

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«Сибирский государственный индустриальный университет»  
Российская академия естественных наук

**ВЕСТНИК  
ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ СЕКЦИИ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ  
ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК**

Отделение металлургии

*Сборник научных трудов*

*Издается с 1994 г. ежегодно*

Выпуск 38

Москва  
Новокузнецк  
2017

УДК 669.1(06)+669.2/.8.(06)+621.762(06)+669.017(06)

ББК 34.3я4

В 387

**В 387 Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии:** Сборник научных трудов. Вып. 38 / Редкол.: Е.В. Протопопов (главн. ред.), М.В. Темлянец (зам. главн. ред.), Г.В. Галевский (зам. главн. ред.) [и др.]: Сибирский государственный индустриальный университет. – Новокузнецк, 2017 – 230 с., ил.

Издание сборника статей, подготовленных авторскими коллективами, возглавляемыми действительными членами и членами-корреспондентами РАЕН, других профессиональных академий, профессорами вузов России. Представлены работы по различным направлениям исследований в области металлургии черных и цветных металлов и сплавов, порошковой металлургии и композиционных материалов, физики металлов и металловедения, экономики и управления на предприятиях.

Сборник реферируется в РЖ Металлургия.

Электронная версия сборника представлена на сайте <http://www.sibsiu.ru> в разделе «Научные издания»

Ил. 45, табл. 28, библиогр. назв. 222.

*Редакционная коллегия:* Аренс В.Ж., д.т.н., проф., д.ч. РАЕН, вице-президент РАЕН, г. Москва; Райков Ю.Н., д.т.н., д.ч. РАЕН, председатель горно-металлургической секции РАЕН, ОАО «Институт Цветметобработка», г. Москва; Протопопов Е.В., д.т.н., проф., д.ч. РАЕН (главный редактор), СибГИУ, г. Новокузнецк; Темлянец М.В., д.т.н., проф., д.ч. РАЕН (зам. главного редактора), СибГИУ, г. Новокузнецк; Галевский Г.В., д.т.н., проф., д.ч. РАЕН (зам. главного редактора), СибГИУ, г. Новокузнецк; Буторина И.В., д.т.н., проф., СПбГПУ, г. Санкт-Петербург; Волокитин Г.Г., д.т.н., проф., д.ч. МАНЭБ, ТГАСУ, г. Томск; Медведев А.С., д.т.н., проф., д.ч. МАН ВШ, НИТУ «МИСиС», г. Москва; Максимов А.А., д.т.н., проф., г. Новокузнецк; Немчинова Н.В., д.т.н., проф., НИ ИрГТУ, г. Иркутск; Руднева В.В., д.т.н., проф. (отв. секретарь), СибГИУ, г. Новокузнецк; Спирин Н.А., д.т.н., проф., д.ч. АИН, УрФУ, г. Екатеринбург; Черепанов А.Н., д.ф.-м.н., проф., член РНК ТММ, ИТПМ СО РАН, г. Новосибирск; Юрьев А.Б., д.т.н., проф., АО «Евраз – ЗСМК», г. Новокузнецк.

УДК 669.1(06)+669.2/.8.(06)+621.762(06)+669.017(06)

ББК 34.3я4

© Сибирский государственный индустриальный университет, 2017

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ И РУКОВОДИТЕЛЯХ  
АВТОРСКИХ КОЛЛЕКТИВОВ

|                |                                                             |
|----------------|-------------------------------------------------------------|
| Базайкин В.И.  | д-р техн. наук, проф., СибГИУ, г. Новокузнецк               |
| Галевский Г.В. | д-р техн. наук, проф., д.ч. РАЕН, СибГИУ,<br>г. Новокузнецк |
| Деев В.Б.      | д-р техн. наук, проф., НИТУ «МИСиС», г. Москва              |
| Дорофеев В.В.  | д-р техн. наук, АО «ЕВРАЗ ЗСМК», г. Новокузнецк             |
| Козырев Н.А.   | д-р техн. наук, проф., СибГИУ, г. Новокузнецк               |
| Оршанская Е.Г. | д-р пед. наук, проф., СибГИУ, г. Новокузнецк                |
| Руднева В.В.   | д-р техн. наук, проф., СибГИУ, г. Новокузнецк               |
| Селянин И.Ф.   | д-р техн. наук, проф., СибГИУ, г. Новокузнецк               |
| Темлянцев М.В. | д-р техн. наук, проф., д.ч. РАЕН, СибГИУ,<br>г. Новокузнецк |

## Содержание

|                                                                                                                                                                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ПРЕДИСЛОВИЕ .....                                                                                                                                                                                                               | 7  |
| МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ И ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ .....                                                                                                                                                                           | 8  |
| <i>Чжан Кэ</i>                                                                                                                                                                                                                  |    |
| Проектно-исследовательский институт цветной металлургии Китая: научно-технологический потенциал, проектирование, строительство, инжиниринг, рециклинг горно-металлургических, энергетических и водохозяйственных объектов ..... | 9  |
| <i>И.Н. Ганиев, Дж.Х. Джайлоев, И.Т. Амонов, Н.Р. Эсанов</i>                                                                                                                                                                    |    |
| Влияния щелочноземельных металлов на анодное поведение сплава Al + 2,18 % Fe в нейтральной среде .....                                                                                                                          | 13 |
| <i>В.М. Павловец</i>                                                                                                                                                                                                            |    |
| Анализ технических решений, направленных на управление пластической деформацией зародышей в технологии производства окатышей, основанной на принудительном зародышеобразовании .....                                            | 22 |
| <i>В.М. Павловец</i>                                                                                                                                                                                                            |    |
| Анализ технических решений, направленных на организацию предварительного влагоудаления на участке окомкования в производстве железорудных окатышей .....                                                                        | 30 |
| <i>В.М. Павловец</i>                                                                                                                                                                                                            |    |
| Анализ технических решений, направленных на управление процессом зародышеобразования в производстве окатышей, основанном на принудительном зародышеобразовании .....                                                            | 37 |
| <i>В.Б. Деев, Е.С. Прусов, С.В. Сметанюк, О.Г. Приходько, К.В. Пономарева</i>                                                                                                                                                   |    |
| Влияние железа на характер кристаллизации, литейные и механические свойства заэвтектического силумина .....                                                                                                                     | 43 |
| <i>М.В. Темлянецев, К.С. Коноз, О.В. Кузнецова, Э.Я. Живаго, В.Я. Целлермаер</i>                                                                                                                                                |    |
| Исследование высокотемпературного окисления рессорно-пружинной стали марки 40С2 и особенностей строения ее окарины .....                                                                                                        | 48 |
| <i>А.А. Уманский, В.В. Дорофеев, А.В. Головатенко, В.Н. Кадыков, А.В. Добрянский</i>                                                                                                                                            |    |
| Совершенствование режимов прокатки острых рельсов на универсальном рельсобалочном стане .....                                                                                                                                   | 55 |
| <i>Е.С. Прусов, В.Б. Деев</i>                                                                                                                                                                                                   |    |
| Перспективы применения ультразвука при вводе наночастиц в алюминиевые расплавы .....                                                                                                                                            | 64 |
| <i>Р.А. Шевченко, Н.А. Козырев, А.О. Патрушев, С.Н. Кратько, Р.Е. Крюков</i>                                                                                                                                                    |    |
| Поиск оптимальных технологических параметров режима работы рельсосварочной машины К1000 .....                                                                                                                                   | 70 |
| <i>Р.А. Шевченко, С.Н. Кратько, П.Е. Шишкин, Н.А. Козырев, В.И. Базайкин</i>                                                                                                                                                    |    |
| Применение методов математического моделирования для оптимизации технологических параметров процесса контактной сварки рельсов на машине К1000 .....                                                                            | 76 |
| <i>Р.А. Шевченко, В.И. Базайкин, С.Н. Кратько, Н.А. Козырев, А.О. Патрушев</i>                                                                                                                                                  |    |
| Анализ токового режима работы сварочной машины К1000 при сварке рельсов на этапе оплавления .....                                                                                                                               | 81 |
| ПОРОШКОВАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ И КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ .....                                                                                                                                                                         | 88 |
| <i>Т.И. Алексеева, Г.В. Галевский, В.В. Руднева</i>                                                                                                                                                                             |    |
| Термодинамическое моделирование плазмосинтеза карбида циркония .....                                                                                                                                                            | 89 |
| <i>Г.В. Галевский, В.В. Руднева, К.А. Ефимова</i>                                                                                                                                                                               |    |
| Исследование механизма плазмосинтеза диборида титана .....                                                                                                                                                                      | 97 |

|                                                                                                                                                                                                           |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <i>Г.В. Галевский, В.В. Руднева, К.А. Ефимова</i>                                                                                                                                                         |            |
| Окисление нанокристаллического диборида титана при хранении и нагревании в воздушной среде.....                                                                                                           | 107        |
| <b>ФИЗИКА МЕТАЛЛОВ И МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ .....</b>                                                                                                                                                             | <b>117</b> |
| <i>В.Б. Деев, О.Г. Приходько, А.И. Куценко, И.Ф. Селянин</i>                                                                                                                                              |            |
| Расчеты энергии атомных систем в приближении постоянной электронной плотности.....                                                                                                                        | 118        |
| <i>В.Б. Деев, О.Г. Приходько, А.И. Куценко, И.Ф. Селянин</i>                                                                                                                                              |            |
| Исследование взаимодействия электронных оболочек атомов с различным набором квантовых чисел .....                                                                                                         | 123        |
| <i>В.Б. Деев, О.Г. Приходько, А.И. Куценко, И.Ф. Селянин</i>                                                                                                                                              |            |
| Выполнение теоремы Купманса в приближении постоянной электронной плотности.....                                                                                                                           | 128        |
| <i>В.Б. Деев, О.Г. Приходько, А.И. Куценко, И.Ф. Селянин</i>                                                                                                                                              |            |
| Расчет корреляционной поправки первого порядка в модели постоянной электронной плотности.....                                                                                                             | 133        |
| <i>В.Б. Деев, О.Г. Приходько, А.И. Куценко, И.Ф. Селянин</i>                                                                                                                                              |            |
| Расчет корреляционной поправки в движении электронов в поле точечного положительного заряда ядра .....                                                                                                    | 142        |
| <i>А.И. Гусев, Н.А. Козырев, Н.В. Кибко, Р.Е. Крюков, И.В. Осетковский</i>                                                                                                                                |            |
| Свойства металла, наплавленного порошковой проволокой системы Fe-C-Si-Mn-Mo-Ni-V-Co                                                                                                                       | 147        |
| <i>И.В. Осетковский, Н.А. Козырев, А.И. Гусев, Р.Е. Крюков, М.В. Попова</i>                                                                                                                               |            |
| Свойства металла, наплавленного порошковыми проволоками систем Fe-C-Si-Mn-Ni-Mo-W - V и Fe-C-Si-Mn-Cr-Ni-Mo-V.....                                                                                        | 155        |
| <b>ЭКОНОМИКА, УПРАВЛЕНИЕ И ЭКОЛОГИЯ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ.....</b>                                                                                                                                              | <b>163</b> |
| <i>Г.В. Галевский, В.В. Руднева, В.С. Александров</i>                                                                                                                                                     |            |
| Мировое и отечественное производство алюминия: оценка, тенденции, прогнозы.....                                                                                                                           | 164        |
| <i>Т.А. Михайличенко, А.Г. Гальчун</i>                                                                                                                                                                    |            |
| Использование возобновляемых биоэнергетических ресурсов в разных странах.....                                                                                                                             | 171        |
| <b>ПРОБЛЕМЫ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ.....</b>                                                                                                                                                                  | <b>175</b> |
| <i>Д.И. Оршанский, Е.Г. Оршанская</i>                                                                                                                                                                     |            |
| Личностно ориентированная модель деятельности современного преподавателя .....                                                                                                                            | 176        |
| <i>Т.Г. Моисеенко</i>                                                                                                                                                                                     |            |
| Формы и методы повышения квалификации учителей.....                                                                                                                                                       | 182        |
| <i>Е.Г. Оршанская</i>                                                                                                                                                                                     |            |
| Мастер-класс как средство повышения уровня владения иностранным языком .....                                                                                                                              | 186        |
| <i>Ю.К. Осипов</i>                                                                                                                                                                                        |            |
| Архитектура, образование, проблемы и реальность.....                                                                                                                                                      | 193        |
| <b>ОТКЛИКИ, РЕЦЕНЗИИ, БИОГРАФИИ .....</b>                                                                                                                                                                 | <b>197</b> |
| <i>Г.Г. Волокитин</i>                                                                                                                                                                                     |            |
| Рецензия на учебное пособие «Оборудование и технология алюминиевого производства» (Авторы Галевский Г.В., Минцис М.Я., Руднева В.В. – М. : Наука : Флинта, 2017 – 265 с.) .....                           | 198        |
| <i>Г.Г. Волокитин</i>                                                                                                                                                                                     |            |
| Рецензия на учебное пособие «Технологические и конструктивные измерения и расчеты в производстве алюминия» (Авторы Галевский Г.В., Минцис М.Я., Руднева В.В. – М. : Флинта : Наука, 2017. – 218 с.) ..... | 200        |

|                                                                                                                                                                                                                                          |      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| <i>Н.В. Немчинова</i>                                                                                                                                                                                                                    |      |
| Рецензия на монографию «Применение буроугольного полукокса в процессах металлизации и карбидизации техногенного металлургического сырья» (Авторы Аникин А.Е., Галевский Г.В. – Новокузнецк : Изд. центр СибГИУ, 2017. – 156 с.) .....    | 202  |
| <i>В.В. Лавров</i>                                                                                                                                                                                                                       |      |
| Рецензия на монографию «Разработка и внедрение энерго- и ресурсосберегающих технологий обработки металлов давлением» авторы ( М.В. Филиппова, В.Н. Перетяцько, М.В. Темлянцев. – Новосибирск : Издательство СО РАН, 2016. – 269 с.)..... | 205  |
| <i>В.В. Дорофеев</i>                                                                                                                                                                                                                     |      |
| Рецензия на монографию «Разработка и внедрение энерго- и ресурсосберегающих технологий обработки металлов давлением» авторы ( М.В. Филиппова, В.Н. Перетяцько, М.В. Темлянцев. – Новосибирск : Издательство СО РАН, 2016. – 269 с.)..... | 207  |
| <i>Ф.И. Иванов</i>                                                                                                                                                                                                                       |      |
| Рецензия на монографию «Эволюция структуры и свойств легких сплавов при энергетических воздействиях», авторов В.Е. Громова, С.В. Коновалова, К.В. Аксеновой, Т.Ю. Кобзаревой .....                                                       | 209  |
| <i>А.В. Маркидонов</i>                                                                                                                                                                                                                   |      |
| Рецензия на монографию «Эволюция структуры и свойств легких сплавов при энергетических воздействиях», авторов В.Е. Громова, С.В. Коновалова, К.В. Аксеновой, Т.Ю. Кобзаревой .....                                                       | 211  |
| <i>А.Н. Смирнов</i>                                                                                                                                                                                                                      |      |
| Рецензия на серию монографий из двух книг «Водород и деформируемые сплавы Al - 1÷50% Si» и «Металлография чугуна» авторского коллектива под руководством профессора В.К. Афанасьева .....                                                | 213  |
| <i>В.А. Москинов</i>                                                                                                                                                                                                                     |      |
| Рецензия на серию монографий из двух книг «Водород и деформируемые сплавы Al - 1÷50% Si» и «Металлография чугуна» авторского коллектива под руководством профессора В.К. Афанасьева .....                                                | 214  |
| <i>Е.П. Вольнкина</i>                                                                                                                                                                                                                    |      |
| Рецензия на монографию Л.Б. Павлович, А.В. Салтанова, Н.Ю. Соловьевой «Утилизация отходов в коксохимическом производстве».....                                                                                                           | 216  |
| <i>Б.И. Ермаченко</i>                                                                                                                                                                                                                    |      |
| Рецензия на монографию «Новокузнецк. История создания генерального плана города». Автор: В.И. Магель – заслуженный архитектор РФ, профессор кафедры архитектуры СибГИУ.....                                                              | 218  |
| <i>Г.И. Стороженко</i>                                                                                                                                                                                                                   |      |
| Рецензия на монографию «Новокузнецк. История создания генерального плана города». Автор: В.И. Магель .....                                                                                                                               | 220  |
| <i>А.А. Бабенко</i>                                                                                                                                                                                                                      |      |
| Рецензия на учебное пособие «Энерготехнология твердого топлива» авторы Школлер М.Б., Протопопов Е.В., Юрьев А.Б.....                                                                                                                     | 222  |
| К 65-летию со дня рождения и 40-летию научной и педагогической деятельности Галевского Геннадия Владиславовича .....                                                                                                                     | 2244 |
| К 65-летию Андрея Ростиславовича Фастыковского.....                                                                                                                                                                                      | 2266 |
| К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ .....                                                                                                                                                                                                                 | 2288 |

УДК 625.143.48

Р.А. Шевченко<sup>1</sup>, С.Н. Кратько<sup>2</sup>, П.Е. Шишкин<sup>1</sup>, Н.А. Козырев<sup>1</sup>,  
В.И. Базайкин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет», г. Новокузнецк

<sup>2</sup>ООО «РСП-М» СТРУКТУРНОЕ ПОДРАЗДЕЛЕНИЕ  
РЕЛЬСОСВАРОЧНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ № 29 (РСП-29)

Применение методов математического моделирования для  
оптимизации технологических параметров процесса контактной  
сварки рельсов на машине К1000

В статье приведена технология сварки железнодорожных рельсов электроконтактным методом с применением пульсирующего оплавления на машинах К1000 и производственные испытания образцов на статический поперечный изгиб. Проведён многофакторный корреляционный анализ технологических параметров процесса электроконтактной сварки рельсов. На основании имеющихся данных, создана математическая модель процесса контактной сварки рельсов. Разработанная математическая модель позволяет оценить полноту влияния параметров технологического процесса контактной сварки рельсов на качество сварки. Предлагается с помощью регрессионных моделей управлять технологическими параметрами процесса контактной сварки рельсов и прогнозировать качество сварного шва.

The article shows the technology of welding railroad rails by an electrocontact method with the use of pulsating reflow on K1000 machines and production tests of samples for static transverse bending. The multifactorial correlation analysis of technological parameters of process of electrocontact welding of rails is carried out. Based on the available data, a mathematical model of the process of contact welding of rails was created. The developed mathematical model allows estimating completeness of influence of parameters of technological process of contact welding of rails on quality of welding. It is proposed with the help of regression models to control the technological parameters of the process of contact welding of rails and to predict the quality of the welded seam.

В России для сварки рельсов самым распространенным методом является электроконтактный способ (ЭС). Основную часть рельсов сварива-

ют на стационарных рельсосварочных предприятиях и небольшую часть стыков путевыми рельсосварочными самоходными машинами [1]. В стационарных условиях сварку производят с помощью машин МСР 63.01, К1000, К1100. Сварку в пути производят с помощью самоходных машин, оборудованных подвесными рельсосварочными головками МСР 80.01, К900, К922.

При электроконтактном способе торцы свариваемых рельсов нагреваются теплом, выделенном в контакте между рельсами при пропускании через них тока. К свариваемым рельсам от сварочных трансформаторов рельсосварочной машины подается напряжение, при этом рельсы перемещаются на встречу друг другу. При соприкосновении торцов происходит процесс оплавления, в момент достижения равномерно оплавленного слоя на торцах производят осадку. Во время осадки образовавшиеся оксиды на поверхности жидкого металла выдавливаются в грат.

Ранее в работах [2, 3] была проведена оптимизация параметров сварки рельсов на машине К1100. В данной работе проводили исследование по оптимизации процесса контактной сварки рельсов типа Р65 на машине К1000 в условиях РСП-29.

Технологический процесс сварки рельсов электроконтактным способом обычно разделен на несколько этапов: I этап оплавления, II этап оплавления, форсировка, осадка, гратосъем. Каждый этап характеризуется режимами сварки: силой тока  $I$ , А; напряжением  $U$ , В; величиной перемещения подвижной станины  $S$ , мм; давлением в системе  $P$ , атм; скоростью перемещения подвижной станины  $V$ , мм/с; длительностью этапа  $T$ , с. Для вышеописанных этапов при сварке на машине К1000 обычно используют значения основных параметров, приведенных в таблице 1.

Таблица 1 – Интервалы значений основных параметров сварки на машине К1000

| № | Название этапа     | Интервалы значений параметров сварки |           |         |           |            |           |
|---|--------------------|--------------------------------------|-----------|---------|-----------|------------|-----------|
|   |                    | $T$ , сек                            | $I$ , А   | $U$ , В | $P$ , атм | $V$ , мм/с | $S$ , мм  |
| 1 | I этап оплавления  | 22-45                                | 36 - 1131 | 46-427  | 12-47     | 0,00-3,00  | 2,5-3,9   |
| 2 | II этап оплавления | 75-130                               | 30-716    | 266-389 | 21-33     | 0,00-3,00  | 5,9-6,6   |
| 3 | Форсировка         | 4,1-6,8                              | 95-899    | 283-422 | 20-29     | 0,00-3,00  | 5,8-7,0   |
| 4 | Осадка             | 1,4-1,5                              | 213-1187  | 361-411 | 16-132    | 5,00-8,20  | 16,9-17,4 |
| 5 | Гратосъем          | 1                                    | 13-290    | 17-306  | 71-108    | 0,00-1,00  | 0,1-1,0   |

Весь процесс сварки полнопрофильных рельсов контролировался с записью основных параметров в память компьютера. Отслеживание параметров велось по трем значениям: минимум, максимум и среднее. Данные

параметры во время процесса сварки фиксировались и сохранялись базе данных в табличном виде, и при необходимости в графическом виде. Каждый технологический этап имеет свою продолжительность, внутри которого контролируемые параметры изменяются в широком диапазоне.

Для описания процесса контактной сварки рельсов на машине K1000 в данной работе применяли метод статистического моделирования. Независимые (входные) переменные, такие как  $I$ ,  $U$ ,  $S$ ,  $P$ ,  $V$  которые являются параметрами сварочного режима, влияющими на качество сварного шва рельсов. Результатами испытания являются значения усилия, возникающего при изгибе  $P_{изг}$ , кН и значения стрелы прогиба  $f_{пр}$ , мм при которых происходит разрушение контрольного образца, либо максимальные значения данных показателей, если образец не разрушился во время испытаний. В качестве зависимых (выходных) параметров выбраны величина усилия, возникающая при изгибе  $P_{изг}$  (кН) и значение стрелы прогиба  $f_{пр}$  (мм), при которых происходит разрушение контрольного образца.

После обработки данных производственного контроля и параметров сварочных режимов были получены таблицы для каждого этапа, в которых приведены основные фактические значения сварочных режимов на машине контактной стыковой сварки K1000 и результатов испытаний сварных соединений, состоящие из 100 наблюдений.

На основе полученных производственных данных была проведена их статистическая обработка с использованием пакета STATISTICA 6.0. Оценка влияния параметров сварочных режимов на величину усилия, возникающего при изгибе  $P_{изг}$  (кН) и значение стрелы прогиба  $f_{пр}$  (мм) проводилась средствами многофакторного корреляционного анализа, который позволяет изучить закономерности изменения результирующего показателя в зависимости от поведения различных факторов, описанного в работе [4].

Вычисление коэффициентов регрессионных уравнений производили матричным методом с использованием пакета STATISTICA 6.0. Уравнение регрессии представлено в следующем виде:

$$Y = B_0 + B_1 \cdot X_1 + B_2 \cdot X_2 + \dots + B_n \cdot X_n, \quad (1)$$

где  $Y$  – зависимый (выходной) параметр;  $X_1, X_2, \dots, X_n$  – независимые (входные) переменные;  $B_0, B_1, B_2, \dots, B_n$  – коэффициенты регрессии.

На каждом этапе (I этап оплавления, II этап оплавления, форсировка, осадка, гратосъем) были построены регрессионные модели с выходными параметрами  $P_{изг}$  и  $f_{пр}$  и рассчитаны коэффициенты детерминации:

– модели на I этапе оплавления

$$P_{изг} = 8926,75 - 176,78 \cdot V_{ср} + 57,99 \cdot V_{мин} - 80,01 \cdot V_{макс} + 19,73 \cdot S_{прип} - 1,52 \cdot S_{поз} - 118,99 \cdot P_{ср} - 38,04 \cdot P_{мин} + 12,92 \cdot P_{макс} - 8,08 \cdot U_{ср} - 0,06 \cdot U_{мин} + 2,72 \cdot U_{макс} - 1,28 \cdot I_{ср} - 2,02 \cdot I_{мин} - 0,04 \cdot I_{макс} - 0,72 \cdot T_{длит}; R^2 = 0,26; \quad (1.1)$$

$$f_{пр} = 2318,77 - 36,54 \cdot V_{ср} - 25,96 \cdot V_{мин} - 3,40 \cdot V_{макс} + 5,97 \cdot S_{прип} + 0,31 \cdot S_{поз} -$$

$$-14,71 \cdot P_{\text{ср}} - 9,62 \cdot P_{\text{мин}} + 5,35 \cdot P_{\text{макс}} - 3,45 \cdot U_{\text{ср}} - 0,03 \cdot U_{\text{мин}} + 0,22 \cdot U_{\text{макс}} - \\ - 0,32 \cdot I_{\text{ср}} - 1,39 \cdot I_{\text{мин}} - 0,11 \cdot I_{\text{макс}} - 0,33 \cdot T_{\text{длит}}; R^2 = 0,16; \\ (1.2)$$

– модели на II этапе оплавления

$$P_{\text{изг}} = 1306,59 + 26,10 \cdot V_{\text{ср}} - 221,94 \cdot V_{\text{мин}} + 77,83 \cdot V_{\text{макс}} - 1,10 \cdot S_{\text{прип}} - 2,14 \cdot S_{\text{поз}} - \\ - 41,04 \cdot P_{\text{ср}} + 28,79 \cdot P_{\text{мин}} + 118,61 \cdot P_{\text{макс}} + 25,56 \cdot U_{\text{ср}} - 31,03 \cdot U_{\text{мин}} + 2,05 \cdot U_{\text{макс}} - \\ - 3,47 \cdot I_{\text{ср}} + 1,54 \cdot I_{\text{мин}} + 0,64 \cdot I_{\text{макс}} - 0,55 \cdot T_{\text{длит}} - 0,25 \cdot T_{\text{нач}}; R^2 = 0,25; \quad (2.1) \\ f_{\text{пр}} = -2397,14 - 37,61 \cdot V_{\text{ср}} - 50,36 \cdot V_{\text{мин}} + 57,72 \cdot V_{\text{макс}} + 5,94 \cdot S_{\text{прип}} + 0,51 \cdot S_{\text{поз}} - \\ - 22,82 \cdot P_{\text{ср}} + 21,44 \cdot P_{\text{мин}} + 53,68 \cdot P_{\text{макс}} - 13,89 \cdot U_{\text{ср}} + 16,47 \cdot U_{\text{мин}} + 0,95 \cdot U_{\text{макс}} - \\ - 2,03 \cdot I_{\text{ср}} + 0,45 \cdot I_{\text{мин}} + 0,92 \cdot I_{\text{макс}} - 0,13 \cdot T_{\text{длит}} + 0,06 \cdot T_{\text{нач}}; R^2 = 0,26; \\ (2.2)$$

– модели на этапе форсировки

$$P_{\text{изг}} = 7709,30 - 80,40 \cdot V_{\text{ср}} + 80,08 \cdot V_{\text{мин}} - 3,34 \cdot V_{\text{макс}} + 8,78 \cdot S_{\text{прип}} + 5,73 \cdot S_{\text{поз}} + \\ + 6,45 \cdot P_{\text{ср}} + 3,73 \cdot P_{\text{мин}} - 3,73 \cdot P_{\text{макс}} - 30,15 \cdot U_{\text{ср}} + 2,09 \cdot U_{\text{мин}} + 15,48 \cdot U_{\text{макс}} - \\ - 0,63 \cdot I_{\text{ср}} + 0,72 \cdot I_{\text{мин}} - 0,04 \cdot I_{\text{макс}} - 5,36 \cdot T_{\text{длит}} - 0,56 \cdot T_{\text{нач}}; R^2 = 0,22; \quad (3.1) \\ f_{\text{пр}} = 4081,96 - 34,12 \cdot V_{\text{ср}} + 19,25 \cdot V_{\text{мин}} - 5,49 \cdot V_{\text{макс}} - 0,67 \cdot S_{\text{прип}} + 2,09 \cdot S_{\text{поз}} + \\ + 3,07 \cdot P_{\text{ср}} + 10,95 \cdot P_{\text{мин}} - 3,59 \cdot P_{\text{макс}} - 16,26 \cdot U_{\text{ср}} + 0,88 \cdot U_{\text{мин}} + 5,80 \cdot U_{\text{макс}} - \\ - 0,29 \cdot I_{\text{ср}} + 0,52 \cdot I_{\text{мин}} - 0,02 \cdot I_{\text{макс}} - 1,28 \cdot T_{\text{длит}} - 0,09 \cdot T_{\text{нач}}; R^2 = 0,12; \quad (3.2)$$

– модели на этапе осадки

$$P_{\text{изг}} = 7928,54 - 70,16 \cdot V_{\text{ср}} + 0,03 \cdot V_{\text{макс}} - 28,50 \cdot S_{\text{прип}} + 4,99 \cdot S_{\text{поз}} + 2,88 \cdot P_{\text{ср}} + \\ + 1,21 \cdot P_{\text{мин}} + 14,62 \cdot P_{\text{макс}} - 8,51 \cdot U_{\text{ср}} - 0,21 \cdot U_{\text{мин}} + 3,06 \cdot U_{\text{макс}} - 10,63 \cdot I_{\text{ср}} + \\ + 0,67 \cdot I_{\text{мин}} + 10,22 \cdot I_{\text{макс}} - 45,47 \cdot T_{\text{длит}} - 0,48 \cdot T_{\text{нач}}; R^2 = 0,16; \quad (4.1) \\ f_{\text{пр}} = 3518,95 - 73,49 \cdot V_{\text{ср}} - 0,49 \cdot V_{\text{макс}} - 22,23 \cdot S_{\text{прип}} + 2,20 \cdot S_{\text{поз}} + 5,56 \cdot P_{\text{ср}} + \\ + 1,62 \cdot P_{\text{мин}} + 11,96 \cdot P_{\text{макс}} + 10,93 \cdot U_{\text{ср}} - 8,80 \cdot U_{\text{мин}} - 2,83 \cdot U_{\text{макс}} + 0,58 \cdot I_{\text{ср}} - \\ - 0,15 \cdot I_{\text{мин}} - 0,76 \cdot I_{\text{макс}} - 52,15 \cdot T_{\text{длит}} - 0,11 \cdot T_{\text{нач}}; R^2 = 0,13; \quad (4.2)$$

– модели на этапе гратосъема

$$P_{\text{изг}} = 2515,56 - 562,14 \cdot V_{\text{ср}} + 75,23 \cdot S_{\text{прип}} + 7,42 \cdot S_{\text{поз}} + 96,69 \cdot P_{\text{ср}} - 46,47 \cdot P_{\text{мин}} - \\ - 52,16 \cdot P_{\text{макс}} + 15,03 \cdot U_{\text{ср}} + 10,54 \cdot U_{\text{мин}} - 11,55 \cdot U_{\text{макс}} + 14,06 \cdot I_{\text{ср}} - 23,37 \cdot I_{\text{мин}} + \\ + 2,22 \cdot I_{\text{макс}} - 0,58 \cdot T_{\text{нач}}; R^2 = 0,21; \quad (5.1) \\ f_{\text{пр}} = -549,68 - 388,49 \cdot V_{\text{ср}} + 71,85 \cdot V_{\text{макс}} + 3,20 \cdot S_{\text{поз}} + 37,58 \cdot P_{\text{ср}} - 17,04 \cdot P_{\text{мин}} - \\ - 22,16 \cdot P_{\text{макс}} + 14,93 \cdot U_{\text{ср}} - 14,36 \cdot U_{\text{мин}} - 1,74 \cdot U_{\text{макс}} + 6,48 \cdot I_{\text{ср}} - 7,79 \cdot I_{\text{мин}} - \\ - 1,30 \cdot I_{\text{макс}} - 0,14 \cdot T_{\text{нач}}; R^2 = 0,12; \quad (5.2)$$

Коэффициенты детерминации для каждой модели имеют низкое значение, это говорит о том, что входные переменные на каждом отдельном этапе процесса контактной сварки не в полной мере отражают полноту своего влияния на выходные параметры. Очевидно, что каждый из этапов оказывают влияние на выходные параметры, но полное влияние входных переменных можно оценить только в совокупности этих этапов.

Исключив неудовлетворяющие параметры по t-критерию Стьюдента и собрав эти параметры каждого этапа в одном уравнении получили следующие модели, описывающие весь процесс в целом:

$$P_{\text{изг}} = 1773,18 - 0,79 \cdot T_{\text{нач5}} - 1,34 \cdot I_{\text{ср4}} + 138,35 \cdot V_{\text{мин3}} + 7,43 \cdot U_{\text{макс3}} + \\ + 91,65 \cdot V_{\text{макс2}} + 1,47 \cdot U_{\text{макс2}} + 6,95 \cdot P_{\text{макс1}} + 16,41 \cdot S_{\text{прип1}} - 36,77 \cdot P_{\text{мин1}};$$

$$R^2 = 0,71; \quad (6.1)$$

$$f_{\text{пр}} = -3199,48 + 13,4 \cdot U_{\text{ср5}} - 3,57 \cdot I_{\text{мин5}} - 0,05 \cdot T_{\text{мин5}} - 62,64 \cdot V_{\text{ср4}} + 14,11 \cdot P_{\text{ср4}} - 0,01 \cdot I_{\text{мин4}} - 1,31 \cdot I_{\text{макс4}} + 3,32 \cdot S_{\text{мин3}} + 34,71 \cdot V_{\text{макс2}} + 10,78 \cdot S_{\text{прип2}} + 31,06 \cdot P_{\text{мин2}} + 1,11 \cdot U_{\text{макс2}} + 1,17 \cdot I_{\text{макс2}} + 3,65 \cdot P_{\text{макс1}}; R^2 = 0,66; \quad (6.2)$$

Полученные уравнения регрессии учитывают влияние каждого технологического этапа процесса контактной сварки рельсов на выходные свойства. Данные модели имеют достаточно высокие коэффициенты детерминации, по t-критерию Стьюдента коэффициенты регрессии всех входных переменных значимы, а также модель является адекватной по F-критерию Фишера (для  $P_{\text{из}}$  при уровне значимости  $\alpha = 0,05$ :  $F_{\text{факт}} = 18,9 > F_{\text{кр}} = 0,49$ ; для  $f_{\text{пр}}$  при уровне значимости  $\alpha = 0,05$ :  $F_{\text{факт}} = 8,76 > F_{\text{кр}} = 0,54$ ).

Адекватность данных уравнений регрессии (6.1), (6.2) проверялась по показателю средней ошибки аппроксимации [5]:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left| \frac{Y_i - \tilde{Y}_i}{Y_i} \right| \cdot 100, \quad (2)$$

где  $m$  – количество наблюдений;  $\tilde{Y}_i$  – вычисленное значение результирующего показателя;  $Y_i$  – фактическое значение результирующего показателя.

Для  $P_{\text{из}}$  средняя ошибка аппроксимации равна:  $\bar{\varepsilon} = 2,5 \%$ .

Для  $f_{\text{пр}}$  средняя ошибка аппроксимации равна:  $\bar{\varepsilon} = 8 \%$ .

Анализ распределения остатков показал, что явного отклонения от нормального закона распределения не наблюдается, т. е. остатки распределены случайно и в модели отсутствуют неучтенные параметры, влияющие на выходной параметр. Модель пригодна для принятия решений и для прогнозирования.

**Выводы:** Разработаны математические модели процесса контактной сварки рельсов на машине K1000, позволяющие оценить полноту влияния параметров технологического процесса контактной сварки рельсов на качество сварного шва:

$$P_{\text{изг}} = 1773,18 - 0,79 \cdot T_{\text{нач5}} - 1,34 \cdot I_{\text{ср4}} + 138,35 \cdot V_{\text{мин3}} + 7,43 \cdot U_{\text{макс3}} + 91,65 \cdot V_{\text{макс2}} + 1,47 \cdot U_{\text{макс2}} + 6,95 \cdot P_{\text{макс1}} + 16,41 \cdot S_{\text{прип1}} - 36,77 \cdot P_{\text{мин1}}, R^2 = 0,71;$$

$$f_{\text{пр}} = -3199,48 + 13,4 \cdot U_{\text{ср5}} - 3,57 \cdot I_{\text{мин5}} - 0,05 \cdot T_{\text{мин5}} - 62,64 \cdot V_{\text{ср4}} + 14,11 \cdot P_{\text{ср4}} - 0,01 \cdot I_{\text{мин4}} - 1,31 \cdot I_{\text{макс4}} + 3,32 \cdot S_{\text{мин3}} + 34,71 \cdot V_{\text{макс2}} + 10,78 \cdot S_{\text{прип2}} + 31,06 \cdot P_{\text{мин2}} + 1,11 \cdot U_{\text{макс2}} + 1,17 \cdot I_{\text{макс2}} + 3,65 \cdot P_{\text{макс1}}, R^2 = 0,66.$$

С помощью регрессионных моделей предлагается прогнозировать качество сварного шва и управлять технологическими параметрами процесса контактной сварки рельсов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козырев Н.А. Современные методы получения бесстыковых рельсов / Н.А. Козырев, А.А. Усольцев, Р.Е. Крюков, Р.А. Шевченко, П.Е. Шишкин // Инновации в топливно-энергетическом комплексе и машиностроении: сборник трудов Международной научно-практической конференции 18-21 апреля 2017 года / под ред. А. Н. Смирнова. – Кемерово: КузГТУ, 2017. – С. 123 - 127.
2. Шевченко Р.А. Статистическая модель управления процессами контактной сварки рельсов / Р.А. Шевченко, Н.А. Козырев, А.А. Усольцев, А.О. Патрушев, П.Е. Шишкин // Вестник СибГИУ. – 2017. – № 1 (19). – С. 4 – 8.
3. Шевченко Р.А. Оптимизация технологических параметров процесса контактной стыковой сварки рельсов / Р.А. Шевченко, Н.А. Козырев, А.А. Усольцев, Л.П. Бащенко, С.В. Князев // Вестник СибГИУ. – 2017. – № 1 (19). – С. 12 – 15.
4. Анализ данных в материаловедении. Ч. 2. Регрессионный анализ: учеб. пособие / А. С. Мельниченко. – М.: Изд-во Дом МИСиС, 2014. – 87 с.
5. Практикум по теории статистики: Учеб. пособие / Р. А. Шмойлова и [др]; под ред. Р. А. Шмойловой. – 2-е изд., перераб. И доп. – М.; Финансы и статистические, 2006. – 416 с.

УДК 625.143.48

Р.А. Шевченко<sup>1</sup>, В.И. Базайкин<sup>1</sup>, С. Н. Кратько<sup>2</sup>, Н.А. Козырев<sup>1</sup>,  
А.О. Патрушев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет», г. Новокузнецк

<sup>2</sup>ООО «РСП-М» СТРУКТУРНОЕ ПОДРАЗДЕЛЕНИЕ  
РЕЛЬСОСВАРОЧНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ № 29 (РСП-29)

АНАЛИЗ ТОКОВОГО РЕЖИМА РАБОТЫ СВАРОЧНОЙ  
МАШИНЫ К1000 ПРИ СВАРКЕ РЕЛЬСОВ НА ЭТАПЕ  
ОПЛАВЛЕНИЯ

Представлены результаты анализа токового режима работы рельсосварочной машины К1100. Используются записи тока в первичной цепи трансформатора К1100 в зависимости от времени в форме дис-

**Вестник горно-металлургической секции РАЕН.  
Отделение металлургии**

*Сборник научных трудов*

Компьютерный набор Темлянцева Е.Н.

Подписано в печать 22.09.2017 г.

Формат бумаги 60×84 1/16. Бумага писчая. Печать офсетная.  
Усл.печ.л. 13,5 Уч.-изд.л. 14,4 Тираж 300 экз. Заказ № 447

Сибирский государственный индустриальный университет  
654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42.  
Издательский центр СибГИУ