

ИЗВЕСТИЯ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

Том 63 Номер 5 2020

• 1930-2020 •



СИБИРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ



ГОРДИМСЯ ПРОШЛЫМ • РАЗВИВАЕМСЯ В НАСТОЯЩЕМ • СОЗДАЕМ БУДУЩЕЕ



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

ИЗВЕСТИЯ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

№ 5, 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)

Заместитель ответственного секретаря: БАЩЕНКО Л.П.
(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)
КОСЫГЕВ К.Л. (АО «НПО «ЦНИИТМаш», г. Москва)
КУРГАНОВА Ю.А. (МГУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва)
КУРНОСОВ В.В. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
ЛПИНН Х. (ООО «Линн Хай Терм», Германия)
ЛЫСАК В.И. (Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград)
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)
ПОДГОРОДНИКОВ 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 С.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
Сибирским государственным индустриальным университетом

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 № ФС 77-35456

IZVESTIYA

VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA

IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY

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

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

Deputy Coordinating Editor: BASHCHENKO L.P.
(Siberian State Industrial University, Novokuznetsk)

Editorial Board:

N.P. ALESHIN (Russian Academy of Sciences, Moscow)
G.V. ASHIKHMIN (JSC "Institute
Tsnetmetobrabotka", 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 effici-
ency 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,
Sidney, Australia)

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. TEMLYANTSEV (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
Siberian State Industrial University

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@sisis.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

Протопопов Е.В. СибГИУ – 90! Гордимся прошлым, развиваемся в настоящем, создаем будущее! 291

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

- Протопопов Е.В., Числавлев В.В., Темлянтsev М.В., Головатенко А.В.** Повышение эффективности рафинирования рельсовой стали в промежуточных ковшах МНЛЗ на основе рациональной организации гидродинамических процессов 298
- Козырев Н.А., Шевченко Р.А., Усольцев А.А., Прудников А.Н., Башченко Л.П.** Разработка и моделирование технологического процесса сварки дифференцированно термоупрочненных железнодорожных рельсов. Промышленное опробование 305
- Фастыковский А.Р., Никитин А.Г., Белиев С.В., Добрянский А.В.** Особенности освоения технологии прокатки-разделения на действующем непрерывном мелкосортном стане 313
- Уманский А.А., Дорофеев В.В., Думова Л.В.** Разработка теоретических основ энергоэффективного производства железнодорожных рельсов с повышенными эксплуатационными свойствами 318
- Приходько О.Г., Деев В.Б., Прусов Е.С., Куценко А.И.** Влияние теплофизических характеристик сплава и материала литейной формы на скорость затвердевания отливок 327
- Аникин А.Е., Галевский Г.В., Руднева В.В.** Исследование технологических режимов эффективной металлизации оксидно-железосодержащих отходов металлургического производства ... 335

ЭКОЛОГИЯ И РАЦИОНАЛЬНОЕ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

Нохрина О.И., Рожихина И.Д., Едильбаев А.И., Едильбаев Б.А. Марганцевые руды Кемеровской области – Кузбасса и методы их обогащения 344

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Осколкова Т.Н., Симачев А.С.** Влияние импульсно-плазменного модифицирования титаном и бором поверхности твердого сплава VK10KS на его структуру и свойства 351
- Зоря И.В., Полегаев Г.М., Старостенков М.Д., Ракитин Р.Ю., Коханенко Д.В.** Влияние примесей легких элементов на процесс кристаллизации никеля в области тройного стыка границ зерен: молекулярно-динамическое моделирование 357

ИННОВАЦИИ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ ПРОМЫШЛЕННОМ И ЛАБОРАТОРНОМ ОБОРУДОВАНИИ, ТЕХНОЛОГИЯХ И МАТЕРИАЛАХ

Рыбенко И.А., Роос Х.-Г. Метод и инструментальная система для моделирования и оптимизации технологических режимов процессов прямого восстановления металлов в агрегате струйно-эмульсионного типа 364

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Зимин А.В., Золн И.А., Буркова И.В., Зимин В.В. Планирование развертывания сервисных активов, основанное на данных о применении ИТ-сервисов 373

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

ГлушакOVA О.В., Черникова О.П., Стрекалова С.А. Интегральная оценка эффективности реализации корпоративных стратегий предприятиями черной металлургии 379

ПОДГОТОВКА КАДРОВ ДЛЯ ОТРАСЛИ

Цымбал В.П., Буинцев В.Н., Кожемяченко В.И., Калашников С.Н., Сеченов П.А. Математическое моделирование в учебном процессе, исследованиях и малоэнергоемких металлургических технологиях 389

CONTENTS

E.V. Protopopov To the 90th Anniversary of Siberian State Industrial University 291

METALLURGICAL TECHNOLOGIES

- E.V. Protopopov, V.V. Chislavlev, M.V. Temlyantsev, A.V. Golovatenko** Increasing efficiency of rail steel refining in CCM tundish based on rational organization of hydrodynamic processes 298
- N.A. Kozyrev, R.A. Shevchenko, A.A. Usol'tsev, A.N. Prudnikov, L.P. Bashchenko** Welding of differentially heat-strengthened rails. Industrial testing 305
- A.R. Fastyskovskii, A.G. Nikitin, S.V. Belyaev, A.V. Dobryanskii** Features of the rolling-separation technology development on operating continuous small-grade mill 313
- A.A. Umanskii, V.V. Dorofeev, L.V. Dumova** Theoretical foundations for energy-efficient production of railway rails with improved performance properties 318
- O.G. Prikhod'ko, V.B. Deev, E.S. Prusov, A.I. Kutsenko** Influence of thermophysical characteristics of alloy and mold material on castings solidification rate 327
- A.E. Anikin, G.V. Galevskii, V.V. Rudneva** Technological modes of efficient metallization of iron-oxide-containing waste from metallurgical production 335

ECOLOGY AND RATIONAL USE OF NATURAL RESOURCES

O.I. Nokhrina, I.D. Rozhikhina, A.I. Edil'baev, B.A. Edil'baev Manganese ores of the Kemerovo Region – Kuzbass and methods of their enrichment 344

MATERIAL SCIENCE

- T.N. Oskolkova, A.S. Simachev** Influence of pulse-plasma modification of VK10KS solid alloy surface by titanium and boron on its structure and properties 351
- I.V. Zorya, G.M. Poletaev, M.D. Starostenkov, R.Yu. Rakitin, D.V. Kokhanenko** Effect of light elements impurity on process of nickel crystallization near the triple interface of grain boundaries: A molecular dynamics simulation 357

INNOVATIONS IN METALLURGICAL INDUSTRIAL AND LABORATORY EQUIPMENT, TECHNOLOGIES AND MATERIALS

I.A. Rybenko, Roos Hans-Georg Technological modes of metals direct reduction in an aggregate of jet-emulsion type 364

INFORMATION TECHNOLOGIES AND AUTOMATIC CONTROL IN FERROUS METALLURGY

A.V. Zimin, I.A. Zolin, I.V. Burkova, V.V. Zimin Planning service assets deployment based on information about dynamics of IT services use 373

ECONOMIC EFFICIENCY OF METALLURGICAL PRODUCTION

O.V. Glushakova, O.P. Chernikova, S.A. Strekalova Integral assessment of corporate strategies implementation efficiency of ferrous metallurgy enterprises 379

ПОДГОТОВКА КАДРОВ ДЛЯ ОТРАСЛИ

V.P. Tsybmal, V.N. Buintsev, V.I. Kozhemyachenko, S.N. Kalashnikov, P.A. Sechenov Mathematical modeling in education process, research and low-energy metallurgical technologies 389



*С.Ю. Балакирева,
начальник департамента
образования и науки
Кемеровской области*

От всей души поздравляю вас со знаменательной датой – 90-летним юбилеем со дня основания Сибирского государственного индустриального университета!

За это время Alma mater для десятков тысяч студентов несколько раз изменяла свое имя, но прочными, как высоколегированная сталь, надежными, как современная шахтовая крепь, всегда были и остаются ваши вузовские традиции. Я сейчас говорю и о строгом взвешенном отборе на этапе зачисления, и о высоких требованиях к знаниям студентов в процессе учебы. Выпускник СибГИУ – это без преувеличения бренд!

Заслугу преподавателей в этом вопросе невозможно переоценить. Огромное спасибо всем ветеранам-педагогам и тем, кто сейчас вкладывает душу, знания и опыт в подрастающих инженеров, экономистов, управленцев. Сейчас очень непростое время, а значит, появляется еще большая потребность в талантливых, неординарно мыслящих молодых профессионалах. Цифровизация, технологии XXI века, современные подходы к ведению и развитию крупных предприятий, средних и малых производств Кузбасса – задачи, которые предстоит решать сегодняшним студентам.

В этот особенный день желаю руководству и преподавательскому составу СибГИУ успехов в их труде, новых ярких побед, гордости за своих студентов! А молодым людям, которые выбрали или только планируют поступать в этот университет, желаю учиться с вдохновением, обрести глубокие знания и обязательно стать востребованными профессионалами! Здоровья, благополучия, огромного счастья и всего самого наилучшего!

С юбилеем!

составляют основу инженерного и руководящего корпуса предприятий горно-металлургического комплекса нашего города и Кузбасса.

Мы гордимся нашими выпускниками, которые в разные годы становились крупными государственными и политическими деятелями, руководителями отраслевых министерств, директорами комбинатов, заводов, научных учреждений, учеными, имеющими мировую известность.

В настоящее время СибГИУ представляет собой современный учебно-научный комплекс, расположенный в центре г. Новокузнецк, его площадь составляет 17,5 га, образовательный и научный процесс организован в помещениях общей площадью примерно 130 тыс. м². Комплекс включает 10 институтов: Институт металлургии и материаловедения; Институт машиностроения и транспорта; Институт горного дела и геосистем; Архитектурно-строительный институт; Институт информационных технологий и автоматизи-

рованных систем; Институт экономики и менеджмента; Институт педагогического образования; Институт дополнительного образования; Институт открытого образования; Институт физической культуры, здоровья и спорта; Университетский колледж. В структуре университета 34 учебно-научные лаборатории, 11 научно-образовательных центров, 2 научных центра, 4 научно-методических центра, 4 центра инновационного консалтинга, Центр сертификации, проектно-внедренческий центр инновационных технологий, Центр коллективного пользования «Материаловедение», Центр коллективного пользования «Прототипирование и аддитивные технологии», Студенческий бизнес-инкубатор, экспериментальная лаборатория автоматизированных энергогенерирующих технологий.

СибГИУ является стратегическим партнером Кузбасского технопарка – одного из самых крупных региональных технопарков в России. В 2019 году университет вошел в состав Научно-образовательного центра мирового уровня «Кузбасс», созданного на основе Постановления Правительства Российской Федерации от 30 апреля 2019 г. № 537 «О мерах государственной поддержки научно-образовательных центров мирового уровня на основе интеграции образовательных организаций высшего образования и научных организаций и их кооперации с организациями, действующими в реальном секторе экономики».

В университете функционирует 3 диссертационных совета по 9 научным специальностям: 01.04.07 – Физика конденсированного состояния; 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (металлургического производства); 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (в металлургии); 05.13.10 – Управление в социальных и экономических системах; 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ; 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов; 05.16.02 – Металлургия черных, цветных и редких металлов; 05.16.04 – Литейное производство; 05.16.05 – Обработка металлов давлением.

Реализацию фундаментальных и прикладных исследований осуществляет 14 научных школ:

- «Развитие теории и разработка ресурсо- и энерго-сберегающих технологий производства черных металлов с использованием техногенных отходов»,
- «Энерго- и ресурсосберегающие технологии нагрева и обработки давлением металлов и сплавов»,
- «Прочность и пластичность материалов в условиях внешних энергетических воздействий»,
- «Создание интенсивных нетрадиционных информационно-материальных технологий добычи и переработки минерального сырья»,
- «Теория структуры механических систем и практика ее использования при синтезе сложных машин, включая горные и металлургические»,

УДК 625.143.48

РАЗРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СВАРКИ ДИФФЕРЕНЦИРОВАННО ТЕРМОУПРОЧНЕННЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ. ПРОМЫШЛЕННОЕ ОПРОБОВАНИЕ*

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

Шевченко Р.А., ассистент кафедры материаловедения, литейного и сварочного производства (shefn1200@mail.ru)

Усольцев А.А., к.т.н., доцент кафедры материаловедения, литейного и сварочного производства (a.us_@rambler.ru)

Прудников А.Н., д.т.н., профессор кафедры материаловедения, литейного и сварочного производства (a.prudnikov@mail.ru)

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

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

Аннотация. Исследованы процессы сварки с последующим управляемым охлаждением полнопрофильных рельсовых стыков, проводимым путем пропускания импульсов переменного электрического тока после сварки. Изучено влияние режимов сварки на качественные показатели сварного стыка. Сварку проводили на машине для контактной стыковой сварки MCP-6301 в условиях рельсосварочного предприятия ООО «РСП-М» (РСП-29). Для исследования вырезали образцы полнопрофильных рельсов типа Р65 категории ДТ350 длиной 600 мм. Управление режимами изотермической выдержки после сварки осуществляли с помощью персонального компьютера с изменением программы промышленного контроллера SIMATIC S7-300 и программного обеспечения Simatic Step 7, позволяющего задавать режимы управляемого охлаждения. Управляющая программа написана на графическом языке LAD. Для поиска оптимальных режимов управляемого охлаждения проведен полный факторный эксперимент $N = 2^k$. Испытаны нетермообработанные стыки на трехточечный статический изгиб согласно СТО РЖД 1.08.002 – 2009 «Рельсы железнодорожные, сваренные электроконтактным способом». Испытания на статический изгиб проводили на прессе типа ПМС-320. Определены значения усилия, возникающего при изгибе $P_{изг}$, и величина стрелы прогиба $f_{пр}$, при которых происходит разрушение контрольного образца или максимальные значения этих показателей, если образец не разрушился во время испытаний. В ходе экспериментов получены регрессионные модели для выходных параметров усилия при изгибе и стрелы прогиба. Изучена макроструктура образцов и распределение твердости металла на поверхности катания сварного стыка рельсов. Разработан новый способ контактной стыковой сварки, который позволяет получать сварное соединение рельсов типа Р65 категории ДТ350 со свойствами, превосходящими технические требования СТО РЖД 1.08.002 – 2009.

Ключевые слова: рельсы, контактная сварка, термическая обработка, ток, импульс, режим сварки, твердость, зона термического влияния.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-5-305-312

ВВЕДЕНИЕ

Технологии, обеспечивающие получение бесстыкового железнодорожного пути высокого качества, находят широкое распространение в мире [1 – 9]. При этом в зависимости от химического состава стали выбирается технологический процесс сварки, который определяет линейную величину и температурные поля в зоне термического влияния (ЗТВ) сварного стыка [10 – 14]. Выбор теплового режима основан на исключении про-

цессов образования структур закалки (мартенсита и бейнита), которые вызывают дополнительные напряжения и трещины, приводящие к разрушению рельсов [15]. В связи с этим особое значение приобретает разработка способов сварки для железнодорожных рельсов высокоскоростных магистралей, изготовленных из хромистой стали.

В работе [16] проведено исследование процесса контактной стыковой сварки оплавлением рельсов на оборудовании компании Schlatter, стационарной рельсосварочной машине GAA 100. Процесс контактной стыковой сварки разделяют на три этапа: первый этап – разогрев свариваемых поверхностей; второй этап – фактическая сварка; третий этап – охлаждение сварного соединения. Первый этап в свою очередь делят еще

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

на три части: 1 – «намеренное оплавление»; 2 – «предварительное нагревание»; 3 – «оплавление». Этап предварительного нагревания является осадкой под током. Во время третьего этапа после сварки применяется термообработка подобно предварительному подогреву для снижения скорости охлаждения после сварки: проводят пропускание электрического тока через сварной стык несколькими импульсами. Из термических циклов, рассмотренных в настоящей работе, ясно, что импульсы тока предназначены лишь для снижения скорости охлаждения. Это необходимо для того, чтобы избежать образования закалочных структур в металле сварного соединения.

Исследователи [17] предлагают использовать совмещенные непрерывный и пульсирующий методы оплавления: изменением интенсивности нагрева при сварке регулируется скорость охлаждения сварного соединения, но при этом снижается полезная мощность, генерируемая в контакте между оплавливаемыми рельсами [18].

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

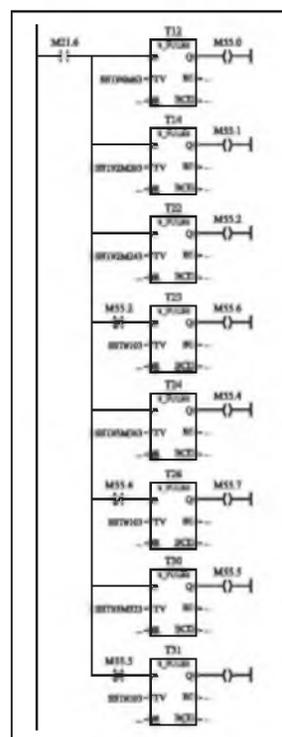
Целью настоящей работы является изучение влияния режимов сварки с последующим управляемым охлаждением полнопрофильных рельсовых стыков, проводимого путем пропускания импульсов переменного электрического тока после сварки, на качественные показатели сварного стыка. Сварку проводили на машине для контактной стыковой сварки МСР-6301 в условиях рельсосварочного предприятия ООО «РСП-М» (РСП-29). Для исследования вырезали образцы полнопрофильных рельсов типа Р65 категории ДТ350 длиной 600 мм.

Управление режимами изотермической выдержки после сварки осуществляли с помощью персонального компьютера с изменением программы промышленного контроллера SIMATIC S7-300. С помощью программного обеспечения Simatic Step 7 написана программа, позволяющая задавать режимы управляемого охлаждения. Управляющая программа написана на графическом языке LAD. Для задания необходимых временных параметров были использованы таймеры (рис. 1). Для включения сварочного трансформатора использовали триггер M50.0, к которому на входы S и R подключены последовательно и параллельно контакты, включающиеся по таймерам (рис. 1, б). Нормально разомкнутый контакт M21.6 включает таймер T13 в момент окончания осадки. Таймер T13 задает суммарное время цикла управляемого охлаждения, при включенном таймере T13 реле M55.0 замыкает контакты M55.0. Таймер T14 задает время выдержки после осадки и размыкает нормально замкнутые контакты M55.1 посредством включения реле M55.1. После отключения таймера T14 сигнал проходит на триггер M50.0 до момента окончания работы таймера T22, который включе-

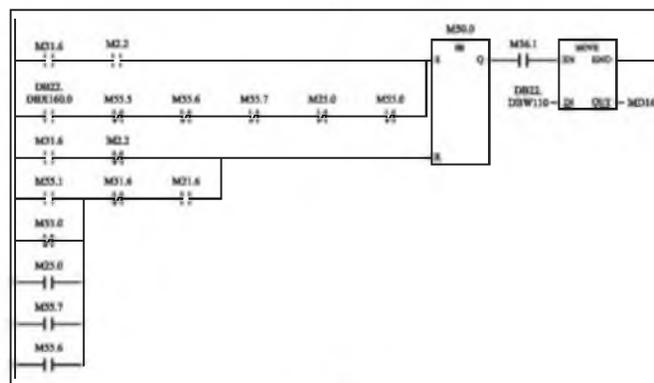
нием реле M55.3 размыкает контакт M55.3. Этот контакт M55.3 запускает таймер T23, который задает время паузы между включениями сварочного трансформатора и т.д.

Таким образом, добавляется необходимое количество таймеров в соответствии с количеством импульсов пропускаемого электрического тока через сварной стык. Для включения и отключения режима управляемого охлаждения используется нормально разомкнутый контакт DB22.DBX160.0.

Этапы технологического процесса построены из участков оплавления, в которых устанавливаются основные режимы регулирования. Каждый участок определяет величину оплавления S , в котором устанавливается напряжение U , скорости V_0 , V_H (вперед, назад)



а



б

Рис. 1. Фрагмент программы, отвечающий за управляемое охлаждение

Fig. 1. A fragment of the program responsible for controlled cooling

Режимы сварки рельсов Р65

Table 1. Modes of P65 rails welding

Участок	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
S , мм	2,0	4,0	3,0	2,5	2,5	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5
U , %	75	70	55	60	60	65	70	88	88	98
$V_{н}$, мм/с	0,6	1,3	0,8	1,0	1,1	1,2	0,7	0,9	1,1	1,2
$V_{н2}$, мм/с	0,5	0,6	0,5	0,5	0,4	0,4	0,5	0,4	0,3	0,2
$I_{кор}$, А	200	300	200	200	250	250	250	300	400	500
$I_{ост}$, А	300	450	350	350	400	400	460	500	600	700
$I_{рев}$, А	400	500	400	400	450	450	550	600	700	800
$I_{из}$, А	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200

Примечание. $S_{ос} = 14$ мм – путь осадки; $V_{ос} = 100$ мм/с – скорость осадки; $S_2 = 6$ мм – путь осадки под током.

и границы токов управления $I_{кор}$, $I_{ост}$, $I_{рев}$ [19]. Режимы, по которым проводили сварку рельсов, приведены в табл. 1.

Для поиска оптимальных режимов управляемого охлаждения в первой серии экспериментов проведен полный факторный эксперимент $N = 2^k$.

Матрица планирования экспериментов $N = 2^k$ при $X_4 = 4$ (для уменьшения количества опытов на всех режимах изотермической выдержки) приведена ниже:

Образец	Значения факторов		
	X_1 , с	X_2 , с	X_3 , с
1	60	2	30
2	160	2	30
3	60	6	30
4	160	6	30
5	60	2	15
6	160	2	15
7	60	6	15
8	160	6	15

Сварку образца 0 проводили без изотермической выдержки.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 показан общий вид сваренных рельсовых стыков.

На рис. 3 представлена осциллограмма процесса сварки образца 1.

В дальнейшем испытывали нетермообработанные стыки на трехточечный статический изгиб согласно СТО РЖД 1.08.002 – 2009 «Рельсы железнодорожные, сваренные электроконтактным способом». Испытания на

статический изгиб проводили на прессе типа ПМС-320. Контрольные образцы испытывали после сварки и удаления грата без дополнительной обработки стыков. При испытаниях на статический поперечный изгиб длина контрольного образца со сварным стыком по середине составляла не менее 1200 мм. Нагрузку прикладывали в середине пролета контрольного образца в месте сварного стыка с расстоянием между опорами 1 м. Испытания контрольного образца проводили с приложением нагрузки на головку. Результатами испытания являются значения усилия, возникающего при изгибе $P_{изг}$, кН, и значения стрелы прогиба $f_{пр}$, мм, при которых происходит разрушение контрольного образца или максимальные значения данных показателей, если образец не разрушился во время испытаний. На рис. 4 показано сравнение образца 3 с образцом без импульсной обработки. Результаты испытаний на статический трехточечный изгиб приведены ниже:



Рис. 2. Общий вид полнопрофильных образцов после сварки

Fig. 2. General view of full-profile samples after welding

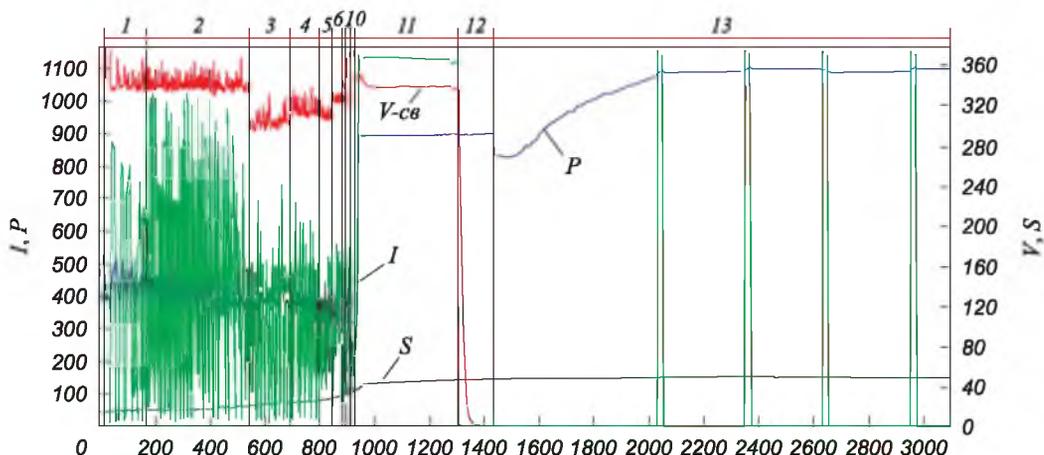


Рис. 3. Осциллограмма сварки образца 1

Fig. 3. Oscillogram of sample 1 welding

Образец	$P_{изг}$, кН	$f_{пр}$, мм
0	2179	24,4
1	2002	17,4
2	1882	17,9
3	2364	35,4
4	1970	20,1
5	2107	23,4
6	1616	11
7	2059	20,9
8	2244	31,2
Требования СТО РЖД 1.08.002-2009	2000	27

Экспериментальные значения показателей образца 3 ($P_{изг} = 2364$ кН, $f_{пр} = 35,4$ мм) и образца 8 ($P_{изг} = 2244$ кН, $f_{пр} = 31,2$ мм) выше требований СТО РЖД 1.08.002 – 2009 ($P_{изг} = 2000$ кН, $f_{пр} = 27$ мм).

В ходе экспериментов были получены регрессионные модели для выходных параметров усилия при изгибе и стрелы прогиба. В табл. 2 и 3 представлен анализ адекватности полученных моделей:

$$P_{изг} = 1926,5 - 2,05X_1 + 64,38X_2 + 3,2X_3, R^2 = 0,61;$$

$$f_{пр} = 15,72 - 0,04X_1 + 2,37X_2 + 0,07X_3, R^2 = 0,51.$$

Формирование благоприятных механических свойств сварного соединения произошло в некоторой степени из-за замедления скорости охлаждения в связи с реализацией режимов изотермической выдержки (рис. 5).

Для подтверждения результатов проведена вторая серия экспериментов, где повторно проведена сварка при режиме с наилучшими результатами испытаний, а также выбран режим управляемого охлаждения с более низкой температурой начала подогрева. Режимы

и результаты повторной серии экспериментов приведены в табл. 4.

Результаты второй серии экспериментов подтвердили воспроизводимость параллельных опытов. Снижение температуры начала подогрева (то есть увеличение параметра X_1) привело к улучшению механических свойств сварного стыка рельсов.

Изучение макроструктуры проводили на двух продольных макротемплетах сварных стыков, один из которых получен по базовой технологии, используемой в настоящее время на рельсосварочных предприятиях РФ (образец А), а второй – по предлагаемому способу (образец Б). Термообработку сварного стыка А проводили стационарным индукционным нагревательным комплексом для термообработки сварных рельсовых стыков УИН 001 – 100/РТ-С по режимам, используемым в настоящее время на предприятиях ООО «РСП-М». Режим индукционной термообработки с подстуживанием головки рельса приведен на рис. 6. В качестве образ-

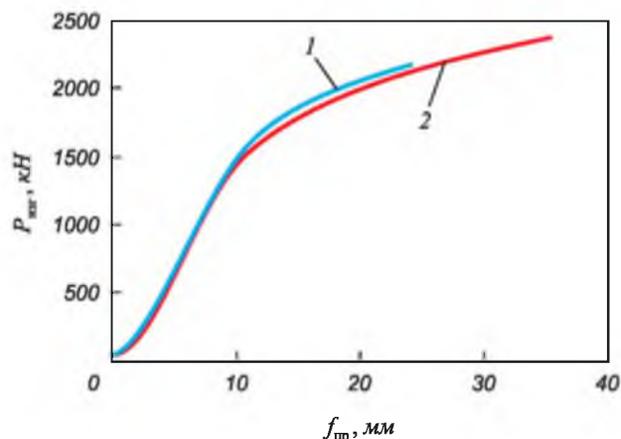


Рис. 4. Результаты испытаний на статический трехточечный изгиб: 1 – образец 0; 2 – образец 3

Fig. 4. Results of static three-point bending test: 1 – sample 0; 2 – sample 3

Анализ адекватности регрессионной модели влияния параметров импульсного контактного послесварочного подогрева на усилие при трехточечном изгибе

Table 2. Adequacy analysis of the regression model of influence of pulsed contact post-welding heating on the force at three-point bending

Показатель	Значение показателя		
	b_1	b_2	b_3
Коэффициент регрессии			
Значение коэффициента регрессии	-2,05	64,38	3,20
Критерий Стьюдента (t_{ϕ})	1,55	1,94	0,36
Табличное значение критерия Стьюдента ($t_{\text{табл}}$)	2,776		
Стандартная ошибка коэффициента регрессии (Sb_{ϕ})	1,33	33,14	8,84
Остаточная дисперсия (S_e^2)	31,76		
Остаточное стандартное отклонение (S_e)	5,63		
Средний квадрат отклонений модели от среднего (S_r^2)	288,06		
Критерий значимости регрессии (критерий Фишера F_{ϕ})	9,08		
Табличное значение критерия Фишера ($F_{\text{табл}}$)	6,59		

Анализ адекватности регрессионной модели влияния параметров импульсного контактного послесварочного подогрева на значения стрелы прогиба при трехточечном изгибе

Table 3. Adequacy analysis of the regression model of influence of pulsed contact post-welding heating on the values of bend deflection at three-point bending

Показатель	Значение показателя		
	b_1	b_2	b_3
Коэффициент регрессии			
Значение коэффициента регрессии	-0,04	2,37	0,07
Критерий Стьюдента (t_{ϕ})	0,82	1,84	0,21
Табличное значение критерия Стьюдента ($t_{\text{табл}}$)	2,776		
Стандартная ошибка коэффициента регрессии (Sb_{ϕ})	0,05	1,29	0,34
Остаточная дисперсия (S_e^2)	51 072,44		
Остаточное стандартное отклонение (S_e)	225,99		
Средний квадрат отклонений модели от среднего (S_r^2)	564 694		
Критерий значимости регрессии (критерий Фишера F_{ϕ})	11,06		
Табличное значение критерия Фишера ($F_{\text{табл}}$)	6,59		

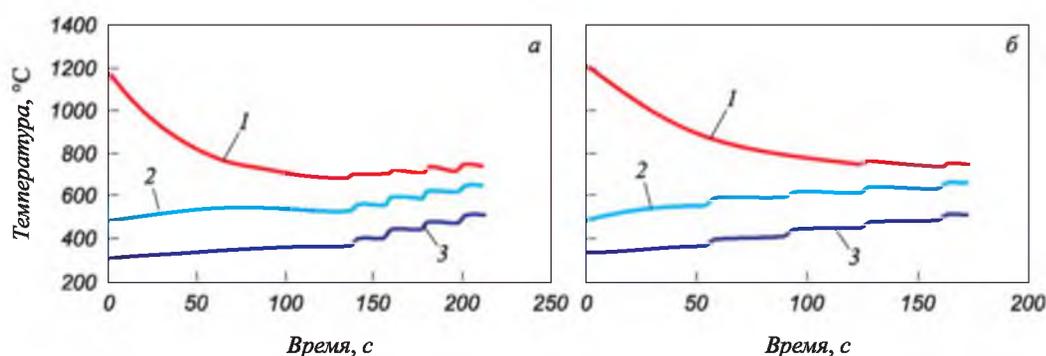


Рис. 5. График охлаждения после сварки образцов 3 (а) и 8 (б):
1 – центр шва; 2 – 20 мм от центра шва; 3 – 28 мм от центра шва

Fig. 5. Graph of cooling after welding of samples 3 (a) and 8 (b):
1 – center of the weld; 2 – 20 mm from the weld center; 3 – 28 mm from the weld center

Таблица 4

Результаты второй серии экспериментов

Table 4. Results of the second series of experiments

Образец	Значения факторов			Результаты испытаний на статический изгиб	
	X_1, c	X_2, c	X_3, c	$P_{изг}, кН$	$f_{пр}, мм$
10 (3)*	60	6	30	2276	34,2
11	200	4	10	2493	40,2

Примечание. Для уменьшения количества опытов на всех режимах изотермической выдержки $X_4 = 4$.

* за скобками указан порядковый номер образца, в скобках – номер повторяемого.

ца Б использовали образец с наилучшими показателями при испытаниях на статический изгиб (образец 11).

При изучении макроструктуры металла сварного соединения, полученного по базовой технологии, по обе стороны от шва наблюдается темнотравящаяся неравномерная зона термического влияния, полученная после термической обработки. Линейные размеры этой зоны (в одну сторону от шва): в головке – 51 мм, в шейке – от 45 до 62 мм, в подошве – 64 мм. Флокены в металле не выявлены.

На продольном макротемплете образца Б наблюдается равномерная зона термического влияния, полученная после сварки. На всем протяжении стыка зона термического влияния имеет ширину, равную (в одну

сторону от шва) 22 мм. Флокены в металле не выявлены.

Твердость металла сварного шва и зон термического влияния на поверхности катания головки сварного стыка А находится в пределах от 265 НВ до 318 НВ. Твердость металла сварного шва и зон термического влияния на поверхности катания головки стыка Б находится в пределах от 292 НВ до 355 НВ. Распределение твердости металла на поверхности катания сварного стыка рельсов показано на рис. 7. Твердость основного металла на поверхности катания головки составляет 348 – 354 НВ.

Снижение твердости металла головки в зоне термической обработки сварного стыка А относительно нижней границы твердости основного металла рельса достигает 24,5 %, а протяженность зоны с пониженной твердостью составляет 42 мм. Снижение твердости в зоне термического влияния сварного стыка Б достигает 14,8 %, при этом протяженность зон с пониженной твердостью составляет 14 мм.

Проведенные эксперименты позволили разработать новый способ контактной стыковой сварки [20], который позволяет получать сварное соединение рельсов типа Р65 категории ДТ350 со свойствами, превосходящими технические требования СТО РЖД 1.08.002 – 2009.

Выводы

Экспериментально подтверждено положительное влияние кратковременного воздействия электрического тока во время охлаждения рельсового стыка после сварки на статический трехточечный изгиб без термической обработки по СТО РЖД 1.08.002 – 2009 рельсов типа Р65 категории ДТ350. Проведение изотермической выдержки путем пропускания четырех кратковременных импульсов (длительностью 10 с) переменного электрического тока через сварное соединение в момент охлаждения после сварки (через 200 с после осадки) позволяет улучшить показатели статического трехточечного

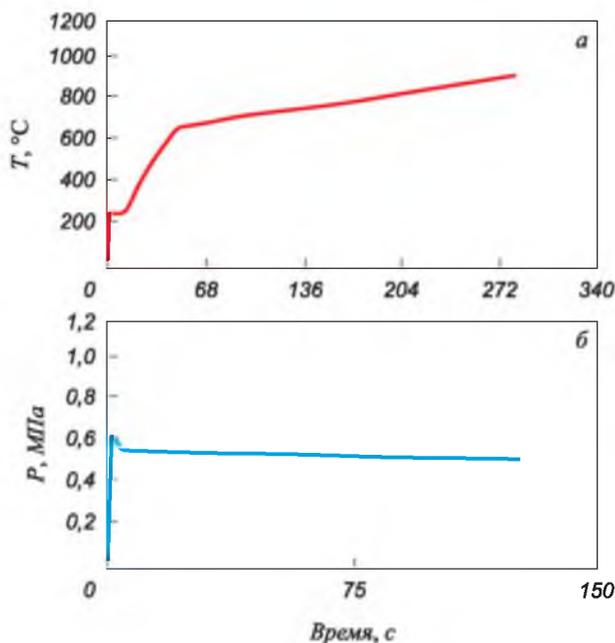


Рис. 6. Режимы термической обработки сварного стыка А: а – режим нагрева, б – режим закалки (охлаждение сжатым воздухом)

Fig. 6. Modes of heat treatment of the welded joint A: а – heating mode, б – quenching mode (cooling with compressed air)

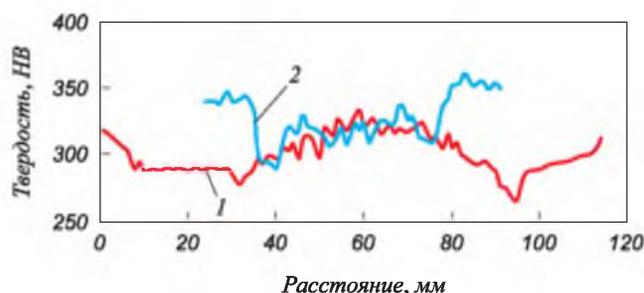


Рис. 7. Распределение твердости металла на поверхности катания сварного стыка рельсов в поперечном направлении сварному соединению, изготовленному по стандартной технологии (1) и по предлагаемому способу (2)

Fig. 7. Distribution of metal hardness on rolling surface of the welded joint of the rails transverse to a welded joint made according to standard technology (1) and to the proposed method (2)

изгиба: усилие изгиба $P_{изг}$ на 25 %, стрелу прогиба $f_{пр}$ на 49 %.

Разработан новый способ контактной стыковой сварки рельсов и проведено его промышленное опробование в структурном подразделении предприятия (СТП) ООО «РСП-М» (РСП-29).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Meade B. Railroad welding demands specialized processes // Welding Journal. 1997. Vol. 76. No. 9. P. 47 – 52.
2. Kargin V.A., Tikhomirova L.B., Abramov A.D., Galai M.S. Effect of vibroimpact treatment on the physical and mechanical properties of the surface layer of welded joints in rails // Welding International. 2014. Vol. 28. No. 3. P. 245 – 247.
3. Yamamoto R., Komizu Y., Fukada Y. Experimental examination for understanding of transition behaviour of oxide inclusions on gas pressure weld interface: joining phenomena of gas pressure welding // Welding International. 2014. Vol. 28. No. 7. P. 510 – 520.
4. Karimine K., Uchino K., Okamura M. Susceptibility to and occurrence of HAZ liquation cracking in rail steels: Study of rail welding with high-C welding materials (4th Report) // Welding International. 1997. Vol. 11. No. 6. P. 452 – 461.
5. Kuchuk-Yatsenko S.I., Shvets Yu.V., Didkovskii A.V., Chvertko P.N., Shvets V.I., Mikitin Ya.I. Technology and equipment for resistance flash welding of railway crossings with rail ends through an austenitic insert // Welding International. 2008. Vol. 22. No. 5. P. 338 – 341.
6. Irving B. Long Island Rail Road orders an all-welded fleet // Welding Journal. 1997. Vol. 22. No. 9. P. 33 – 37.
7. Клименко Л.В. Бесстыковой путь – прогрессивная конструкция железнодорожного пути // Приложение к журналу «Мир транспорта» МКЖТ МПС РФ. 2004. № 1. С. 88 – 93.
8. Калашников Е.А., Королев Ю.А. Технологии сварки рельсов: тенденции в России и за рубежом // Путь и путевое хозяйство. 2015. № 8. С. 2 – 6.
9. Sergejevs D., Mikhaylovs S. Analysis of factors affecting fractures of rails welded by alumino-thermic welding // Transport Problems. 2008. Vol. 3. P. 33 – 37.
10. Mitsuru F., Hiroaki N., Kiyoshi N. Rail flash-butt welding technology // JFE Technical Report. 2015. No. 20. P. 159 – 163.
11. Saita K., Karimine K., Ueda M., Iwano K., Yamamoto T., Hiroguchi K. Trends in rail welding technologies and our future approach // Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical Report. 2013. No. 105. P. 84 – 92.
12. Dahl B., Mogard B., Grefot B., Ulander B. Repair of rails on-site by welding // Svetsaren. 1995. Vol. 50. No. 2. P. 10 – 14.
13. Takimoto T. Latest welding technology for long rail and its reliability // Tetsu-to-Hagane. 1984. Vol. 70. No. 10. P. 40 – 45.
14. Tachikawa H., Uneta T., Nishimoto H. Steel welding technologies for civil construction applications // Nippon Steel Technical Report. 2000. Vol. 82. No. 7. P. 35 – 41.
15. Шур Е.А. Влияние структуры на эксплуатационную стойкость рельсов. – В кн.: Влияние свойств металлической матрицы на эксплуатационную стойкость рельсов. Материалы II Всерос. науч.-техн. семинара (Екатеринбург, 16-17 мая, 2006 г.). – Екатеринбург: изд. УИМ, 2006. С. 37 – 63.
16. Weingill L., Krutzler J., Enzinger N. Temperature field evolution during flash-butt welding of railway rails // Materials Science Forum. May 2016. Vol. 879. P. 2088 – 2093.
17. Шур Е.А., Резанов В.А. Комплексный метод контактной сварки рельсов // Вестник ВНИИЖТ. 2012. № 3. С. 20 – 22.
18. Гудков А.В., Николин А.И., Турбина Л.А., Насонов Д.С., Аверкина В.А. Контактная сварка рельсов и термическая обработка сварных стыков рельсов современного производства на рельсосварочных предприятиях ОАО «РЖД». – В кн.: Сварочные и наплавочные технологии на железнодорожном транспорте. Сб. науч. тр. ОАО «ВНИИЖТ» / Под ред. А.В. Гудкова. – М.: Интекст, 2008. С. 42 – 49.
19. Shevchenko R.A., Kozyrev N.A., Kryukov R.E., Patrushev A.O., Usoltsev A.A. Multi-factor regression analysis of the process of rails contact welding on K1000 machine // Metallurgy 2017. IOP Publishing IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 411. Article 012088.
20. Пат. 2641586 РФ. МПК В 23 К 11/04. Способ контактной стыковой сварки рельсов / Е.В. Протопопов, Н.А. Козырев, Р.А. Шевченко, Р.Е. Крюков, С.В. Фейлер, А.А. Усольцев; заявл. 07.12.2016; опубл. 18.01.18. Бюл. № 2.

Поступила в редакцию 24 декабря 2019 г.

После доработки 24 января 2020 г.

Принята к публикации 31 января 2020 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. VOL. 63. NO. 5, pp. 305–312.

WELDING OF DIFFERENTIALLY HEAT-STRENGTHENED RAILS. INDUSTRIAL TESTING

N.A. Kozyrev, R.A. Shevchenko, A.A. Usol'tsev, A.N. Prudnikov, L.P. Bashchenko

Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Kemerovo Region, Russia

Abstract. The article describes the study of welding processes with the subsequent control of cooling of full-profile rail joints, produced by passing alternating electric current pulses after welding. The influence of welding modes on the quality of welded joint was investigated. Welding was carried out on a resistance butt welding machine MCP-6301 in conditions of the rail welding company LLC “RSP-M” (RSP-29). For research, the samples of P65 type full-profile rails of DT350 category 600 mm long were cut out. The isothermal holding conditions after welding were controlled using a personal computer with a change in the program of the SIMATIC S7-300 industrial controller and the software SIMATIC STEP 7, which allows modes of controlled cooling to be set. The

control program was written in the LAD graphic language. To search for optimal modes of controlled cooling, a complete factor experiment $N = 2^k$ was carried out. Non-heat-treated joints were tested for three-point static bending according to the state standard STO RZD 1.08.002 – 2009 “Railway rails, welded by electric contact method”. Static bending tests were carried out on the press of PMS-320 type. Values of the force arising during bending $P_{бнд}$ and the bend deflection $f_{пр}$ at which the control sample is destroyed, were determined, as well as maximum values of these indicators if the sample was not destroyed during the tests. During the experiments, regression models were obtained for output parameters of the bending force and bend deflection. Macrostructure of the samples and distribution of the metal hardness on rolling surface of the rails welded joint were studied. A new method of resistance butt welding was developed, which makes it possible to obtain a welded connection of P65 type rails of DT350 category with properties that exceed the technical requirements of the mentioned state standard.

Keywords: rails, resistance welding, heat treatment, current, impulse, welding mode, hardness, heat affected zone.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-5-305-312

REFERENCES

1. Meade B. Railroad welding demands specialized processes. *Welding Journal*. 1997, vol. 76, no. 9, pp. 47–52.
2. Kargin V.A., Tikhomirova L.B., Abramov A.D., Galai M.S. Effect of vibroimpact treatment on the physical and mechanical properties of the surface layer of welded joints in rails. *Welding International*. 2014, vol. 28, no. 3, pp. 245–247.
3. Yamamoto R., Komizu Y., Fukada Y. Experimental examination for understanding of transition behaviour of oxide inclusions on gas pressure weld interface: joining phenomena of gas pressure welding. *Welding International*. 2014, vol. 28, no. 7, pp. 510–520.
4. Karimine K., Uchino K., Okamura M. Susceptibility to and occurrence of HAZ liquation cracking in rail steels: Study of rail welding with high-C welding materials (4th Report). *Welding International*. 1997, vol. 11, no. 6, pp. 452–461.
5. Kuchuk-Yatsenko S.I., Shvets Yu.V., Didkovskii A.V., Chvertko P.N., Shvets V.I., Mikitin Ya.I. Technology and equipment for resistance flash welding of railway crossings with rail ends through an austenitic insert. *Welding International*. 2008, vol. 22, no. 5, pp. 338–341.
6. Irving B. Long Island Rail Road orders an all-welded fleet. *Welding Journal*. 1997, vol. 22, no. 9, pp. 33–37.
7. Klimentko L.B. Continuous rail – a progressive rail construction. *Prilozhenie k zhurnalu "Mir transporta" MKZhT MPS RF*. 2004, no. 1, pp. 88–93. (In Russ.).
8. Kalashnikov E.A., Korolev Yu.A. Rail welding technology: trends in Russia and abroad. *Put' i putevye khozyaistvo*. 2015, no. 8, pp. 2–6. (In Russ.).
9. Sergejevs D., Mikhaylovs S. Analysis of factors affecting fractures of rails welded by alumino-thermic welding. *Transport Problems*. 2008, vol. 3, pp. 33–37.
10. Mitsuru F., Hiroaki N., Kiyoshi N. Rail flash-butt welding technology. *JFE Technical Report*. 2015, no. 20, pp. 159–163.
11. Saita K., Karimine K., Ueda M., Iwano K., Yamamoto T., Hiroguchi K. Trends in rail welding technologies and our future approach. *Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical Report*. 2013, no. 105, pp. 84–92.
12. Dahl B., Mogard B., Grefott B., Ulander B. Repair of rails on-site by welding. *Svetsaren*. 1995, vol. 50, no. 2, pp. 10–14.
13. Takimoto T. Latest welding technology for long rail and its reliability. *Tetsu-to-Hagane*. 1984, vol. 70, no. 10, pp. 40–45.
14. Tachikawa H., Uneta T., Nishimoto H. Steel welding technologies for civil construction applications. *Nippon Steel Technical Report*. 2000, vol. 82, no. 7, pp. 35–41.
15. Shur E.A. Influence of the structure on operational stability of rails. In: *Vliyanie svoistv metallicheskoj matritsy na ekspluatatsionnyu stoikost' rel'sov. Materialy II Vseros. Nauch.-tekh. seminar (Ekaterinburg, 16-17 maya, 2006 g.)* [Influence of the metal matrix properties on the operational stability of rails. Materials of the II All-Russian Sci. and Tech. Seminar (Ekaterinburg, May 16-17, 2006)]. Ekaterinburg: izd. UIM, 2006, pp. 37–63. (In Russ.).
16. Weingrill L., Krutzler J., Enzinger N. Temperature field evolution during flash-butt welding of railway rails. *Materials Science Forum*. May 2016, vol. 879, pp. 2088–2093.
17. Shur E.A., Rezanov V.A. Integrated method of resistance welding of rails. *Vestnik VNIIZhT*. 2012, no. 3, pp. 20–22. (In Russ.).
18. Gudkov A.V., Nikolov A.I., Turbina L.A., Nasonov D.S., Averkina V.A. Resistance welding of rails and heat treatment of welded joints of rails of modern production at rail welding enterprises of OJSC Russian Railways. In: *Svarochnyye i naplavochnyye tekhnologii na zheleznodorozhnom transporte. Sb. nauch. tr OAO "VNIIZhT"* [Welding and surfacing technologies in railway transport. Coll. of sci. works of OJSC "VNIIZhT"]. Gudkov A.V. ed. Moscow: Intekst, 2008, pp. 42–49. (In Russ.).
19. Shevchenko R.A., Kozyrev N.A., Kryukov R.E., Patrushev A.O., Usoltsev A.A. Multi-factor regression analysis of the process of rails contact welding on K1000 machine. *Metallurgy 2017. IOP Publishing IOP Conf Series: Materials Science and Engineering*. 2018, vol. 411, article 012088.
20. Protopopov E.V., Kozyrev N.A., Shevchenko R.A., Kryukov R.E., Feiler S.V., Usoltsev A.A. *Sposob kontaktnoi stykovoii svarki rel'sov* [Method for resistance butt welding of rails]. Patent RF no. 2641586. MPK V 23 K 11/04. *Byulleten' izobretenii*. 2018, no. 2. (In Russ.).

Funding. The work was financially supported by the RFBR and the Kemerovo Region in the framework of scientific project No. 20-48-420003 p a "Development of physicochemical and technological fundamentals of creation of essentially new method of welding of differentially heat-strengthened rails".

Information about the authors:

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

R.A. Shevchenko, Assistant of the Chair "Materials, Foundry and Welding Production" (shefn1200@mail.ru)

A.A. Usoltsev, Cand Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Materials, Foundry and Welding Production" (a.us@rambler.ru)

A.N. Prudnikov, Dr Sci. (Eng.), Professor of the Chair "Materials, Foundry and Welding Production" (a.prudnikov@mail.ru)

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

Received December 24, 2019

Revised January 24, 2020

Accepted January 31, 2020

Над номером работали:

Леонтьев Л.И., *главный редактор*

Протопопов Е.В., *заместитель главного редактора*

Ивани Е.А., *заместитель главного редактора*

Башенко Л.П., *заместитель ответственного секретаря*

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

Запольская Е.М., *ведущий редактор*

Киселева Н.Н., *ведущий редактор*

Расенец В.В., *верстка, иллюстрации*

Кузнецов А.А., *системный администратор*

Острогорская Г.Ю., *менеджер по работе с клиентами*

Подписано в печать 25.05.2020. Формат 60×90 ¹/₈. Бум. офсетная № 1.
Печать цифровая. Усл. печ. л. 10,0. Заказ. Цена свободная.

Отпечатано в типографии Издательского Дома МИСиС.
119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4.
Тел./факс: (499) 236-76-17, 236-76-35

IZVESTIYA

FERROUS METALLURGY

