЕ 1

ДИНАМИКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИЛ, ОТКЛОНЯЮЩИХ ДУГИ ОТ
ВЕРТИКАЛИ В ТРЕХФАЗНОЙ ДУГОВОЙ ПЕЧИ

• ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ И ПЛОТНОСТЬ РАСПЛАВОВ Fe–Mn

• МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

ЛЕГКИЕ НЕМАГНИТНЫЕ СТАЛИ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ Fe – 25 Mn –
– 5 Ni – Al – C

АЗОТИРОВАНИЕ СТАЛЕЙ РАЗЛИЧНЫХ СТРУКТУРНЫХ КЛАССОВ, ПОЛУЧЕННЫХ
МЕТОДАМИ ЛАЗЕРНЫХ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

• КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

ХИМИЧЕСКИЕ РЕАКЦИИ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ЖЕЛЕЗА ПРИРОДНЫМ
ГАЗОМ ИЗ ОКСИДОВ



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

ИЗВЕСТИЯ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

№ 1, 2020

Издается с января 1958 г. ежемесячно

Том 63

ИЗВЕСТИЯ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

Главный редактор: ЛЕОНТЬЕВ Л.И.
(Российская Академия Наук, г. Москва)

Заместитель главного редактора: ПРОТОПОПОВ Е.В.
(Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)

Члены редакционной коллегии:

АЛЕШИН Н.П. (Российская Академия Наук, г. Москва)
АСТАХОВ М.В. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
АШИХМИН Г.В. (ОАО «Институт Цветмет-обработка», г. Москва)
БАЙСАНОВ С.О. (Химико-металлургический институт им. Ж.Абишева, г. Караганда, Республика Казахстан)
БЕЛОВ В.Д. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
БРОДОВ А.А., редактор раздела «Экономическая эффективность металлургического производства» (ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина», г. Москва)
ВОЛЫНКИНА Е.П. (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)
ГЛЕЗЕР А.М. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
ГОРБАТЮК С.М. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
ГРИГОРОВИЧ К.В., редактор раздела «Металлургические технологии» (Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва)
ГРОМОВ В.Е. (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)
ДМИТРИЕВ А.Н. (Институт металлургии УрО РАН, г. Екатеринбург)
ДУБ А.В. (ЗАО «Наука и инновации», г. Москва)
ЖУЧКОВ В.И. (Институт металлургии УрО РАН, г. Екатеринбург)
ЗИНГЕР Р.Ф. (Институт Фридриха-Александра, Германия)
ЗИНИГРАД М. (Институт Ариэль, Израиль)
ЗОЛОТУХИН В.И. (Тульский государственный университет, г. Тула)
КОЛМАКОВ А.Г. (Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва)

КОЛОКОЛЬЦЕВ В.М. (Магнитогорский государственный технический университет, г. Магнитогорск)
КОСТИНА М.В. (Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва)
КОСЫРЕВ К.Л. (АО «НПО «ЦНИИТМаш», г. Москва)
КУРГАНОВА Ю.А. (МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва)
КУРНОСОВ В.В. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
ЛИНН Х. (ООО «Линн Хай Терм», Германия)
ЛЫСАК В.И. (Вологодский государственный технический университет, г. Вологда)
МЕШАЛКИН В.П. (Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева, г. Москва)
МУЛЮКОВ Р.Р. (ФГБУН Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, г. Уфа)
МЫШЛЯЕВ Л.П. (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)
НИКУЛИН С.А. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
НУРУМГАЛИЕВ А.Х. (Карагандинский государственный индустриальный университет, г. Караганда, Республика Казахстан)
ОСТРОВСКИЙ О.И. (Университет Нового Южного Уэльса, Сидней, Австралия)
ПИЕТРЕЛЛИ ЛОРИС (Итальянское национальное агентство по новым технологиям, энергетике и устойчивому экономическому развитию, Рим, Италия)
ПОДГОРОДЕЦКИЙ Г.С., редактор раздела «Ресурсосбережение в черной металлургии» (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
ПЫШМИНЦЕВ И.Ю., редактор раздела «Инновации в металлургическом и лабораторном оборудовании, технологиях и материалах» (Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности, г. Челябинск)

РАПЕВ Ц.В., редактор раздела «Стали особого назначения» (Академия наук Болгарии, Болгария)
РУДСКОЙ А.И. (Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург)
СИВАК Б.А. (АО АХК «ВНИИМЕТМАШ», г. Москва)
СИМОНЯН Л.М., редактор раздела «Экология и рациональное природопользование» (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
СМИРНОВ Л.А. (ОАО «Уральский институт металлов», г. Екатеринбург)
СОЛОДОВ С.В., редактор раздела «Информационные технологии и автоматизация в черной металлургии» (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
СПИРИН Н.А. (Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург)
ТАНГ ГУОИ (Институт перспективных материалов университета Циньхуа, г. Шеньжень, Китай)
ТЕМЛЯНЦЕВ М.В. (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)
ФИЛОНОВ М.Р., редактор раздела «Материаловедение» (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
ЧУМАНОВ И.В. (Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск)
ШЕШУКОВ О.Ю. (Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург)
ШПАЙДЕЛЬ М.О. (Швейцарская академия материаловедения, Швейцария)
ЮРЬЕВ А.Б. (ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК», г. Новокузнецк)
ЮСУПОВ В.С. (Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва)

Учредители:



Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»



Сибирский государственный индустриальный университет

Настоящий номер журнала подготовлен к печати
Национальным исследовательским технологическим университетом «МИСиС»

Адреса редакции:

119991, Москва, Ленинский пр-т, д. 4
Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
Тел.: (495) 638-44-11, (499) 236-14-27
E-mail: fermet.misis@mail.ru, ferrous@misis.ru
www.fermet.misis.ru

654007, Новокузнецк, 7,
Кемеровской обл., ул. Кирова, д. 42
Сибирский государственный индустриальный университет,
Тел.: (3843) 74-86-28
E-mail: redjizvz@sibsiu.ru

Журнал «Известия ВУЗов. Черная металлургия» по решению ВАК 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».

Журнал «Известия ВУЗов. Черная металлургия» индексируется в международной базе данных Scopus.

Журнал «Известия ВУЗов. Черная металлургия» зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций ПИ № ФС77-35456

IZVESTIYA

VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA

IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY

Editor-in-Chief: LEONTEV L.I.
(Russian Academy of Sciences, Moscow)

Deputy Editor-in-Chief: PROTOPOPOV E.V.
(Siberian State Industrial University, Novokuznetsk)

Editorial Board:

N.P. ALESHIN (Russian Academy of Sciences, Moscow)
G.V. ASHIKHMIN (JSC "Institute
Tsvetmetobrabotka", Moscow)

M.V. ASTAKHOV (National Research Technological
University "MISIS", Moscow)

S.O. BAISANOV (Abishev Chemical-Metallurgical
Institute, Karaganda, Republic of Kazakhstan)

V.D. BELOV (National Research Technological
University "MISIS", Moscow)

A.A. BRODOV, Editor of the section "Economic effi-
ciency of metallurgical production" (IP Bardin Central
Research Institute for Ferrous Metallurgy, Moscow)

I.V. CHUMANOV (South Ural State Research
University, Chelyabinsk)

A.N. DMITRIEV (Institute of Metallurgy, Ural
Branch of the Russian Academy of Sciences, Ural Federal
University, Ekaterinburg)

A.V. DUB (JSC "Science and Innovations", Moscow)

M.R. FILONOV, Editor of the section "Material
science" (National Research Technological University
"MISIS", Moscow)

A.M. GLEZER (National Research Technological
University "MISIS", Moscow)

S.M. GORBATYUK (National Research Technological
University "MISIS", Moscow)

K.V. GRIGOROVICH, Editor of the section "Metallur-
gical Technologies" (Baikov Institute of Metallurgy and
Materials Science of RAS, Moscow)

V.E. GROMOV (Siberian State Industrial University,
Novokuznetsk)

A.G. KOLMAKOV (Baikov Institute of Metallurgy and
Materials Science of RAS, Moscow)

V.M. KOLOKOL'TSEV (Magnitogorsk State Technical
University, Magnitogorsk)

M.V. KOSTINA (Baikov Institute of Metallurgy and
Materials Science of RAS, Moscow)

K.L. KOSYREV (JSC "NPO "TSNIITMash", Moscow)

YU.A. KURGANOVA (Bauman Moscow State
Technical University, Moscow)

V.V. KURNOSOV (National Research Technological
University "MISIS", Moscow)

H. LINN (Linn High Therm GmbH, Hirschbach,
Germany)

V.I. LYSAK (Volgograd State Technical University,
Volgograd)

V.P. MESHALKIN (D.I. Mendeleev Russian Chemical-
Technological University, Moscow)

R.R. MULYUKOV (Institute of Metals Superplasticity
Problems of RAS, Ufa)

L.P. MYSHLYAEV (Siberian State Industrial
University, Novokuznetsk)

S.A. NIKULIN (National Research Technological
University "MISIS", Moscow)

A.KH. NURUMGALIEV (Karaganda State Industrial
University, Karaganda, Republic of Kazakhstan)

O.I. OSTROVSKI (University of New South Wales,
Sydney, Australia)

I. LORIS PIETRELLI (Italian National Agency for
New Technologies, Energy and Sustainable Economic
Development, Rome, Italy)

G.S. PODGORODETSKII, Editor of the section
"Resources Saving in Ferrous Metallurgy" (National
Research Technological University "MISIS", Moscow)

I.YU. PYSHMINTSEV, Editor of the section
"Innovations in metallurgical industrial and
laboratory equipment, technologies and materials"
(Russian Research Institute of the Pipe Industry,
Chelyabinsk)

TS.V. RASHEV, Editor of the section "Superduty steel"
(Bulgarian Academy of Sciences, Bulgaria)

A.I. RUDSKOI (Peter the Great Saint-Petersburg
Polytechnic University, Saint-Petersburg)

O.YU. SHESHUKOV (Ural Federal University,
Ekaterinburg)

L.M. SIMONYAN, Editor of the section "Ecology
Rational Use of Natural Resources" (National Research
Technological University "MISIS", Moscow)

R.F. SINGER (Friedrich-Alexander University, Germany)

B.A. SIVAK (VNIIMETMASH Holding Company,
Moscow)

L.A. SMIRNOV (OJSC "Ural Institute of Metals",
Ekaterinburg)

S.V. SOLODOV, Editor of the section "Information
Technologies and Automatic Control in Ferrous
Metallurgy" (National Research Technological University
"MISIS", Moscow)

M. SPEIDEL (Swiss Academy of Materials, Switzerland)

N.A. SPIRIN (Ural Federal University, Ekaterinburg)

TANG GUOI (Institute of Advanced Materials of
Tsinghua University, Shenzhen, China)

M.V. TEMPLYANTSEV (Siberian State Industrial
University, Novokuznetsk)

E.P. VOLYNKINA (Siberian State Industrial
University, Novokuznetsk)

A.B. YUR'EV (OJSC "ZSMK", Novokuznetsk)

V.S. YUSUPOV (Baikov Institute of Metallurgy and
Materials Science of RAS, Moscow)

V.I. ZHUCHKOV (Institute of Metallurgy, Ural
Branch of the Russian Academy of Sciences, Ural Federal
University, Ekaterinburg)

M. ZINIGRAD (Ariel University, Israel)

V.I. ZOLOTUKHIN (Tula State University, Tula)

Founders:



National Research Technological University "MISIS"



Siberian State Industrial University

This issue of the journal was prepared by
National Research Technological University "MISIS"

Editorial Addresses:

119991, Moscow, Leninskii prosp., 4
National Research Technological University "MISIS",
Tel.: +7 (495) 638-44-11, +7 (499) 236-14-27
E-mail: fermet.misis@mail.ru, ferrous@sisu.ru
www.fermet.misis.ru

654007, Novokuznetsk, Kemerovo region,
Kirova str., 42
Siberian State Industrial University,
Tel.: +7 (3843) 74-86-28
E-mail: redjizvz@sibsiu.ru

Journal "Izvestiya VUZov. Chernaya Metallurgiya = 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.

The journal "Izvestiya VUZov. Chernaya Metallurgiya = Izvestiya. Ferrous metallurgy" is indexed in Scopus.

Journal "Izvestiya VUZov. Chernaya Metallurgiya = Izvestiya. Ferrous metallurgy" is registered
in Federal Service for Supervision in the Sphere of Mass Communications PI number FS77-35456

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Бижанов А.М., Подгородецкий Г.С. О движении брикетируемой массы в экструдере. Точные решения. Сообщение 1	7
Матюхин В.И., Ярошенко Ю.Г., Журавлев С.Я., Морозова Е.В., Матюхина А.В. Технологические возможности использования природного газа в шахтных печах для обжига известняка ...	13
Смирнов Е.Н., Скляр В.А., Богадевич Д.И., Смирнов А.Н., Белевитин В.А. Исследование влияния наличия дополнительного сдвигового воздействия на эффективность технологии MSR в условиях сортовой МНЛЗ	19
Ячиков И.М., Костылева Е.М., Портнова И.В. Динамика электромагнитных сил, отклоняющих дуги от вертикали в трехфазной дуговой печи	27
Крюков Р.Е., Козырев Н.А., Михно А.Р., Башченко Л.П., Калинингорский А.Н. Влияние введения добавок углерода и фтора во флюсы, изготовленные из шлака силикомарганца	34

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Синицын Н.И., Чикова О.А., Выхин В.В. Поверхностное натяжение и плотность расплавов Fe–Mn	40
---	----

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Капуткина Л.М., Связкин А.Г., Смарикина И.В., Киндоп В.Э. Легкие немагнитные стали на основе системы Fe – 25 Mn – 5 Ni – Al – C	47
Тен Э.Б., Коль О.А. Зависимость отбела чугуна от его углеродного эквивалента	57
Цветкова Е.В., Базалева К.О., Чекин И.С., Климова-Корсмик О.Г., Жидков А.С. Азотирование сталей различных структурных классов, полученных методами лазерных аддитивных технологий	63

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Виноградов К.О., Смыслова А.Л. Имитационное моделирование логистической системы транспортировки жидкого чугуна металлургического предприятия	71
--	----

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

Сиротин Д.В. Нейросетевой подход к прогнозированию стоимости ферросплавной продукции	78
--	----

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Бердников В.И., Гудим Ю.А. Химические реакции при восстановлении железа природным газом из оксидов	84
Шешукову Олегу Юрьевичу – 60 лет	87

CONTENTS

METALLURGICAL TECHNOLOGIES

A.M. Bizhanov, G.S. Podgorodetskii On the movement of briquetted mass in extruder. Exact solutions	7
V.I. Matyukhin, Yu.G. Yaroshenko, S.Ya. Zhuravlev, E.V. Morozova, A.V. Matyukhina Technological possibilities of using natural gas in shaft furnaces for limestone roasting	13
E.N. Smirnov, V.A. Sklyar, D.I. Bogadevich, A.N. Smirnov, V.A. Belevitin Additional shearing impact on the effectiveness of MSR technology in conditions of billet CCM	19
I.M. Yachikov, E.M. Kostyleva, I.V. Portnova Dynamics of electromagnetic forces rejecting arcs from verticals in a three-phase arc furnace	27
R.E. Kryukov, N.A. Kozыrev, A.R. Mikhno, L.P. Bashchenko, A.N. Kalinogorskii Influence of introduction of carbon and fluorine additives to fluxes made of silicomanganese slag	34

PHYSICO-CHEMICAL BASICS OF METALLURGICAL PROCESSES

N.I. Sinitsin, O.A. Chikova, V.V. V'yukhin Surface tension and density of Fe–Mn melts	40
---	----

MATERIAL SCIENCE

L.M. Kaputkina, A.G. Svyazhin, I.V. Smarygina, V.E. Kindop Light non-magnetic steels based on Fe – 25 Mn – 5 Ni – Al – C system	47
E.B. Ten, O.A. Kol' Dependence of cast iron chill from its carbon equivalent	57
E.V. Tsvetkova, K.O. Bazaleeva, I.S. Chekin, O.G. Klimova-Korsmik, A.S. Zhidkov Nitriding of steels of various structural classes manufactured by laser additive technologies	63

INFORMATION TECHNOLOGIES AND AUTOMATIC CONTROL IN FERROUS METALLURGY

K.O. Vinogradov, A.L. Smyslova Simulation modeling of logistic system for liquid iron transportation at metallurgical plant	71
---	----

ECONOMIC EFFICIENCY OF METALLURGICAL PRODUCTION

D.V. Sirotin Neural network approach to forecasting the cost of ferroalloy products	78
---	----

SHORT REPORTS

V.I. Berdnikov, Yu.A. Gudim Chemical reactions at reduction of iron from oxides by natural gas	84
To the 60 th Anniversary of Oleg Yur'evich Sheshukov	87

УДК 621.791:624

ВЛИЯНИЕ ВВЕДЕНИЯ ДОБАВОК УГЛЕРОДА И ФТОРА ВО ФЛЮСЫ, ИЗГОТОВЛЕННЫЕ ИЗ ШЛАКА СИЛИКОМАНГАНЦА

Крюков Р.Е., к.т.н., доцент кафедры материаловедения, литейного и сварочного производства (rek_nzrmk@mail.ru)

Козырев Н.А., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой материаловедения, литейного и сварочного производства (kozyrev_na@mtsp.sibsiu.ru)

Михно А.Р., магистрант кафедры материаловедения, литейного и сварочного производства (mikno-mm131@mail.ru)

Бащенко Л.П., к.т.н., доцент кафедры теплоэнергетики и экологии (luda.baschenko@gmail.com)

Калиногорский А.Н., к.т.н., и.о. заведующего кафедрой «Металлургия черных металлов» (mchmsis@mail.ru)

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

Аннотация. Проведены исследования сварочного флюса, содержащего шлак силикомарганца с флюс-добавкой на основе пыли газоочистки производства алюминия. Изучено влияние введения углеродфторсодержащей добавки на содержание общего кислорода и водорода в металле сварного шва, а также на ударную вязкость при положительных и отрицательных температурах. Для изготовления сварочного флюса использовали в качестве основы шлак силикомарганца, в качестве флюса – добавки пыли электрофильтров производства алюминия: шлак силикомарганца производства Западно-Сибирского электрометаллургического завода и пыль электрофильтров производства алюминия (углеродфторсодержащую добавку) объединенной компании «РУСАЛ». Сварку образцов проводили с помощью сварочного трактора ASAW-1250. Химический состав исследуемых сварных образцов определяли по ГОСТ 10543-98 атомноэмиссионным методом на спектрометре ДФС-71 и рентгенофлюоресцентным методом на спектрометре XRF-1800. Фракционный газовый анализ проводили с помощью анализатора LECO TC-600. Исследования сварных образцов на ударную вязкость при положительных и отрицательных температурах проводили с помощью маятникового копра по ГОСТ 9454-78. Построены зависимости влияния количества введенной углеродфторсодержащей флюс-добавки на концентрацию кислорода и водорода в металле сварного шва. При использовании углеродфторсодержащей флюс-добавки в сварочный флюс на основе шлака силикомарганца снижается количество кислорода и водорода в металле сварного шва, при этом возрастает ударная вязкость при положительных и отрицательных температурах. Построены зависимости количества кислорода и водорода в металле сварного шва, а также ударной вязкости от количества введенной углеродфторсодержащей флюс-добавки.

Ключевые слова: сварка, сварочный флюс, техногенные отходы, шлак силикомарганца, пыль газоочистки, ударная вязкость, общий кислород, водород.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-1-34-39

ВВЕДЕНИЕ

Вопросам разработки новых сварочных и наплавочных флюсов с использованием техногенных отходов металлургического производства уделяется большое внимание в РФ [1 – 3]. При изготовлении сварочных и наплавочных материалов для удешевления их производства в последнее время используются различные шлаковые системы, в том числе с применением техногенных отходов металлургического производства [4 – 21]. Ряд исследований, проведенных ранее, посвящен совершенствованию составов сварочных флюсов на основе шлака производства силикомарганца. Предложены новые сварочные флюсы, изготовленные с использованием шлака силикомарганца с углеродфторсодержащей добавкой, изготовленной из пыли газоочистки алюминиевого производства [22, 23].

В настоящей работе представлено дальнейшее исследование сварочного флюса на основе шлака производства силикомарганца в смеси с углеродфторсодержащей флюс-добавкой.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для сварки образцов применяли сварочный трактор ASAW-1250. Химический состав исследуемых сварных образцов определяли по ГОСТ 10543-98 на спектрометре ДФС-71 (атомно-эмиссионный метод) и на спектрометре XRF-1800 (рентгенофлюоресцентный метод). Исследование сварных образцов на ударную вязкость (KCV) при положительных и отрицательных температурах проводили с помощью маятникового копра по ГОСТ 9454-78. Для проведения фракционного газового анализа применяли анализатор LECO TC-600.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВСЕСТОРОННЕЕ РАССМОТРЕНИЕ

ВОПРОСА

В настоящей работе проведены исследования сварочно-технологических свойств сварочного флюса, изготовленного из шлака силикомарганца и флюс-добавки на основе пыли газоочистки производства алюминия. Дополнительно изучено влияние введения углеродфторсодержащей добавки на содержание общего кислорода и водорода в металле сварного шва, а также влияние этой добавки на физико-механические свойства металла сварного шва (ударная вязкость при положительных и отрицательных температурах).

Для изготовления сварочного флюса в качестве основы использовали шлак силикомарганца, в качестве флюса – добавки пыли электрофильтров производства алюминия следующего химического состава:

– шлак силикомарганца производства Западно-Сибирского электрометаллургического завода, % (по массе): 6,91 – 9,62 Al_2O_3 ; 22,85 – 31,70 CaO ; 46,46 – 48,16 SiO_2 ; 0,27 – 0,81 FeO ; 6,48 – 7,92 MgO ; 8,01 – 8,43 MnO ; 0,28 – 0,76 F ; 0,26 – 0,36 Na_2O ; до 0,62 K_2O ; 0,15 – 0,17 S ; 0,01 P ;

– пыль электрофильтров производства алюминия (углеродфторсодержащая добавка) объединенной компании «РУСАЛ», % (по массе): 21,00 – 46,23 Al_2O_3 ; 18 – 27 F ; 8 – 15 Na_2O ; 0,4 – 6,0 K_2O ; 0,7 – 2,3 CaO ; 0,5 – 2,48 SiO_2 ; 2,1 – 3,27 Fe_2O_3 ; 12,5 – 30,2 $\text{C}_{\text{общ}}$; 0,07 – 0,90 MnO ; 0,06 – 0,90 MgO ; 0,09 – 0,19 S ; 0,1 – 0,18 P .

Изготовление флюс-добавки проводили по методу, описанному в работах [22, 23].

Состав исследуемых сварочных флюсов приведен ниже:

Образец	Количество в сварочном флюсе, %	
	шлак силикомарганца	углеродфторсодержащая добавка
0	100	–
2	98	2
4	96	4
6	94	6

Сварку под флюсами проводили встык с двух сторон на образцах из листовой стали 09Г2С размером 500×75 мм толщиной 16 мм. Процесс проводили проволокой Св-08ГА диаметром 4 мм. Использовали сварочный трактор АСАВ1250, режим работы: сила тока ($I_{\text{св}}$) 700 А; напряжение ($U_{\text{д}}$) 30 В; скорость сварки ($V_{\text{св}}$) 35 м/ч.

После сварки образцы исследовали на содержание общего кислорода, водорода в металле сварного шва, определяли ударную вязкость при положительных и отрицательных температурах (таблица).

Концентрация кислорода в металле сварного шва с повышением содержания углеродфторсодержащей

Ударная вязкость сварных образцов

Impact strength of welded samples

Образец	Ударная вязкость, Дж/см ²		Содержание кислорода общего и поверхностного, ppm	Содержание водорода, см ³ /100 г
	KCV +20 °C	KCV –20 °C		
0	43,3	17,16	759,5	2,0
2	46,4	24,33	456,0	1,8
4	51,4	25,00	402,5	1,4
6	59,2	31,83	236,5	1,3

добавки во флюсе уменьшается (рис. 1). При сварке под флюсом без добавки, по сравнению с пробами с 6 % углеродфторсодержащей добавки, массовая доля кислорода снижается в среднем с 759,5 до 236,5 ppm.

Фракционный газовый анализ выявил, что массовая доля кислорода в силикатах с повышением содержания добавки во флюсе изменилась при сварке под флюсом без добавки по сравнению с пробами с 6 % углеродфторсодержащей добавки в среднем с 628,25 до 155,1 ppm. В алюминатах, алюмосиликатах кальция, силикатах кальция и магниевых шпинелях значительных изменений не выявлено.

Распределение кислорода в силикатах, алюминатах, алюмосиликатах по-видимому связано с окисленностью полученного шлака и ассимиляцией неметаллических включений шлаком в зависимости от получаемой вязкости шлака.

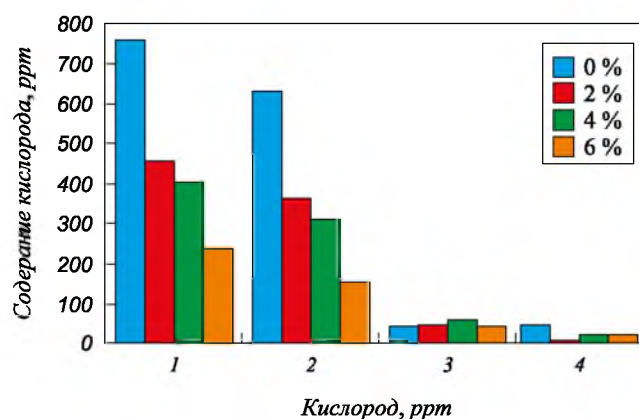


Рис. 1. Фракционный газовый анализ образцов, содержащих 0, 2, 4 и 6 % углеродфторсодержащей добавки и количество кислорода, ppm:

1 – общего и поверхностного; 2 – в силикатах; 3 – в алюминатах; 4 – в алюмосиликатах кальция, силикатах кальция, магниевых шпинелях

Fig. 1. Fractional gas analysis of the samples containing 0, 2, 4 and 6 % of carbon-fluoride additives and the amount of oxygen, ppm:

1 – general and superficial; 2 – in silicates; 3 – in alluminates; 4 – in aluminum-calcium silicates, in calcium silicates, and in magnesium spinels

Анализ механических свойств (ударной вязкости при положительных и отрицательных температурах) показал, что их уровень увеличивается с повышением количества углеродфторсодержащей добавки. При введении 6 % углеродфторсодержащей добавки во флюс ударная вязкость KCV при температуре -20°C повышается на 88 %, при температуре $+20^{\circ}\text{C}$ увеличивается на 37 %.

На рис. 2 приведены зависимости изменения количества общего кислорода и ударной вязкости при отрицательных и положительных температурах от количества введенной флюс-добавки.

На рис. 3 показаны зависимости ударной вязкости при отрицательных и положительных температурах от содержания общего кислорода в металле сварного шва.

При внесенных изменениях в данные по кислороду есть корреляция между ударной вязкостью и содержанием кислорода (рис. 3).

На рис. 4 приведены зависимости изменения количества водорода и ударной вязкости при отрицательных и положительных температурах от количества введенной флюс-добавки.

На рис. 5 показаны зависимости изменения ударной вязкости при отрицательных и положительных температурах от количества водорода в металле сварного шва.

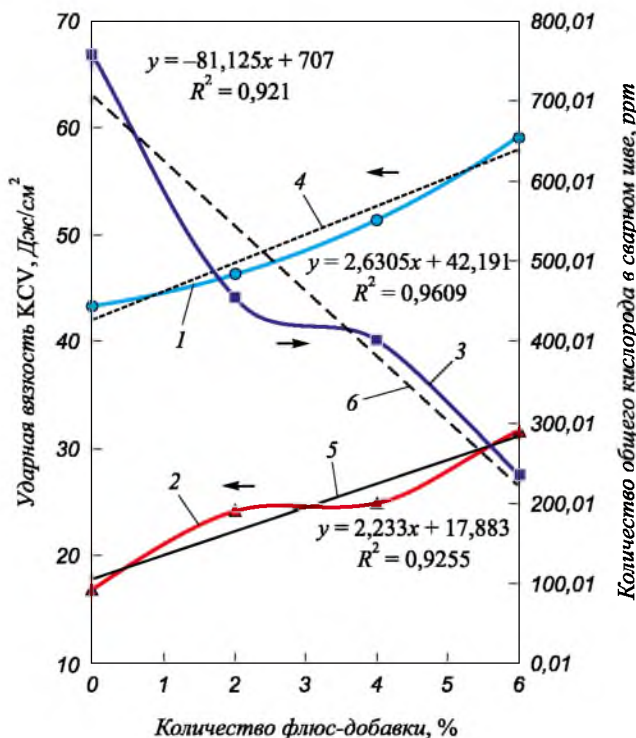


Рис. 2. Изменение ударной вязкости (KCV) при температуре $+20^{\circ}\text{C}$ (1) и -20°C (2) и количества общего кислорода в металле сварного шва (3) от количества флюс-добавки; 4, 5, 6 – линейные зависимости

Fig. 2. Change in impact strength (KCV) at $+20^{\circ}\text{C}$ (1) and -20°C (2) and total oxygen amount in weld metal (3) depending on the amount of flux additive; 4, 5, 6 – linear dependences

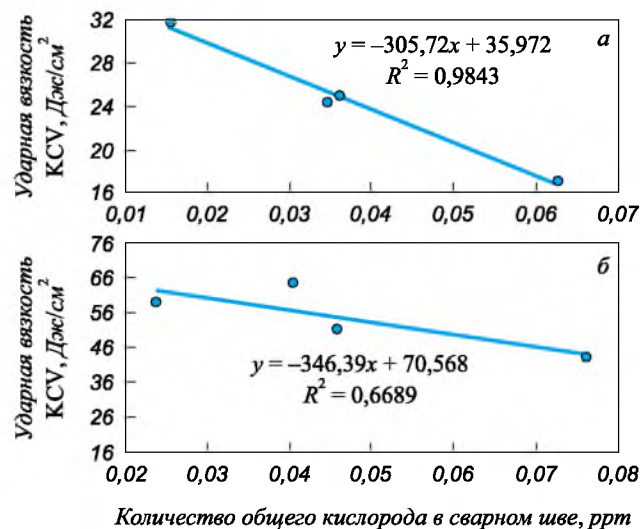


Рис. 3. Зависимость ударной вязкости при температуре -20°C (а) и $+20^{\circ}\text{C}$ (б) от количества общего кислорода в металле сварного шва

Fig. 3. Dependence of impact strength at temperature of -20°C (a) and $+20^{\circ}\text{C}$ (b) on total oxygen amount in weld metal

Проведенный анализ выявил, что содержание водорода в металле шва уменьшилось с $2,0\text{ см}^3/100\text{ г}$ металла до $1,3\text{ см}^3/100\text{ г}$ металла (сварка под флюсом без добавки и с 6 % углеродфторсодержащей добавки).

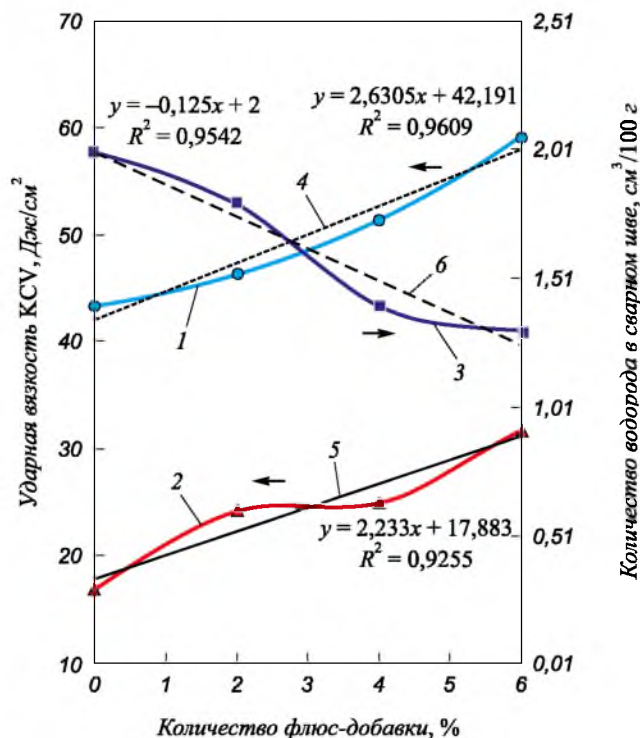


Рис. 4. Изменение ударной вязкости (KCV) при температуре $+20^{\circ}\text{C}$ (1) и -20°C (2) и количества водорода в металле сварного шва (3) от количества углеродфторсодержащей добавки; 4, 5, 6 – линейные зависимости

Fig. 4. Change in impact strength (KCV) at $+20^{\circ}\text{C}$ (1) and -20°C (2) and total hydrogen amount in weld metal (3) depending on the amount of flux additive; 4, 5, 6 – linear dependences

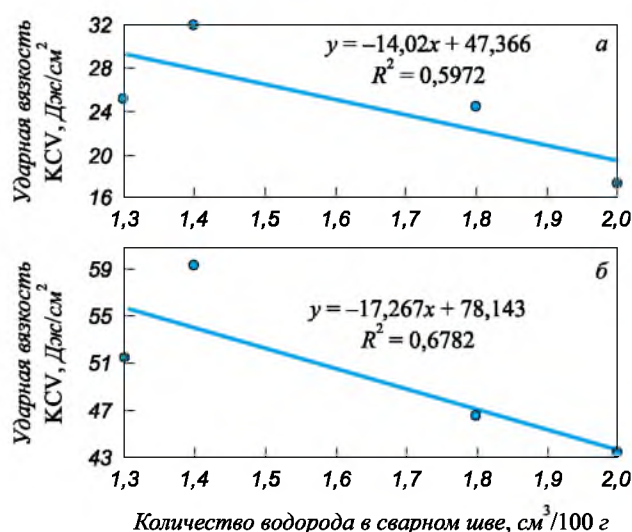


Рис. 5. Зависимость ударной вязкости при температуре $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (а) и $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (б) от количества водорода в металле сварного шва

Fig. 5. Dependence of impact strength at $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (a) and $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (b) on hydrogen amount of in weld metal

ВЫВОДЫ

При использовании углеродфторсодержащей флюс-добавки в сварочный флюс на основе шлака силико-марганца снижается количество кислорода и водорода в металле сварного шва, при этом возрастает ударная вязкость при положительных и отрицательных температурах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рыбин В.В., Калинин В.Т., Брусицын Ю.Д. и др. Высококачественные компоненты сварочных материалов из минерального сырья Кольского полуострова и горнопромышленных отходов. – В кн.: Научные основы химии и технологии переработки комплексного сырья и синтеза на его основе функциональных материалов. Матер. науч.-технич. конф. – Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН. 2008. Т. 1. С. 22 – 23.
2. Наумов С.В., Канина А.Е., Игнатова А.М., Игнатов М.Н. О фракционном составе сварочных флюсов // Научно-технический вестник Поволжья. 2012. № 2. С. 125 – 167.
3. Golovko V.V., Potapov N.N. Special features of agglomerated (ceramic) fluxes in welding // Welding International. 2011. Vol. 25. No. 11. P. 889 – 893.
4. Amado Cruz Crespo, Rafael Quintana Puchol, Lorenzo Perdomo González etc. Study of the relationship between the composition of a fused flux and its structure and properties // Welding International. 2009. Vol. 23. No. 2. P. 120 – 131.
5. Crespo A.C., Puchol R.Q., Gonzalez L.P. etc. Obtaining a submerged arc welding flux of the $\text{MnO-SiO}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-CaF}_2$ system by fusion // Welding International. 2007. Vol. 21. No. 7. P. 502 – 511.
6. Rafael Quintana Puchol, Jeily Rodríguez Blanco, Lorenzo Perdomo Gonzalez etc. The influence of the air occluded in the deposition

layer of flux during automatic welding: a technological aspect to consider in the quality of the bead // Welding International. 2009. Vol. 23. No. 2. P. 132 – 140.

7. Volobuev Yu.S., Volobuev O.S., Parkhomenko A.G. etc. Using a new general-purpose ceramic flux SFM-101 in welding of beams // Welding International. 2012. Vol. 26. No. 8. P. 649 – 653.
8. Potapov N.N., Kurlanov S.A. A criterion for evaluating the activity of fused welding fluxes // Welding International. 1987. Vol. 1. No. 10. P. 951 – 954.
9. Volobuev Yu.S., Surkov A.V., Volobuev O.S. etc. The development and properties of a new ceramic flux used for reconditioning rolling stock components // Welding International. 2010. Vol. 24. No. 4. P. 298 – 300.
10. Поволоцкий Д.Я., Рошин В.Е., Мальков Н.В. Электрометаллургия стали и ферросплавов. – М.: Металлургия, 1995. – 592 с.
11. Гасик М.И., Лякишев Н.П., Емлин Б.И. Теория и технология производства ферросплавов. – М.: Металлургия, 1988. – 784 с.
12. Сварочные материалы для дуговой сварки. Справочник. В 2-х т. Т. 1. Защитные газы и сварочные флюсы / Б.П. Конищев, С.А. Курланов, Н.Н. Потапов, и др.; под ред. Н.Н. Потапова. – М.: Машиностроение, 1989. – 544 с.
13. Подгаецкий В.В., Рабкин Д.М. Флюсы для автоматической и полуавтоматической сварки. – Киев: Изд-во АН УССР, 1954. – 56 с.
14. Bublik O.V., Chamov S.V. Advantages and shortcomings of ceramic (agglomerated) fluxes in comparison with fused fluxes used for the same applications // Welding International. 2010. Vol. 24. No. 9. P. 730 – 733.
15. Gur'ev S.V., Pletnev Yu.M., Murav'ev I.I. Investigation of the properties of welded joints produced by welding in a gas mixture and under a flux // Welding International. 2012. Vol. 26. No. 8. P. 646 – 648.
16. Parshin S.G. Using ultrafine particles of activating fluxes for increasing the productivity of MIG/MAG welding of steels // Welding International. 2012. Vol. 26. No. 10. P. 800 – 804.
17. Barmin L.N. Effect of the composition of flux and welding wire on the properties of deposited metal of 05N4MYu type // Welding International. 1989. Vol. 3. No. 2. P. 109 – 111.
18. Potapov N.N., Feklistov S.I., Volobuev Yu.S., Potekhin V.P. A method of selecting fused fluxes in welding pearlitic-ferritic steel // Welding International. 2009. Vol. 23. No. 10. P. 800 – 803.
19. Pavlov I.V., Oleinichenko K.A. Regulating generation of CO by varying the composition of ceramic fluxes // Welding International. 1995. Vol. 9. No. 4. P. 329 – 332.
20. Толстов И.А., Коротков В.А. Справочник по наплавке. – Челябинск: Металлургия, 1990. – 384 с.
21. Поволоцкий Д.Я., Рошин В.Е., Мальков Н.В. Электрометаллургия стали и ферросплавов. – М.: Металлургия, 1995. – 592 с.
22. Козырев Н.А., Крюков Р.Е., Крюков Н.Е. и др. Углеродсодержащие флюс-добавки для сварочных флюсов // Сварочное производство. 2016. № 5. С. 9 – 14.
23. Козырев Н.А., Крюков Р.Е., Крюков Н.Е. и др. Разработка новых сварочных флюсов и флюс-добавок для сварки и наплавки стали с использованием отходов металлургического производства. Сообщение 1. Углеродсодержащие добавки для сварочных флюсов // Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация». 2017. Вып. 4 (1408). С. 86 – 89.

Поступила в редакцию 15 мая 2019 г.

После доработки 17 июня 2019 г.

Принята к публикации 20 июня 2019 г.

INFLUENCE OF INTRODUCTION OF CARBON AND FLUORINE ADDITIVES TO FLUXES MADE OF SILICOMARGANESE SLAG

R.E. Kryukov, N.A. Kozyrev, A.R. Mikhno, L.P. Bashchenko,
A.N. Kalinogorskii

Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Kemerovo Re-
gion, Russia

Abstract. The authors have carried out the investigations of fluxing agent containing silicomanganese slag with a flux additive based on gas treatment dust of aluminum production. Influence of carbon-fluorine-containing additive introduction on total oxygen and hydrogen content in weld metal has been studied, as well as its influence on impact strength at positive and negative temperatures. For fluxing agent manufacture, silicomanganese slag was used as a base, and aluminum production electrostatic precipitators dust was used as additive. Silicomanganese slag is produced by the West Siberian Electrometallurgical Plant; dust is from aluminum production electrostatic precipitators (carbon-fluorine-containing adding) of RUSAL Co. Samples were welded on ASAW-1250 welding tractor. Chemical composition of studied welded samples was investigated according to GOST 10543 – 98 by atomic emission method on DFS-71 spectrometer and by X-ray fluorescence method on XRF-1800 spectrometer. Fractional gas analysis was performed using LECO TS-600 analyzer. Welded samples were tested for impact strength at positive and negative temperatures using impact pendulum-type testing machine according to GOST 9454 – 78. When using a carbon-fluorine-containing flux additive in welding flux based on silicomanganese slag, amount of oxygen and hydrogen in weld metal decreases, while impact strength increases at positive and negative temperatures. Dependences of the amount of oxygen and hydrogen in weld metal and impact strength on the amount of introduced carbon-fluorine-containing flux additive were constructed.

Keywords: welding, welding flux, industrial waste, silicomanganese slag, gas treatment dust, impact strength, total oxygen, hydrogen.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-1-34-39

REFERENCES

1. Rybin V.V., Kalinnikov V.T., Brusnitsyn Yu.D. etc. High-quality components of welding materials from minerals of the Kola Peninsula and mining waste. In: *Nauchnye osnovy khimii i tekhnologii pererabotki kompleksnogo syr'ya i sinteza na ego osnove funktsional'nykh materialov. Materialy nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Fundamentals of chemistry and technology of complex raw materials processing and synthesis of functional materials on their base. Materials of sci. and tech. conf.]. Apatity: Izd-vo Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN, 2008, vol. 1, pp. 22–23. (In Russ.).
2. Naumov S.V., Kanina A.E., Ignatova A.M., Ignatov M.N. On fractional composition of welding fluxes. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ya*. 2012, no. 2, pp. 125–167. (In Russ.).
3. Golovko V.V., Potapov N.N. Special features of agglomerated (ceramic) fluxes in welding. *Welding International*. 2011, vol. 25, no. 11, pp. 889–893.
4. Amado Cruz Crespo, Rafael Quintana Puchol, Lorenzo Perdomo González, Carlos R. Gómez Pérez, Gilma Castellanos, Eduardo Díaz Cedréa, Tamara Ortiz. Study of the relationship between the composition of a fused flux and its structure and properties. *Welding International*. 2009, vol. 23, no. 2, pp. 120–131.
5. Crespo A.C., Puchol R.Q., Gonzalez L.P., Sanchez L.G., Gomez Perez C.R., Cedre E.D., Mendez T.O., Pozol J.A. Obtaining a submerged arc welding flux of the $MnO-SiO_2-CaO-Al_2O_3-CaF_2$ system by fusion. *Welding International*. 2007, vol. 21, no. 7, pp. 502–511.
6. Rafael Quintana Puchol, Jeily Rodríguez Blanco, Lorenzo Perdomo Gonzalez, Gilma Castellanos Hernández, Carlos Rene Gómez Pérez. The influence of the air occluded in the deposition layer of flux during automatic welding: a technological aspect to consider in the quality of the bead. *Welding International*. 2009, vol. 23, no. 2, pp. 132–140.
7. Volobuev Yu.S., Volobuev O.S., Parkhomenko A.G., Dobrozhe-la E.I., Klimenchuk O.S. Using a new general-purpose ceramic flux SFM-101 in welding of beams. *Welding International*. 2012, vol. 26, no. 8, pp. 649–653.
8. Potapov N.N., Kurlanov S.A. A criterion for evaluating the activity of fused welding fluxes. *Welding International*. 1987, vol. 1, no. 10, pp. 951–954.
9. Volobuev Yu.S., Surkov A.V., Volobuev O.S., Kipiani P.N., Shes-tov D.V., Pavlov N.V., Savchenko A.I. The development and proper-ties of a new ceramic flux used for reconditioning rolling stock com-ponents. *Welding International*. 2010, vol. 24, no. 4, pp. 298–300.
10. Povolotskii D.Ya., Roshchin V.E., Mal'kov N.V. *Elektrometallur-giya stali i ferrosplavov* [Electrometallurgy of steel and ferroalloys]. Moscow: Metallurgiya, 1995, 592 p. (In Russ.).
11. Gasik M.I., Lyakishev N.P., Emlin B.I. *Teoriya i tekhnologiya proiz-vodstva ferrosplavov* [Theory and technology of ferroalloys produc-tion]. Moscow: Metallurgiya, 1988, 784 p. (In Russ.).
12. Konishchev B.P., Kurlanov S.A., Potapov N.N. etc. *Svarochnye materialy dlya dugovoi svarki. Spravochnik. V 2 t. T. 1. Zashchitnye gazy i svarochnye flyusy* [Welding materials for arc welding. Reference book. In 2 vols. Vol. 1. Shielding gases and welding fluxes]. Potapov N.N. ed. Moscow: Mashinostroenie, 1989, 544 p. (In Russ.).
13. Podgaetskii V.V., Rabkin D.M. *Flyusy dlya avtomaticheskoi i polu-avtomaticheskoi svarki* [Fluxes for automatic and semi-automatic welding]. Kiev: Izd-vo AN USSR, 1954, 56 p. (In Russ.).
14. Bublik O.V., Chamov S.V. Advantages and shortcomings of cera-mic (agglomerated) fluxes in comparison with fused fluxes used for the same applications. *Welding International*. 2010, vol. 24, no. 9, pp. 730–733.
15. Gur'ev S.V., Pletnev Yu.M., Murav'ev I.I. Investigation of the prop-erties of welded joints produced by welding in a gas mixture and under a flux. *Welding International*. 2012, vol. 26, no. 8, pp. 646–648.
16. Parshin S.G. Using ultrafine particles of activating fluxes for in-creasing the productivity of MIG/MAG welding of steels. *Welding International*. 2012, vol. 26, no. 10, pp. 800–804.
17. Barmin L.N. Effect of the composition of flux and welding wire on the properties of deposited metal of 05N4MYu type. *Welding Inter-national*. 1989, vol. 3, no. 2, pp. 109–111.
18. Potapov N.N., Feklistov S.I., Volobuev Yu.S., Potekhin V.P. A meth-od of selecting fused fluxes in welding pearlitic-ferritic steel. *Welding International*. 2009, vol. 23, no. 10, pp. 800–803.
19. Pavlov I.V., Oleinichenko K.A. Regulating generation of CO by varying the composition of ceramic fluxes. *Welding International*. 1995, vol. 9, no. 4, pp. 329–332.
20. Tolstov I.A., Korotkov V.A. *Spravochnik po naplavke* [Surfacing guide]. Chelyabinsk: Metallurgiya, 1990, 384 p. (In Russ.).
21. Povolotskii D.Ya., Roshchin V.E., Mal'kov N.V. *Elektrometallur-giya stali i ferrosplavov* [Electrometallurgy of steel and ferroalloys]. Moscow: Metallurgiya, 1995, 592 p. (In Russ.).
22. Kozyrev N.A., Kryukov R.E., Kryukov N.E., Koval'skii I.N., Bend-re Yu.V. Carbon flux additives for welding fluxes. *Svarochnoe proiz-vodstvo*. 2016, no. 5, pp. 9–14. (In Russ.).
23. Kozyrev N.A., Kryukov R.E., Kryukov N.E., Koval'skii I.N., Ko-zyreva O.E. Development of new welding fluxes and flux additives for welding and surfacing of steel using metallurgical production

waste. Report 1. Carbon-containing additives for welding fluxes. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 2017, vol. 4 (1408), pp. 86–89. (In Russ.).

Information about the authors:

R.E. Kryukov, *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Materials, Foundry and Welding Production"* (rek_nzrmk@mail.ru)

N.A. Kozyrev, *Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair "Materials, Foundry and Welding Production"* (kozyrev_na@mtsp.sibsiu.ru)

A.R. Mikhno, *MA Student of the Chair "Materials, Foundry and Welding Production"* (mikno-mm131@mail.ru)

L.P. Bashchenko, *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Thermal Power and Ecology"* (luda.baschenko@gmail.com)

A.N. Kalinogorskii, *Cand. Sci. (Eng.), Acting Head of the Chair of Ferrous Metallurgy* (mchmsis@mail.ru)

Received May 15, 2019

Revised June 17, 2019

Accepted June 20, 2019

IZVESTIYA

FERROUS METALLURGY

ON THE MOVEMENT OF BRIQUETTED MASS IN EXTRUDER. EXACT SOLUTIONS

TECHNOLOGICAL POSSIBILITIES OF USING NATURAL GAS IN SHAFT FURNACES FOR LIMESTONE ROASTING

ADDITIONAL SHEARING IMPACT ON THE EFFECTIVENESS OF MSR TECHNOLOGY IN CONDITIONS OF BILLET CCM

DYNAMICS OF ELECTROMAGNETIC FORCES REJECTING ARCS FROM VERTICALS IN A THREE-PHASE ARC FURNACE

INFLUENCE OF INTRODUCTION OF CARBON AND FLUORINE ADDITIVES TO FLUXES MADE OF SILICOMARGANESE SLAG

SURFACE TENSION AND DENSITY OF Fe–Mn MELTS

LIGHT NON-MAGNETIC STEELS BASED ON Fe – 25 Mn – 5 Ni – Al – C SYSTEM

DEPENDENCE OF CAST IRON CHILL FROM ITS CARBON EQUIVALENT

NITRIDING OF STEELS OF VARIOUS STRUCTURAL CLASSES MANUFACTURED BY LASER ADDITIVE TECHNOLOGIES

SIMULATION MODELING OF LOGISTIC SYSTEM FOR LIQUID IRON TRANSPORTATION AT METALLURGICAL PLANT

NEURAL NETWORK APPROACH TO FORECASTING THE COST OF FERROALLOY PRODUCTS

CHEMICAL REACTIONS AT REDUCTION OF IRON FROM OXIDES BY NATURAL GAS

TO THE 60TH ANNIVERSARY OF OLEG YUR'EVICH SHESHUKOV