

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

ИЗВЕСТИЯ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

№ 10, 2017

Издается с января 1958 г. ежемесячно

Том 60

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)

Ответственный секретарь: ПОЛУЛЯХ Л.А.
(Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)

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)

ЗИНГЕР Р.Ф. (Институт Фридриха-Александра, Германия)

ЗИНИГРАД М. (Институт Ариэля, 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. (МГУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва)

КУРНОСОВ В.В. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)

ЛАЗУТКИН С.С. (ГК «МетПром», г. Москва)

ЛИНН Х. (ООО «Линн Хай Терм», Германия)

ЛЫСАК В.И. (Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград)

МЫШЛЯЕВ Л.П. (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)

НИКУЛИН С.А. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)

ОСТРОВСКИЙ О.И. (Университет Нового Южного Уэльса, Сидней, Австралия)

ПОДГОРОДЕЦКИЙ Г.С., редактор раздела «Ресурсосбережение в черной металлургии» (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)

ПЫШМИНЦЕВ И.Ю., редактор раздела «Инновации в металлургическом промышленном и лабораторном оборудовании, технологиях и материалах» (Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности, г. Челябинск)

РАШЕВ 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 «ВНИИМТМАШ», 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)

ШЕШУКОВ О.Ю. (Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург)

ШПАЙДЕЛЬ М.О. (Швейцарская академия материаловедения, Швейцария)

ЮРЬЕВ А.Б. (АО «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:

119049, Москва, Ленинский пр-т, д. 4
Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
Тел./факс: (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: redjvzv@sibsiiu.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»

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

- Шинкин В.Н.** Упрощенный метод расчета изгибающих моментов стального листа и реакций рабочих роликов в многороликовой правильной машине 777
- Козырев Н.А., Усолтцев А.А., Шевченко Р.А., Крюков Р.Е., Шинкин П.Е.** Современные методы сварки рельсов нового поколения 785

ЭКОЛОГИЯ И РАЦИОНАЛЬНОЕ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

- Водолеев А.С., Андрокханов В.А., Бердова О.В., Юмашева Н.А., Черданцева Е.С.** Экологически безопасная консервация отходов железорудного обогащения 792

ИННОВАЦИИ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ ПРОМЫШЛЕННОМ И ЛАБОРАТОРНОМ ОБОРУДОВАНИИ, ТЕХНОЛОГИЯХ И МАТЕРИАЛАХ

- Стулов В.В., Алдунин А.В.** О технологии получения горячекатаного листа заданного качества с использованием новой технологии разлива слябов большого поперечного сечения 798
- Уманский А.А., Головатенко А.В., Кадьков В.Н.** Разработка теоретических основ определения энергосиловых параметров прокатки при освоении новых марок рельсовых сталей 804

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

- Солоненко В.В., Протопопов Е.В., Фейлер С.В., Темлянец М.В., Якушевич Н.Ф.** Термодинамическое обоснование возможности использования высокотемпературных факелов горения для окисления примесей расплава в агрегатах конвертерного типа. Сообщение 2. Взаимодействие факела горения с металлом и шлаком в конвертерной ванне 811
- Бабенко А.А., Жучков В.И., Уполовникова А.Г., Кель И.Н.** Изучение вязкости шлаков системы $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{B}_2\text{O}_3-25\% \text{Al}_2\text{O}_3-8\% \text{MgO}$ 820

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Юрьев А.А., Громов В.Е., Морозов К.В., Перегудов О.А.** Изменение структуры и фазового состава поверхности 100-метровых дифференцированно закаленных рельсов при длительной эксплуатации 826
- Данилов В.И., Горбатенко В.В., Зуев Л.Б., Орлова Д.В., Данилова Л.В.** Исследование деформации Людера в малоуглеродистой стали 831
- Иванов Ю.Ф., Клопотов А.А., Петрикова Е.А., Абзаев Ю.А., Иванова О.В.** Структура и свойства поверхности высокохромистых сталей, модифицированных интенсивным импульсным электронным пучком 839

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

- Никитин А.Г., Епифанцев Ю.А., Медведева К.С., Герике П.Б.** Влияние коэффициента трения между дробимым материалом и щекой в одновалковой дробилке на энергоемкость процесса дробления 846
- К 60-летию Евгения Валентиновича Протопопова 849**
- Громову Виктору Евгеньевичу – 70 лет 851**

CONTENTS

METALLURGICAL TECHNOLOGIES

- V.N. Shinkin** Simplified method for calculation of bending moments of steel sheet and reactions of working rollers in multiroll straightening machine 777
- N.A. Kozyrev, A.A. Usoltsev, R.A. Shevchenko, R.E. Kryukov, P.E. Shishkin** Modern welding methods of the rails of new generation 785

ECOLOGY AND RATIONAL USE OF NATURAL RESOURCES

- A.S. Vodoleev, V.A. Androkhonov, O.V. Berdova, N.A. Yumasheva, E.S. Cherdantseva** Environmentally safe storage of wastes from iron-ore enrichment 792

INNOVATIONS IN METALLURGICAL INDUSTRIAL AND LABORATORY EQUIPMENT, TECHNOLOGIES AND MATERIALS

- V.V. Stulov, A.V. Aldunin** Production technology of hot rolled plate of specified quality using new technics of large section slabs casting ... 798
- A.A. Umanskii, A.V. Golovatenco, V.N. Kadykov** Development of theoretical basis of determining energy-power parameters of rolling with development of new grades of rail steel 804

PHYSICO-CHEMICAL BASICS OF METALLURGICAL PROCESSES

- V.V. Solonenko, E.V. Protopopov, S.V. Feiler, M.V. Temlyantsev, N.F. Yakushevich** Thermodynamic justification of opportunity of using high-temperature combustion flanks for oxidation of melt impurities in aggregates of converter type. Report 2. Interaction of the flank with metal and slag in the converter bath 811
- Babenko A.A., Zhuchkov V.I., Upolovnikova A.G., Kel' I.N.** Study of the viscosity of slags of $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{B}_2\text{O}_3-25\% \text{Al}_2\text{O}_3-8\% \text{MgO}$ system 820

MATERIAL SCIENCE

- A.A. Yur'ev, V.E. Gromov, K.V. Morozov, O.A. Peregudov** Changes in structure and phase composition of the surface of differentially hardened 100-meter rails in operation 826
- V.I. Danilov, V.V. Gorbatenko, L.B. Zuev, D.V. Orlova, L.V. Danilova** Investigation of Lüders deformation in the mild steel 831
- Yu.F. Ivanov, A.A. Klopotov, E.A. Petrikova, Yu.A. Abzaev, O.V. Ivanova** Structure and properties of the surface of high-chromium steels modified with an intense pulsed electron beam 839

SHORT REPORTS

- A.G. Nikitin, Yu.A. Epifantsev, K.S. Medvedeva, P.B. Gerike** Influence of friction coefficient between the crushed material and the cheek in one-roll crusher on crushing process energy capacity 846
- To the 60th Anniversary of Eugeni Valentinovitch Protopopov 849**
- To the 70th Anniversary of Viktor Evgen'evitch Gromov 851**

УДК 625.143.48

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ СВАРКИ РЕЛЬСОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

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

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

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

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

Шишкин П.Е., магистрант кафедры материаловедения, литейного
и сварочного производства (mac866@mail.ru)

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

Аннотация. В настоящее время на железных дорогах РФ осуществляется переход на бесстыковую конструкцию пути. Развитие технологий, позволяющих обеспечить возможность получения бесстыкового железнодорожного пути с требуемыми качественными характеристиками, является актуальным направлением. При строительстве, ремонте и текущем содержании бесстыкового пути одной из ключевых технологий является сварка рельсов, для которой разработаны и используются различные способы, такие как: электроконтактный, газопрессовый, индукционный, сварка лазером, сварка трением, алюминотермитный, электродуговой штучными электродами, под слоем флюса, в среде защитных газов, электрошлаковый, порошковыми проволоками и др. Рассмотрены достоинства и недостатки основных способов сварки рельсов, получивших наибольшее распространение на сегодняшний день: электроконтактного и алюминотермитного. Показано, что в качестве основного способа сварки рельсов в РФ используется электроконтактный (ЭС). Однако, в связи с невозможностью сварки рельсов в зонах стрелочных переводов контактными машинами, на железных дорогах России началось применение алюминотермитной сварки рельсов (АТСР). Показано, что одними из наиболее важных факторов, которые определяют качество и надежность бесстыкового пути, являются металлургические и сварочные параметры технологии сварки рельсов, а также дальнейшие технологические приемы, снижающие последствия воздействий высоких температур. Рассмотрены технологические особенности этих методов, преимущества и недостатки, современные способы решения проблем при сварке, а также экономические затраты с учетом эксплуатационных свойств стыков. Опыт показывает, что при эксплуатации сварных стыков АТСР на сети железных дорог и при испытаниях на экспериментальном кольце АО ВНИИЖТ их качество несколько уступает качеству стыка ЭС, что обусловлено самим способом сварки. Особое внимание уделено особенностям технологии сварки дифференцированно термоупрочненных рельсов. Анализ существующих методик сварки рельсов позволяет выработать основные направления исследований для решения этой проблемы.

Ключевые слова: дуговой разряд, дифференцированно термоупрочненные рельсы, контактная сварка, термическая обработка, технология, качество, структура, механические свойства, эксплуатационная стойкость, надежность.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-10-785-791

Железные дороги в Российской Федерации и их состояние во многом определяют развитие экономики страны. Протяженность Российских железных дорог и интенсивность грузопотоков выдвигают новые требования к верхнему строению пути, в частности к основному элементу – рельсам. В настоящее время как на железных дорогах России, так и за рубежом происходит отказ от звеньевой конструкции пути. Одним из основных недостатков звеньевого пути является наличие стыка. Развитие технологий, позволяющих обеспечить возможность получения бесстыкового железнодорожного пути, является актуальным направлением в настоящее время [1 – 6]. Следует принимать во внимание, что эксплуатация железнодорожного пути в стране происходит в сложных климатических и эксплуатационных

условиях (в РФ используются пути совмещенного типа, а не как в Европейских странах – отдельно для промышленного и пассажирского потока).

К достоинствам бесстыкового пути можно отнести [7, 8]:

- уменьшение на 30 – 40 % затрат на текущее содержание пути и повышение безопасности движения поездов, надежность конструкции;
- снижение на 8 – 10 % основного удельного сопротивления движению поездов и, в связи с этим, экономия топлива и электроэнергии на тягу, что весьма существенно в условиях непрерывного роста цен на энергоносители;
- увеличение сроков службы верхнего строения пути за счет меньшей, чем в звеньевом пути повреждаемос-

ти рельсов (трещины в кромках болтовых отверстий, выколы головки, смятие и седловины); так, отказы бесстыковых плетей по дефектам (контактно-усталостным и в стыках) возникают в 1,8 – 2,0 раза реже, чем рельсов звеньевое пути, а без учета уравнительных пролетов – в 3 – 4 раза;

- снижение объемов работ (до 25 – 30 %) по выправке пути, связанных с просадками в стыках, особенно работ по ликвидации выплесков, которые с увеличением осевых нагрузок становятся большой проблемой;
- снижение интенсивности бокового износа наружной рельсовой нити в кривых и, соответственно, повреждений рельсов по этой причине в 1,5 – 1,6 раз;
- сокращение потребности в очистке щебеночного балласта на угольно-рудных маршрутах в 1,5 – 2,0 раза;
- сокращение расходов металла на стыковые скрепления (до 4,5 т-км);
- уменьшение расходов на ремонт ходовых частей вагонов и локомотивов;
- повышение комфортабельности проезда пассажиров;
- повышение надежности работы электрических рельсовых цепей автоблокировки.

Немаловажным преимуществом бесстыковой конструкции верхнего строения пути является и то, что она позволяет использовать железобетонное подрельсовое основание, которое повышает запас устойчивости, сопротивляемость продольным и поперечным перемещениям рельсов и обеспечивает равную жесткость пути по длине. К тому же использование железобетонных шпал уменьшает расход деловой древесины.

Зоны сварных стыков являются слабыми участками рельсового пути для всех случаев движения (скоростного, высокоскоростного и тяжеловесного). Изъятия по дефектам сварного стыка от общего числа изъятых рельсов достигают 30 %, при этом суммарная протяженность зоны стыка составляет не более 2 % от длины рельсовой плети. Причины этого заключаются в изменении однородности микроструктуры в зонах сварного шва и термического влияния; создании неблагоприятной эпюры внутренних остаточных напряжений; создании при сварке условий для образования внутренних дефектов, являющихся концентраторами напряжений и ослабляющих участок рельса со сварным швом; короблению рельса в зоне сварного шва с последующим образованием «седловин» при эксплуатации.

Создание рельсов с ресурсом 1500 – 2000 млн. т возможно только при комплексной оптимизации металлургического качества, структуры металлической матрицы, эпюры остаточных напряжений и прямолинейности [9, 10]. Высокое металлургическое качество рельсов связано прежде всего с отсутствием в них скоплений и отдельных крупных хрупкоразрушенных оксидных неметаллических включений, что обеспечивается низким (менее 0,004 %) содержанием в стали алюминия и кислорода (менее 20 ppm общего и менее

10 ppm связанного в высокоглиноземистые оксидные включения).

Основными недостатками, снижающими ресурс всех этих рельсов в эксплуатации, остаются:

- наличие остаточных напряжений в головке рельсов, которые наводятся там последней технологической операцией в потоке производства – холодной правкой на роликоправильных машинах;
- создание мягких участков с пониженным сопротивлением износу и смятию в зонах термического влияния после сварки и последующей локальной индукционной термической обработки сварных швов, что приводит к возникновению в этих местах неровностей и повышенного динамического воздействия колес подвижного состава;

- заметное снижение ударной вязкости, трещиностойкости и критического размера усталостных трещин при закалке с прокатного нагрева по сравнению с закалкой с отдельного перекристаллизационного нагрева.

Все эти недостатки можно преодолеть путем разработки и освоения производства сварных рельсовых плетей длиной 800 м, сваренных из цельнокатаных рельсов длиной 100 м с последующей термической обработкой путем непрерывно-последовательного индукционного нагрева всего сечения рельса и последующего дифференцированного охлаждения, направленного на получение в головке рельса структуры сорбита и троостосорбита, максимально возможно однородной как для цельнокатаного рельса, так и для сварного стыка при отсутствии зон термического влияния. Полученные рельсовые плети с термической обработкой должны обеспечивать при условии проведения периодической профилактической шлифовки или фрезеровки межремонтный эксплуатационный ресурс не менее 1500 – 2000 млн. т брутто.

Такой подход обеспечит максимально возможную равнопрочность сварных стыков и цельнокатаных рельсов с получением длинных рельсовых плетей для бесстыкового пути с равным сопротивлением износу и смятию в эксплуатации, что позволит ликвидировать местные неровности в сварных плетях бесстыкового пути в течение всего срока службы рельсов. Кроме того, это обеспечивает получение благоприятной эпюры внутренних остаточных напряжений, способствующих получению наибольшего сопротивления зарождению и распространению контактно-усталостных трещин в головке, коррозионно-усталостных трещин в подошве и продольных трещин в шейке рельса как в прокатной, так и в сварной части рельсовых плетей.

Правильно подобранный режим дифференцированно термически упроченной рельсовой плети позволит минимизировать процесс правки после термической обработки и сохранить внутренние остаточные сжимающие напряжения. Известно, что рельсы, термически упроченные по технологии непрерывно-последовательного сквозного индукционного нагрева

и последующего дифференцированного охлаждения сжатым воздухом со стороны головки и подошвы на предприятиях «СИСКО» (Канада) (в настоящее время завод закрыт) и «Сожерай» («Тата Стил», Франция), имели остаточные сжимающие напряжения в головке 100 – 200 МПа, а в подошве 100 – 150 МПа. Рельсы, термически упрочняемые с прокатного нагрева дифференцированной закалкой или с отдельного нагрева объемной закалкой в масле, в результате проведения холодной правки на роликоправильных машинах имеют растягивающие напряжения в головке и подошве до 250 – 300 МПа [11].

При строительстве, ремонте и текущем содержании бесстыкового пути одной из ключевых технологий является сварка рельсов, для которой разработаны и запатентованы следующие способы:

- давлением – электроконтактный, газопрессовый, индукционный, лазером, трением и др.;
- алюминотермитный;
- электродуговой – штучными электродами, под слем флюса, в среде защитных газов, электрошлаковый, порошковыми проволоками и др.

Способ сварки давлением основан на разогреве концов рельсов до температуры пластического состояния (выше 1000 °С) и сдавливании их с определенным усилием (в зависимости от площади поперечного сечения и физико-механических свойств металла рельсов) [12]. Концы рельсов можно нагревать электрическим током (электроконтактный способ), газовыми горелками (газопрессовый), токами высокой частоты (индукторами), лазером, плазмой, теплом, выделяемым при трении, и т.п. При сварке давлением отсутствует присадочный металл, т.е. концы рельсов сваривают непосредственно друг с другом.

Алюминотермитный способ основан на получении металлов и сплавов восстановлением их оксидов в экзотермической реакции с алюминием. Реакция проходит с выделением большого количества тепла. Расплавленный металл заливается в зазор между соединяемыми рельсами [13].

Электродуговой способ основан на расплавлении электрической дугой электродного металла (стержня или проволоки) и заполнении им зазора между соединяемыми рельсами.

Алюминотермитный и электродуговой способы существенно отличаются от способов сварки давлением тем, что сварной шов шириной 15 – 25 мм и более состоит из присадочного металла, имеющего литую структуру.

Всем способам сварки присуще наличие зоны термического влияния (ЗТВ) – измененной структуры основного металла рельсов, непосредственно прилегающего к сварному шву. Это приводит к возникновению остаточных напряжений и, как следствие, к снижению прочностных характеристик сварного соединения. Ширина ЗТВ зависит от времени воздействия высоких темпера-

тур на основной металл, массы присадочного металла, способа и параметров сварки.

На сварных стыках, выполненных способами сварки давлением, для повышения их механических свойств можно применять термическую обработку (в том числе дифференцированную, с закалкой головки рельса в ЗТВ) [14].

Поскольку при алюминотермитной и электродуговой сварке в сварном шве присутствует присадочный металл, сильно отличающийся от металла рельсов по химическому составу и структуре, термическая обработка этих стыков не дает ощутимого повышения их механических свойств.

Из перечисленных способов сварки рельсов давлением наибольшее распространение получил электроконтактный способ (ЭС), который применяют более чем в 95 % случаев. В России на железнодорожном транспорте применяют только ЭС, которым ежегодно выполняют порядка 600 тыс. стыков рельсов в рельсосварочных предприятиях (РСП) и до 50 тыс. стыков машинами ПРСМ [15]. Рассмотрим достоинства и недостатки существующих технологий ЭС.

Достоинства ЭС:

- высокое качество сварного соединения;
 - наличие в сварочной машине системы контроля, позволяющей контролировать отклонение параметров режима сварки;
 - высокая механизация и автоматизация работ (в стационарных условиях);
 - высокая производительность процесса.
- Недостатки ЭС:
- невозможность сварки стыков в районе стрелочных переводов;
 - дорогостоящее оборудование;
 - необходимость продолжительных окон в движении поездов при проведении сварочных работ.

В настоящее время наибольшее распространение при контактной сварке рельсов получил метод пульсирующего оплавления. Этот способ контактной сварки наиболее экономичен и технологичен в сравнении с непрерывным оплавлением. При контактной сварке рельсов так же, как и при других видах сварки происходит нагрев и непрерывное охлаждение металла в ЗТВ. В зависимости от химического состава стали выбирается технологический процесс сварки с использованием существующих методов оплавления (непрерывного или пульсирующего), определяющих линейную величину и температурные поля в ЗТВ сварного стыка [16, 17]. Выбор теплового режима основан на исключении образования структур закалки (мартенсита и бейнита), вызывающих дополнительные напряжения и трещины, которые приводят к разрушению рельсов [8]. В связи с этим [18] особое значение приобретает разработка таких режимов для железнодорожных рельсов высокоскоростных магистралей, изготовленных из хромистой стали.

Однако при применении бесстыковой конструкции верхнего строения пути остается не решенным ряд вопросов, в частности, требуют дальнейшей проработки вопросы повышения прочности сварных швов и зоны термического влияния, так как количество опасных дефектов на этом участке составляет 13 – 15 % от общего числа дефектов на рельсовой плети.

Указанная проблема в процессе изготовления бесстыкового пути при сварке рельсов решается обязательной термической обработкой сварного стыка. Термообработку проводят с помощью индукционных установок, что в свою очередь увеличивает затраты. Этот недостаток на практике предлагается исправлять совмещением непрерывного и пульсирующего методов оплавления, изменением интенсивности нагрева при сварке и регулированием скорости охлаждения [18]. При частичном использовании метода непрерывного оплавления возможно появление дефектов сварочного характера.

В работе [19] предлагается после сварки рельсов во время охлаждения проводить квазиизотермическую выдержку в интервале температур образования мелкодисперсной структуры путем пропускания импульсов переменного электрического тока через сварной стык с поддержанием данной температуры до конца превращения. Использование квазиизотермической выдержки при температуре 600 – 650 °С позволяет получить мелкодисперсную структуру сварного шва железнодорожных рельсов без дополнительной термической обработки.

До недавнего времени основным способом сварки рельсов был электроконтактный. Однако в связи с невозможностью сварки рельсов в зонах стрелочных переводов контактными машинами, начиная с 1995 г., на железных дорогах России стали применять алюминио-термитную сварку рельсов (АТСР), и в настоящее время решаются вопросы, связанные с применением АТСР не только в зоне стрелочных переводов, но и на перегонах.

Достоинства АТСР:

- мобильность;
- небольшая продолжительность окон в движении поездов;
- проведение процесса сварки без потребления электроэнергии.

Недостатки АТСР:

- нет возможности слежения и непосредственного управления за процессом сварки;
- широкая и неконтролируемая зона термического влияния;
- влияние качества термитной смеси на качество сварного соединения;
- сильная зависимость качества сварки от опыта сварщика.

Для понимания процессов, происходящих при АТСР, необходимо уяснить основные принципы этого способа сварки. В целом технология описана в работах [20 – 24]. Термит, употребляемый для сварки рельсов, изготавли-

вается из железной окалины – отходов сталепрокатного производства и металлического алюминия. Их размельчают до получения зерен диам. от 0,1 до 2,5 мм. Первичный алюминий должен содержать не менее 98 – 99 % чистого алюминия. Перед размолотом окалина должна быть хорошо обожжена с целью удаления из нее влаги и масла. Пыль из размельченной окалины и алюминия удаляется воздушным сепаратором. Окалина по своему химическому составу различна. Чем меньше в окалине кремния, тем она лучше для получения сварочного термита. Содержание в окалине кислорода не должно быть ниже 25 %. Железо с кислородом может образовать три оксида: FeO – вюстит; Fe₂O₃ – магнетит и Fe₃O₄ – гематит. При нормальных условиях составляющие термитной смеси не вступают во взаимодействие, но если термитную смесь подогреть до 1100 – 1200 °С, то между ее компонентами начинается химическая реакция. В результате этой реакции металлический алюминий окисляется и превращается в оксид алюминия, а окалина восстанавливается с образованием железа. Эта реакция идет с большим выделением тепла самопроизвольно и неуправляемо. Термитная смесь содержит 23,7 % алюминия и 76,3 % окалины. При сгорании 1,0 кг термитной смеси выделяется 3188,22 кДж тепла, что позволяет получить температуру расплавленного металла порядка 2700 – 3000 °С.

Окалина и алюминий могут содержать различные примеси. Поэтому процент содержания алюминия и окалины в термитной смеси рассчитывается с учетом чистоты алюминия и содержания кислорода в окалине. Практика термитной сварки показала, что количество окалины в термитной смеси должно быть на 7 – 8 % больше расчетного содержания. Тогда термитный металл получается плотнее и лучше сваривается с металлом рельса.

Для эффективного использования образующегося при реакции тепла и увеличения выхода металла в термитную смесь для сварки рельсов при изготовлении добавляют мелко измельченные кусочки стали – отходы производства гвоздей. При расплавлении сталь увеличивает выход термитного металла и понижает начальную температуру продуктов реакции термита. В зависимости от массы порции термита в термитную смесь добавляют таких отходов (называемых обсежкой) от 12 до 20 % к массе предполагаемого выхода термитного металла. Для улучшения механических свойств металла сварного шва в термитную смесь вводят ферросплавы, в большинстве случаев ферромарганец, ферросилиций, ферромolibден, ферротитан, феррованадий. Ферросплавы обуславливают получение термитного металла с механическими свойствами, близкими к металлу свариваемых рельсов. Таким образом, химический состав металла, образующегося из термитной смеси, далек от свариваемой рельсовой стали со всеми вытекающими последствиями. Кроме того, сама термитная составляющая – источник оксидов как вводимых экзогенных (не-

прореагировавшего оксида железа), так и эндогенных (образующихся в ходе окислительно-восстановительных реакций). Следует также отметить, что не всегда образующиеся в ходе реакций шлаковые включения и газы успевают всплыть из зоны реакции. В итоге происходит загрязнение сварочной зоны неметаллическими оксидными включениями и различными микропорами, являющимися центрами зарождения трещин.

В настоящее время для сварки рельсов может применяться способ промежуточного литья, при котором из продуктов термитной реакции используется только расплавленный металл без шлака, что повышает качество. Однако сварка АТСП – это соединение, получаемое с помощью литейных процессов, при которых возможно образование неметаллических оксидных включений, пор, раковин, заливин, шлаковых включений, внутренних трещин и микропор.

Большие проблемы возникают при сварке АТСП в зимние периоды. При низких температурах увеличивается скорость охлаждения, в связи с чем ускоряется кристаллизация расплавленного металла сварочной ванны, в результате выделившиеся газы и частички шлака не успевают всплыть, насыщая металл порами и шлаковыми включениями. Повышенный отвод тепла от нагретого металла и увеличение содержания в нем газов способствуют образованию трещин в шве и околошовной зоне. При несоблюдении правил хранения в материалах возможно содержание некоторого количества влаги, что способствует насыщению водородом металла шва.

В работе [25] показаны результаты эксплуатационных испытаний сварных стыков, сваренных по различным технологиям. Показано, что основной технологической операцией, влияющей на получение необходимой структуры и обеспечивающей необходимое качество сварного соединения, является предварительный подогрев. Экспериментами установлено, что при недостаточном подогреве или низкой температуре окружающей среды температура торцов рельсов резко снижается, что приводит к повышению скоростей охлаждения металла шва и околошовной зоны. Это способствует образованию закалочных структур, повышению хрупкости и образованию микротрещин, снижающих прочность стыка рельсов. Так например, при сварке рельсов при температуре окружающей среды 15 °С скорости охлаждения на периферийных участках подошвы рельса почти в два раза выше, чем в головке.

В работе [26] приведены эксперименты по сварке АТСП при отрицательных температурах. Температура окружающей среды оказывает негативное влияние на качество сварных швов. Результаты экспериментов, полученные при разных температурах сварки, не удовлетворяют нормативным требованиям.

Следует отметить, что как показывает опыт эксплуатации сварных стыков АТСП на сети железных дорог и испытания на Экспериментальном кольце АО ВНИИЖТ,

их качество несколько уступает качеству стыка ЭС, что обусловлено самим способом сварки. Поэтому основные компании, осуществляющие АТСП рельсов на сети железных дорог («Снага», «Сварочная Наплавочная Компания», «ГТ-Алюминотермитная сварка», «Railtech», «Сварочные технологии»), позиционируют данный способ исключительно для сварки рельсов в пределах стрелочных переводов, на мостах, эстакадах, в тоннелях, когда сложно организовать необходимые окна в графике движения для использования машин ПРСМ.

В исследовании [27] приведен расчет, согласно которому стоимость электроконтактной сварки рельсов дороже алюминотермитной на 41,8 %. Однако при рассмотрении сроков гарантии стыков, сваренных способами ЭС и АТСП по количеству пропущенного по ним груза (для ЭС согласно СТО РЖД 1.08.002 – 2009 для рельсов типа Р75 и Р65 – 150 млн. т брутто; для рельсов типа Р50 – 120 млн. т брутто; для АТСП согласно ТУ 0921 – 127 – 01124323 – 2005 для рельсов типа Р75 и Р65 – 120 млн. т брутто; для рельсов типа Р50 – 100 млн. т брутто) стоимость стыка для каждого млн. т брутто изменяется. При ЭС: для рельсов типа Р75 и Р65 – 81,33 руб, для рельсов типа Р50 – 101,67 руб. При АТСП: для рельсов типа Р75 и Р65 – 59,17 руб, для рельсов типа Р50 – 71 руб. Таким образом, приведенная стоимость ЭС дороже АТСП на 27,25 % при сварке рельсов типа Р75, Р65 и на 30,17 % при сварке рельсов типа Р50. Причем следует указать, что проведенный в работе [28] анализ данных об изъятии из пути 897 дефектных сварных стыков АТСП на сети железных дорог за 2009 г. и 9 мес. 2010 г. выявил, что 89 % стыков АТСП (710 шт.) не проработали в течение гарантийного срока. Это также сокращает разницу между стоимостью ЭС и АТСП. Стоимость АТСП увеличивается с дальнейшей эксплуатацией стыков. Действующая периодичность контроля стыков АТСП (не позже 6 мес. с момента сварки, затем не реже одного раза в год), большинство из которых эксплуатируется с предохранительными накладками, выше периодичности контроля стыков, сваренных электроконтактным способом, эксплуатируемых без накладок (не реже одного раза в год в первые два года после укладки, затем не реже одного раза в два года) [28].

Выводы. Сварка АТСП сегодня не зарекомендовала себя в качестве надежного и качественного способа соединения рельсов, экономическая же составляющая связана с качественными характеристиками и безопасностью перевозок железнодорожным транспортом. Следует отметить, что оба способа сварки непрерывно развиваются, в частности, немецкая компания «Elektro-Thermit GmbH & Co. KG» заявляет о достигнутых успехах по повышению качества стыка, выполненного АТСП. Несмотря на хорошую рекламную составляющую, массовому использованию и внедрению данной технологии для сварки рельсовых плетей должно в обязательном порядке предшествовать проведение широкомасштабных исследований, лабораторных и

полигонных испытаний, эксплуатационных испытаний на участках пути с разной геометрией, грузонапряженностью и климатическими условиями.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Meade B. Railroad welding demands specialized processes // *Welding journal*. 1997. Vol. 76. Iss. 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. Iss. 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. Iss. 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. Iss. 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. Iss. 5. P. 338 – 341.
6. Irving B. Long Island Rail Road orders an all-welded fleet // *Welding journal*. 1997. Vol. 22. Iss. 9. P. 33 – 37.
7. Клименко Л.В. Бесстыковой путь – прогрессивная конструкция железнодорожного пути // Приложение к журналу «Мир транспорта» МСЖТ МПС РФ. 2004. № 1. С. 88 – 93.
8. Железнодорожные рельсы из электростали / Н.А. Козырев, В.В. Павлов, Л.А. Годик, В.П. Деметьев. – Новокузнецк: ЕвразХолдинг, Новокузнецкий металлургический комбинат, 2006. – 388 с.
9. Шур Е.А. Перспективные требования Российских железных дорог к рельсам // *Железнодорожный транспорт*. 2008. № 2. С. 41 – 45.
10. Шур Е.А. Влияние структуры на эксплуатационную стойкость рельсов // Влияние свойств металлической матрицы на эксплуатационную стойкость рельсов: Сб. статей. – Екатеринбург: УИМ, 2006. С. 37 – 63.
11. Термически упрочненные рельсы / Под ред. А.Ф. Золотарского. – М.: Транспорт, 1976. – 264 с.
12. Kuchuk-Yatsenko S.I., Shvets V.I., Didkovskii A.V., Taranova T.G. Investigation of the weldability by resistance welding of rails strengthened by heat treatment // *Welding International*. 2010. Vol. 24. Iss. 6. P. 455 – 461.
13. Wegrzyn J., Maxur M. A thermit mixture for rail track welding // *Welding International*. 1992. Vol. 6. Iss. 1. P. 5 – 8.
14. Genkin Z., Welding and heat treatment of joints in railway rails in induction equipment // *Welding International*. 2005. Vol. 19. Iss. 2. P. 160 – 164.
15. Калашников Е.А., Королев Ю.А. Технологии сварки рельсов: тенденции в России и за рубежом // *Путь и путевое хозяйство*. 2015. № 8. С. 2 – 6.
16. Mitsuru F., Hiroaki N., Kiyoshi N. Rail flash-butt welding technology // *JFE Technical Report*. 2015. No. 20. P. 159 – 163.
17. 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.
18. Шур Е.А., Резанов В.А. Комплексный метод контактной сварки рельсов // *Вестник ВНИИЖТ*. 2012. № 3. С. 20 – 22.
19. Шевченко Р.А. Совершенствование технологии сварки рельсовой стали с повышенным содержанием хрома // *Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения: Сб. трудов Всероссийской научн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых*. Вып. 20. Ч. III – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2016. С. 259 – 261.
20. Технология алюминотермитной сварки рельсов: Учеб. пособие / Н.Н. Воронин, В.В. Засыпкин, В.И. Коненков, Э.В. Воробьев, О.Н. Трынкова. – М.: МИИТ, 2008. – 117 с.
21. Алюминотермитная сварка рельсов: Учеб. пособие / Н.Н. Воронин, В.В. Засыпкин, В.И. Коненков, Э.В. Воробьев, О.Н. Трынкова. – М.: изд. «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2013. – 195 с.
22. Sergejevs D., Mikhaylovs S. Analysis of factors affecting fractures of rails welded by aluminothermic welding // *Transport problems*. 2008. Vol. 3. P. 33 – 37.
23. Kargin V.A., Tikhomirova L.B., Galai M.S., Kuznetsova Ye.S. Improving service properties of welded joints produced by aluminothermic welding // *Welding International*. 2015. Vol. 29. Iss. 2. P. 155 – 157.
24. Lee F.T. Managing thermit weld quality for railroads // *Welding journal*. 2006. Vol. 85. Iss. 1. P. 24.
25. Воронина О.Н. Развитие конструкций железнодорожных рельсов, их стыковых соединений и технологий обработки. Дис. канд. техн. наук. – Москва, 2014. – 228 с.
26. Воронин Н.Н., Трынкова О.Н., Фомичева О.В. Алюминотермитная сварка рельсов зимой // *Мир транспорта*. 2012. № 4. С. 56 – 59.
27. Величко Д.В. Экономическая оценка контактной и алюминотермитной сварки рельсов // *Актуальные проблемы современной науки: Сб. статей Международной научно-практ. конф. В 4-х частях; отв. ред. А.А. Сукиасян*. 2013. С. 93 – 96.
28. Рукавчук Ю.П., Рождественский С.А., Этинген И.З. Дефектность стыков алюминотермитной сварки рельсов // *Путь и путевое хозяйство*. 2011. № 4. С. 26, 27.

Поступила 5 декабря 2016 г.

MODERN WELDING METHODS OF THE RAILS OF NEW GENERATION

N.A. Kozыrev, A.A. Usol'tsev, R.A. Shevchenko, R.E. Kryukov, P.E. Shishkin

Siberian State Industrial University, Russia, Novokuznetsk

Abstract. Nowadays, the railways in the Russian Federation are moving to the path of seamless construction. The development of technologies to ensure the possibility of continuous welded rail track with the desired quality characteristics is the actual direction now. One of the key technologies for the construction, repair and maintenance of a seamless path is welding of rails, for which various methods have been deve-

loped and are used, such as: electric-contact, gas-press, induction, laser welding, friction welding, aluminothermic, electric arc electrodes, in the environment of protective gases, electroslag, powder wires, etc. The article describes the advantages and disadvantages of the main types of welding rails that are most widespread today: resistance flash welding and aluminothermic welding. It is shown that as the primary method of rails welding in Russia, electric-contact welding is used. However, in connection with the inability to weld rails in the zones of turnouts by contact machines, the use of aluminothermic welding of rails started on the railways of Russia. It has been shown that the most important factors that determine the quality and reliability of welded

rails are metallurgical and welding technologies, as well as subsequent processing methods that reduce the impact of high temperature effects. The technological features of these methods, advantages and disadvantages of modern methods of solving problems in welding, as well as economic costs were considered taking into account operational properties of joints. Experience has shown that during the exploitation of welded joints made by aluminothermic method on the railway and at testing on the experimental ring of JSC All-Russian Scientific Research Institute of Railway Transport, their quality is slightly inferior of electric-contact welding. Special attention is paid to the peculiarities of welding technology for differentially thermally strengthened rails. The analysis of existing methods of rails welding allows working out the main directions of research to solve this problem.

Keywords: arc charge, differentiated thermally strengthened rails, contact welding, heat treatment, technology, quality, structure, mechanical properties, operational stability, reliability.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-10-785-791

REFERENCES

- Meade B. Railroad welding demands specialized processes. *Welding Journal*. 1997, vol. 76, no. 9, pp. 47–52.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Irving B., Long Island Rail Road orders an all-welded fleet. *Welding Journal*. 1997, vol. 22, no. 9, pp. 33–37.
- Klimenko L.B. Seamless path - advanced design of railway track. *Prilozhenie k zhurnalu "Mir transporta" MKZhT MPS RF*. 2004, no. 1, pp. 88–93. (In Russ.).
- Kozyrev N.A., Pavlov V.V., Godik L.A., Dement'ev V.P. *Zheleznodorozhnye rel'sy iz elektrostali* [Railway rails of EAF steel]. Novokuznetsk: EvrazKholding, Novokuznetskii metallurgicheskii kombinat, 2006, 388 p. (In Russ.).
- Shur E.A. Advanced requirements of the Russian Railways to the rails. *Zheleznodorozhnyi transport*. 2008, no. 2, pp. 41–45. (In Russ.).
- Shur E.A. Effect of the structure on operational stability of rails. In: *Vliyaniye svoystv metallicheskoi matritsy na ekspluatatsionnyuyu stoikost' rel'sov: Sb. statei* [Effect of the properties of metal matrix on the operational stability of rails: Coll. of articles]. Ekaterinburg: UIM, 2006, pp. 37–63. (In Russ.).
- Termicheski uprochnemye rel'sy* [Thermally strengthened rails]. Zolotarskii A.F. ed. Moscow: Transport, 1976, 264 p. (In Russ.).
- Kuchuk-Yatsenko S.I., Shvets V.I., Didkovskii A.V., Taranova T.G. Investigation of the weldability by resistance welding of rails strengthened by heat treatment. *Welding International*. 2010, vol. 24, no. 6, pp. 455–461.
- Wegrzyn J., Maxur M. A thermit mixture for rail track welding. *Welding International*. 1992, vol. 6, no. 1, pp. 5–8.
- Genkin Z., Welding and heat treatment of joints in railway rails in induction equipment. *Welding International*. 2005, vol. 19, no. 2, pp. 160–164.
- Kalashnikov E.A., Korolev Yu.A. Technologies of rails welding: Russian and international trends. *Put' i putevoe khozyaistvo*. 2015, no. 8, pp. 2–6. (In Russ.).
- Mitsuru F., Hiroaki N., Kiyoshi N. Rail flash-butt welding technology. *JFE Technical Report*. 2015, no. 20, pp. 159–163.
- 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.
- Shur E.A., Rezanov V.A. Complex method of rails contact welding. *Vestnik VNIIZhT*. 2012, no. 3, pp. 20–22. (In Russ.).
- Shevchenko R.A. Improvement of welding technology for rail steel with increased chromium content. In: *Nauka i molodezh': problemy, poiski, resheniya: Sb. trudov Vserossiiskoi nauchn. konf. studentov, aspirantov i molodykh uchenykh. Vyp. 20. Ch. III* [Science and youth: problems, searches, solutions: Coll. of papers of the All-Russian Sci. Conf. of students, graduate students and young scientists. Issue. 20. Part III]. Novokuznetsk: SibGIU, 2016, pp. 259–261. (In Russ.).
- Voronin N.N., Zasyupkin V.V., Kononov V.I., Vorob'ev E.V., Trynkova O.N. *Tekhnologiya alyuminotermitnoi svarki rel'sov: ucheb. posobie* [Technology of aluminothermic welding of rails: Manual]. Moscow: MIIT, 2008, 117 p. (In Russ.).
- Voronin N.N., Zasyupkin V.V., Kononov V.I., Vorob'ev E.V., Trynkova O.N. *Alyuminotermitnaya svarka rel'sov: ucheb. posobie* [Aluminothermic welding of rails: Manual]. Moscow: Uchebno-metodicheskii tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte, 2013, 195 p. (In Russ.).
- Sergejevs D., Mikhaylovs S. Analysis of factors affecting fractures of rails welded by aluminothermic welding. *Transport problems*. 2008, vol. 3, pp. 33–37.
- Karguin V.A., Tikhomirova L.B., Galai M.S., Kuznetsova Ye.S. Improving service properties of welded joints produced by aluminothermic welding. *Welding International*. 2015, vol. 29, no. 2, pp. 155–157.
- Lee F.T. Managing thermite weld quality for railroads. *Welding Journal*. 2006, vol. 85, no. 1, pp. 24.
- Voronina O.N. *Razvitiye konstruktivnykh zheleznodorozhnykh rel'sov, ikh stykovykh soedinenii i tekhnologii obrabotki. Dis. kand. tekhn. nauk* [Development of railway rails, their connection joints design and processing technologies. Cand. Tech. Sci. Diss.]. Moscow, 2014, 228 p. (In Russ.).
- Voronin N.N., Trynkova O.N., Fomicheva O.V. Aluminothermic welding of rails in winter. *Mir transporta*. 2012, no. 4, pp. 56–59. (In Russ.).
- Velichko D.V. Feasibility study of contact and aluminothermic welding of rails. In: *Aktual'nye problemy sovremennoi nauki: Sb. statei Mezhdunarodnoi nauchno-prakt. konf.: V 4-kh chastyakh* [Actual problems of modern science: Coll. of papers of the Int. Sci. and Practical Conf. In 4 parts]. Sukiasyan A.A. ed. 2013, pp. 93–96. (In Russ.).
- Rukavchuk Yu.P., Rozhdstvenskii S.A., Etingen I.Z. Defect structure of aluminothermically welded rails joints. *Put' i putevoe khozyaistvo*. 2011, no. 4, pp. 26–27. (In Russ.).

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)
- A.A. Usoltsev**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Materials, Foundry and Welding Production" (a.us@rambler.ru)
- R.A. Shevchenko**, Postgraduate of the Chair "Materials, Foundry and Welding Production" (shefn1200@mail.ru)
- R.E. Kryukov**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Materials, Foundry and Welding Production" (rek_nzrmk@mail.ru)
- P.E. Shishkin**, MA Student of the Chair "Materials, Foundry and Welding Production" (mac866@mail.ru)

Received December 5, 2016

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*

Олендаренко Н.П., *ведущий редактор*

Неунывахина Д.Т., *ведущий редактор*

Расенец В.В., *верстка, иллюстрации*

Кузнецов А.А., *системный администратор*

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

Подписано в печать 25.10.2017. Формат 60×90 1/8. Бум. офсетная № 1.
Печать цифровая. Усл. печ. л. 10,0. Заказ 6061. 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

SIMPLIFIED METHOD FOR CALCULATION OF BENDING MOMENTS OF STEEL SHEET AND REACTIONS OF WORKING ROLLERS IN MULTIROLL STRAIGHTENING MACHINE

MODERN WELDING METHODS OF THE RAILS OF NEW GENERATION

ENVIRONMENTALLY SAFE STORAGE OF WASTES FROM IRON-ORE ENRICHMENT

PRODUCTION TECHNOLOGY OF HOT ROLLED PLATE OF SPECIFIED QUALITY USING NEW TECHNIQS OF LARGE SECTION SLABS CASTING

DEVELOPMENT OF THEORETICAL BASIS OF DETERMINING ENERGY-POWER PARAMETERS OF ROLLING WITH DEVELOPMENT OF NEW GRADES OF RAIL STEEL

THERMODYNAMIC JUSTIFICATION OF OPPORTUNITY OF USING HIGH-TEMPERATURE COMBUSTION FLANKS FOR OXIDATION OF MELT IMPURITIES IN AGGREGATES OF CONVERTER TYPE. REPORT 2. INTERACTION OF THE FLANK WITH METAL AND SLAG IN THE CONVERTER BATH

STUDY OF THE VISCOSITY OF SLAGS OF $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{B}_2\text{O}_3-25\% \text{Al}_2\text{O}_3-8\% \text{MgO}$ SYSTEM

CHANGES IN STRUCTURE AND PHASE COMPOSITION OF THE SURFACE OF DIFFERENTIALLY HARDENED 100-METER RAILS IN OPERATION

INVESTIGATION OF LÜDERS DEFORMATION IN THE MILD STEEL

STRUCTURE AND PROPERTIES OF THE SURFACE OF HIGH-CHROMIUM STEELS MODIFIED WITH AN INTENSE PULSED ELECTRON BEAM

INFLUENCE OF FRICTION COEFFICIENT BETWEEN THE CRUSHED MATERIAL AND THE CHEEK IN ONE-ROLL CRUSHER ON CRUSHING PROCESS ENERGY CAPACITY

TO THE 60TH ANNIVERSARY OF EUGENII VALENTINOVITCH PROTOPOV

TO THE 70TH ANNIVERSARY OF VIKTOR EVGEN'EVITCH GROMOV