Оригинальная статья
УДК 669.1.17
DOI 10.17073/0368-0797-2022-4-232-239
https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2293

Исследование закономерностей процессов в искровом промежутке при контактной стыковой сварке железнодорожных рельсов

Р. А. Шевченко, А. Б. Юрьев, Н. А. Козырев, А. Р. Михно

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

Аннотация. Современное оборудование для контактной стыковой сварки железнодорожных рельсов имеет огромное количество технологических параметров (входных факторов), влияющих на качество получаемого сварного соединения. Такое количество параметров не позволяет в полной мере подобрать оптимальные режимы сварки. Изучение процессов, протекающих в искровом промежутке (образование микроконтактов, увеличение или уменьшение их площади поперечного сечения, взрыв образовавшихся микроконтактов), позволит определить количество и равномерность вложенного тепла при сварке рельсов. Полученные знания сократят количество влияющих факторов на качество сварного стыка. С использованием большого количества статистических данных исследованы процессы, протекающие в искровом промежутке при контактной стыковой сварке железнодорожных рельсов типа Р65 категории ДТ350 на рельсосварочной машине К1000. При изучении влияния характера перемещения подвижной плиты сварочной машины во время оплавления на силу сварочного тока, определено, что зависимости между данными величинами нет. Предположительно, распределение силы сварочного тока имеет случайный характер, изменяющегося в результате процессов образования, существования и взрыва большого количества мельчайших электрических контактов. Исходя из анализа распределения частот определено, что распределение сопротивления искрового промежутка не соответствует нормальному закону распределения. При увеличении выборки отклонение от него усиливается, визуально гистограмма описывает гамма-распределение. С помощью закона гамма-распределения смоделирована сила сварочного тока при контактной стыковой сварке оплавлением. Результаты исследований планируется применять для моделирования тепловых процессов и формирования структуры металла шва и зон термического влияния сварного соединения железнодорожных рельсов.

Ключевые слова: контактная стыковая сварка, рельсовая сталь, искровой промежуток, сила тока, электрическое сопротивление, гамма-распределение

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

Для цитирования: Шевченко Р.А., Юрьев А.Б., Козырев Н.А., Михно А.Р. Исследование закономерностей процессов в искровом промежутке при контактной стыковой сварке железнодорожных рельсов // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 4. С. 232–239. *https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-4-232-239*

Original article

Investigation of processes in spark gap during contact butt welding of railway rails

R. A. Shevchenko, A. B. Yur'ev, N. A. Kozyrev, A. R. Mikhno

Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654007, Russian Federation)

Abstract. Modern equipment for contact butt welding of railway rails has a huge number of technological parameters (input factors) that affect the quality of the resulting welded joint. These parameters do not allow the optimal welding modes to be fully selected. The study of the processes occurring in the spark gap (formation of microcontacts, increase or decrease in their cross-sectional area, explosion of the resulting microcontacts) will make it possible to determine the amount and uniformity of the invested heat during rail welding. The acquired knowledge will reduce the number of influencing factors on quality of the welded joint. Using a large amount of statistical data, the authors have investigated the processes occurring in the spark gap during contact butt welding of railway rails of R65 type of DT350 category on K1000 rail welding machine. When studying the influence of movable plate movement of the welding machine during reflow on the strength of welding current, it was determined that there is no dependence between these values. The random nature of distribution of the welding current values is assumed, changing as a result of the processes of formation, existence and explosion of a large number of tiny electrical contacts. Based on the analysis of frequency distribution, it is certain that distribution of the spark gap resistance does not correspond to the normal distribution law. As the sample increases, the deviation from it increases; visually the histogram describes the gamma distribution. With the help of the gamma distribution law, the welding current forces during contact butt welding were modeled

© Р. А. Шевченко, А. Б. Юрьев, Н. А. Козырев, А. Р. Михно, 2022

by reflow. The research results are planned to be used to simulate thermal processes and formation of the structure of weld metal and the zones of thermal influence of railway rails welded joint.

Keywords: contact butt welding, rail steel, spark gap, current strength, electrical resistance, gamma distribution

Funding: The research was supported by the RFBR and the Kemerovo region – Kuzbass within the framework of the scientific project no. 20-48-420003 "Development of physico-chemical and technological foundations for creating a fundamentally new method of welding differentially heat-strengthened railway rails".

For citation: Shevchenko R.A., Yur'ev A.B., Kozyrev N.A., Mikhno A.R. Investigation of processes in spark gap during contact butt welding of railway rails. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 4, pp. 232–239. (In Russ.). https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-4-232-239

Введение

Железнодорожная отрасль РФ имеет стратегическое значение. Она является связующим звеном единой экономической системы, обеспечивающим стабильную деятельность промышленных предприятий, а также своевременную доставку жизненно важных грузов в отдаленные районы страны. Она является самым доступным транспортом для миллионов граждан. По данным ОАО «РЖД» на 2019 г. развернутая длина главных путей является одной из самых протяженных в мире и составляет свыше 124 тыс. км [1 – 4].

Одним из основных элементов строения железных дорог являются рельсы. В настоящее время как на железных дорогах Российской Федерации, так и за рубежом происходит отказ от звеньевой конструкции пути (болтового соединения рельсов). Одним из основных недостатков звеньевого пути является наличие стыка, который способствует образованию дефектов и преждевременному выходу рельсов из эксплуатации. Разработка новых технологий, позволяющих обеспечить возможность получения бесстыкового железнодорожного пути, является актуальным направлением в развитии современного общества [5 – 8]. Следует принять во внимание, что эксплуатация железнодорожного пути в стране происходит в сложных климатических и эксплуатационных условиях (в стране используются пути совмещенного типа, а не как в Европейских странах – раздельного для промышленного и пассажирского потоков) [8 – 10].

Исследованию закономерностей при контактной стыковой сварке железнодорожных рельсов в последнее время уделяется большое внимание. Особенно сложны для математического моделирования процессы, протекающие в искровом промежутке [11 – 15]. При электроконтактном способе торцы свариваемых рельсов нагреваются теплом, выделенным в контакте между рельсами при пропускании через них тока. Напряжение подается к свариваемым рельсам от сварочных трансформаторов рельсосварочной машины, рельсы перемещаются навстречу друг другу. При соприкосновении торцов возникают единичные контакты, так как касание их происходит не по всей площади рельса, а по микронеровностям. Образующиеся контакты быстро нагреваются и взрываются. Поскольку торцы перемещаются навстречу друг другу, то вместо взорвавшихся контактов образуются новые. Сопротивление каждого элемента и плотность тока, протекающего через него, велики, поэтому контакты нагреваются очень быстро. В местах соприкосновения металл расплавляется и взрывается раньше, чем площадь контакта успевает значительно увеличиться в процессе сближения торцов рельсов. После взрыва элементарных контактов на их месте образуются углубления (кратеры). Новые контакты возникают на месте кратеров лишь через некоторое время, которое определяется скоростью подачи свариваемых рельсов и первоначальной глубиной кратера. В любой момент времени (за исключением моментов замыкания рельсов) общая площадь всех контактов значительно меньше площади сечения оплавляемых деталей. За время существования элементарных контактов участки торцов рельсов, примыкающие к контактам, нагреваются до высоких температур. Часть расплавленного металла при взрыве перемычек выбрасывается наружу в виде брызг, в кратерах остается узкий слой нагретого, но не расплавленного металла и пленка жидкого металла, оставшегося после взрыва [7, 16 – 18].

Целью настоящей работы является исследование закономерности изменения электрического сопротивления в искровом промежутке при контактной стыковой сварке железнодорожных рельсов.

Материал и методика исследований

Для исследования вырезали два образца полнопрофильных рельсов типа Р65 категории ДТ350 длиной не менее 600 мм. Контактную стыковую сварку рельсов проводили на рельсосварочной машине К1000. Весь процесс сварки полнопрофильных рельсов контролировали с записью основных параметров в память компьютера. Параметры во время процесса сварки фиксировали и сохраняли в табличном виде (при необходимости в графическом виде). Каждый технологический этап имеет свою продолжительность, внутри него контролируемые параметры изменяются в широком диапазоне.

Для описания процесса контактной сварки рельсов на машине К1000 в настоящей работе применяли метод статистического моделирования. Исследовали силу тока при сварке I, напряжение при сварке U, скорость оплавления V, которые являются параметрами свароч-

ного режима, влияющими на качество сварного шва рельсов. Данные производственного контроля и параметров сварочных режимов для каждого этапа сведены в таблицы, в которых приведены основные фактические значения сварочных режимов на машине контактной стыковой сварки К1000, а также результаты испытаний сварных соединений.

Результаты исследований

Во время паузы между взрывами тепло распространяется от нагретого слоя в глубь металла. После оплавления торцов на некоторую величину температурное поле определяется количеством возникших контактов, длительностью пауз между существованием контактов, количеством выбрасываемого при взрывах металла и другими факторами.

О характере существования множества электрических микрокроконтактов можно судить по графику изменения силы тока и напряжения. Используя закон Ома, можно получить сопротивление искрового промежутка в разные моменты времени, которое в основном зависит от состояний электрических микроконтактов (рис. 1).

При устойчивом оплавлении действующее значение напряжения на свариваемых деталях мало отличается от напряжения холостого хода сварочного трансформатора. При управлении процессом сварки на современных сварочных машинах принято допущение, что характер изменения тока оплавления определяется законом перемещения подвижной плиты и каждому значению скорости соответствует определенное значение сварочного тока [19].

При построении графика изменения сварочного тока оплавления во времени и наложением графика изменения скорости перемещения подвижной плиты никаких закономерностей не наблюдается (рис. 2). Значение коэффициента корреляции $R = 0{,}25$ также подтверждает отсутствие взаимосвязи тока оплавления со скоростью перемещения.

Характер изменения тока оплавления зависит от сопротивления искрового промежутка, который, в свою очередь, зависит от процессов образования, существования и взрыва большого количества мельчайших электрических контактов. Характер изменения тока оплавления при постоянных условиях (постоянном напряжении, скорости передвижения подвижной плиты) является случайным.

Для моделирования процесса контактной сварки оплавлением можно применить законы распределения случайной величины. Так как для случайного процесса необходимо, чтобы условия были постоянны (в рассматриваемом случае напряжение и скорость передвижения подвижной плиты), для определения закона распределения выбраны значения сопротивления при разных скоростях, построены частотные гистограммы (рис. 3).

Исходя из анализа построенных гистограмм распределения частот определено, что распределение сопротивления искрового промежутка не соответствует нормальному закону распределения и при увеличении выборки отклонение от него усиливается; визуально гистограмма описывает гамма-распределение.

Гамма-распределение зависит от двух параметров: α (определяет форму распределения) и β (определяет масштаб). Плотность вероятности этого распределения задается следующей формулой:

$$\rho(x) = \frac{1}{\beta^{\alpha}\Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{\frac{x}{\beta}};\ x \geq 0,$$

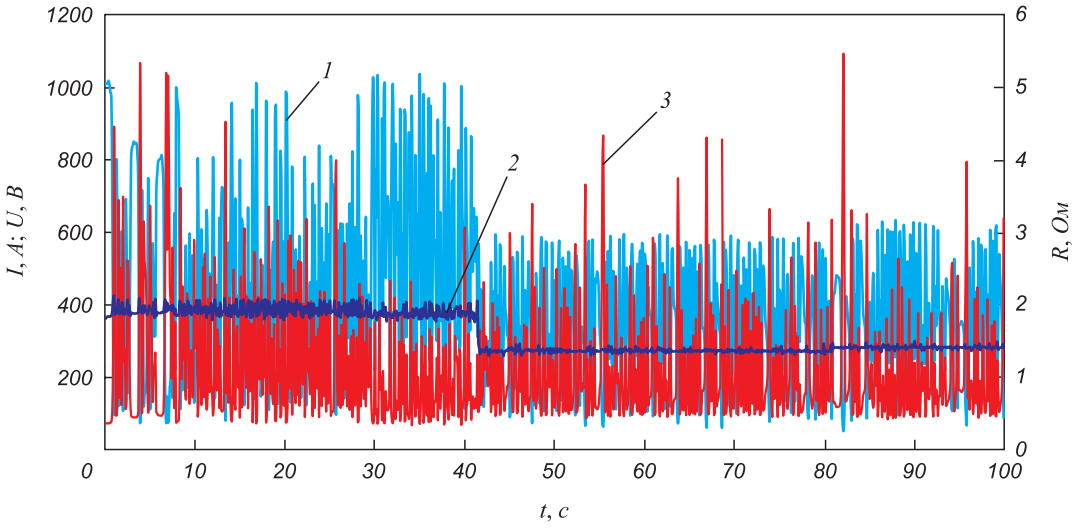

Рис. 1. Распределение силы тока (*1*), напряжения (*2*) и сопротивления (*3*) в процессе сварки рельсов

Fig. 1. Distribution of current (*1*), voltage (*2*) and resistance (*3*) during rail welding

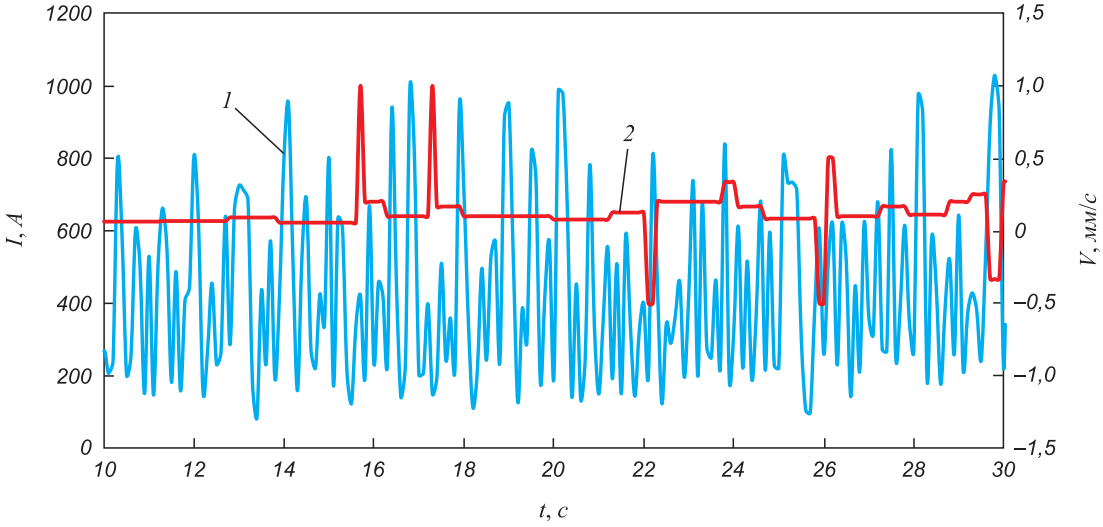

Рис. 2. Изменения сварочного тока (*1*) и скорости перемещения (*2*) подвижной плиты во времени

Fig. 2. Graph of changes in welding current (*1*) and movement rate (*2*) of the movable plate in time

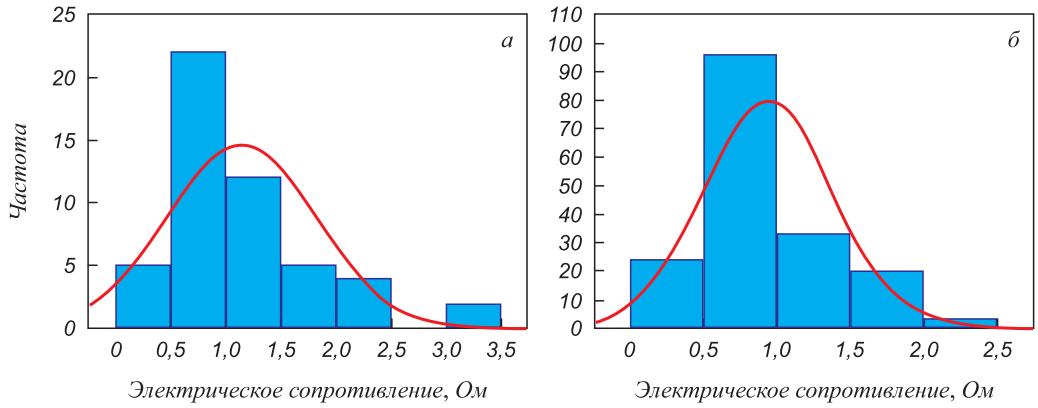

Рис. 3. Гистограмма распределения частот электрического сопротивления искрового промежутка при разных скоростях: *а* – скорость 0,2 мм/с (выборка из 50 значений при одном эксперименте); *б* – скорость 0,5 мм/с (выборка из 176 значений при десяти экспериментах)

Fig. 3. Distribution histogram of electrical resistance frequencies of the spark gap at different speeds: *а* – speed of 0.2 mm/s (a sample of 50 values in one experiment); *б* – speed of 0.5 mm/s (a sample of 176 values in 10 experiments)

где x – случайная величина, в рассматриваемом случае суммарное электрическое сопротивление микроконтактов в искровом промежутке; $\Gamma(\alpha) = \int x^{\alpha-1} e^{-x} dx$ – гамма-функция (при $a > 0$).

Выбрав ряд значений изменения сопротивления искрового промежутка (x_i) при скорости 0,2 мм/с, определены параметры α и β гамма-распределения по формулам:

$$\alpha = \frac{\overline{x}^2}{s^2};\ \beta = \frac{s^2}{\overline{x}};$$

где $\overline{x}$ – выборочное среднее; s^2 – выборочная дисперсия.

Рассчитаны вероятности данных x_i и обратные функции, то есть смоделированы значения с заданными параметрами распределения ($\alpha = 2{,}79$; $\beta = 0{,}41$) и известными вероятностями $p_x(x_i)$ (рис. 4).

Коэффициент корреляции между фактическими и моделируемыми значениями составляет 0,94. Сравнивая реальные значения со значениями модели, можно сделать вывод о том, что гамма-распределение описывает случайный характер образования, существования и взрыва электрических микроконтактов в искровом промежутке.

Чтобы смоделировать весь процесс сварки, необходимо определить влияние скорости перемещения подвижной станины на ток оплавления, точнее на сопротивление, которое зависит от множества контактов в искровом промежутке. Для выборки значений электрического сопротивления при разных скоростях перемещения подвижной станины рассчитаны параметры гамма-распределения (α, β). Для соответствующих скоростей (взятых как входные параметры) и значений α и β (взятых как выходные) построены уравнения регрессии.

При увеличении данных выборки точность описания уравнением регрессии параметров распределения α и β с помощью скорости перемещения подвижной плиты возрастает. При выборке из одного эксперимента линейные уравнения для параметров α и β имеют коэффициенты детерминации 0,33 и 0,22 соответственно (рис. 5, *а*), а при выборке из десяти экспериментов коэффициенты детерминации составляют 0,83 и 0,47 (рис. 5, *б*).

Полученные регрессии необходимы для определения параметров гамма-распределения значений сопротивления искрового промежутка в зависимости от скорости подвижной плиты. Для определения параметров по линейному закону необходимо воспользоваться уравнениями регрессии:

$$\alpha = \begin{cases} 7,28V + 1,15;\ V \geq 0\ \left(R^2 = 0,83\right); \\ -3,02V + 1,28;\ V > 0\ \left(R^2 = 0,69\right); \end{cases}$$

$$\beta = \begin{cases} -1,16V + 0,71;\ V \geq 0\ \left(R^2 = 0,47\right); \\ 0,74V + 0,77;\ V > 0\ \left(R^2 = 0,48\right). \end{cases}$$

Для определения параметров α и β с помощью нелинейной регрессии необходимо воспользоваться уравнениями:

$$\alpha = 7,65V^4 + 9,75V^3 + 5,06V^2 - 0,36V + 2,17\ (R^2 = 0,71);$$

$$\beta = -1,54V^3 - 1,74V^2 + 0,28V + 0,57\ (R^2 = 0,37).$$

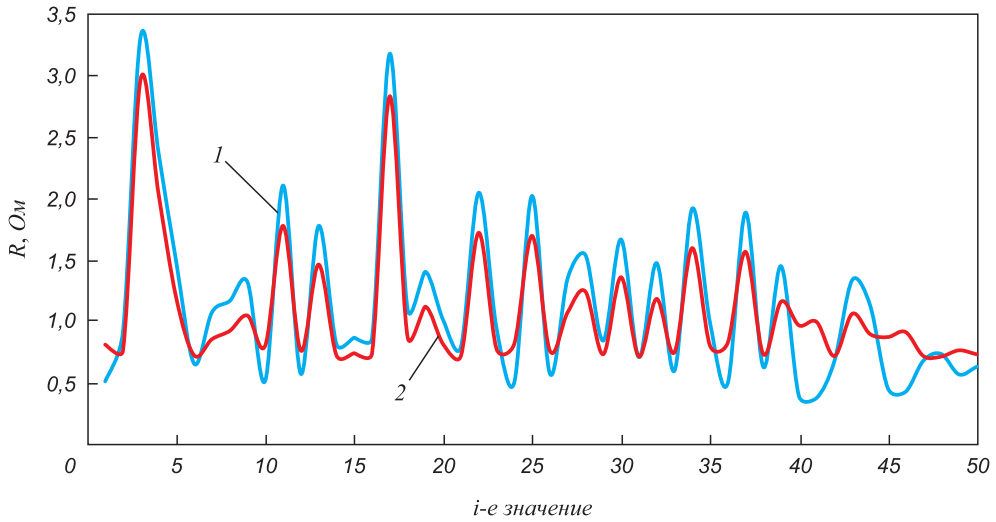

Рис. 4. Электрическое сопротивление в искровом промежутке при скорости перемещения подвижной станины 0,2 мм/с:
1 и *2* – фактические и смоделированные значения

Fig. 4. Electrical resistance in the spark gap at a moving frame speed of 0.2 mm/s:
1 and *2* – actual and simulated values

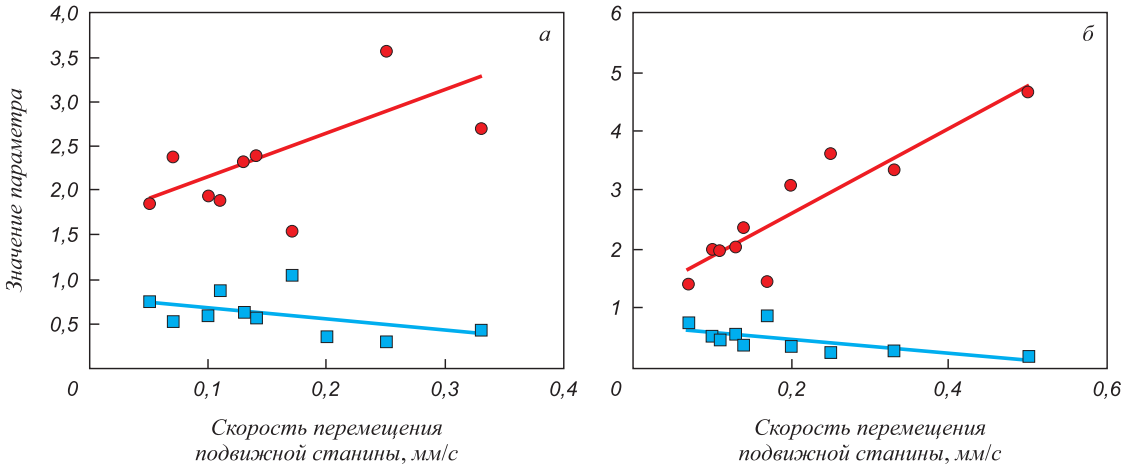

Рис. 5. Распределение параметров α (●) и β (■) в зависимости от скорости перемещения подвижной станины при выборках из одного (*а*) и десяти (*б*) экспериментов

Fig. 5. Distribution of parameters α (●) and β (■) depending on movement speed of the movable frame with samples from one (*а*) and ten (*б*) experiments

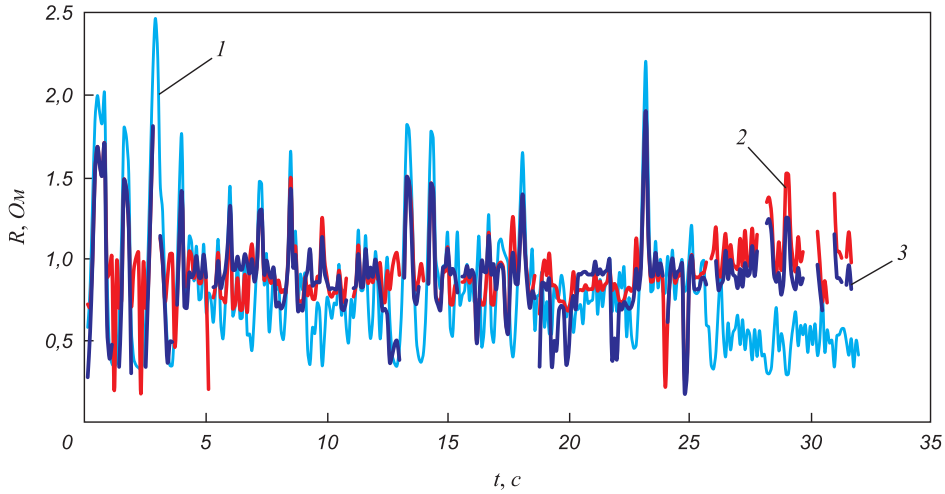

Рис. 6. Фактические (*1*) и смоделированные (значения модели по линейным уравнениям (*2*) и по полиномным значениям (*3*)) сопротивления искрового зазора

Fig. 6. Actual (*1*) and simulated values (model values by linear equations (*2*) and polynomial values (*3*)) of the spark gap resistance

Используя данные зависимости, смоделирован первый этап оплавления процесса сварки рельсов типа Р65 на машине контактной стыковой сварки рельсов К1000 по заданным вероятностям (по реальным значениям) (рис. 6).

Модель, полученная по линейным уравнениям, имеет коэффициент корреляции (с реальными значениями) 0,46. Модель, полученная по полиномиальным уравнениям, имеет коэффициент корреляции (с реальными значениями) 0,61. Вторая модель описывает процесс лучше, возможно, что увеличив выборку, можно повысить точность предсказания значения.

Рассматриваемый метод можно применять для моделирования процессов сварки с заданными параметрами режимов сварки, варьируя изменения скорости перемещения подвижной плиты; можно наблюдать за изменением сварочного тока оплавления, тем самым судить о характере существования образовавшихся электрических контактов. Моделирование процесса таким образом поможет в создании новых принципов управления процессом оплавления, вследствие получения представления о распределении суммарной площади микроконтактов, образующихся в процессе оплавления. Для моделирования процесса случайных значений тока с гамма-распределением можно использовать таблицы или генератор случайных чисел для задания значений вероятности $p_x(x_i)$ [20]. Пример такой модели представлен на рис. 7.

Выводы

Исследованы закономерности процессов контактной стыковой сварки, которые описывают происходящие

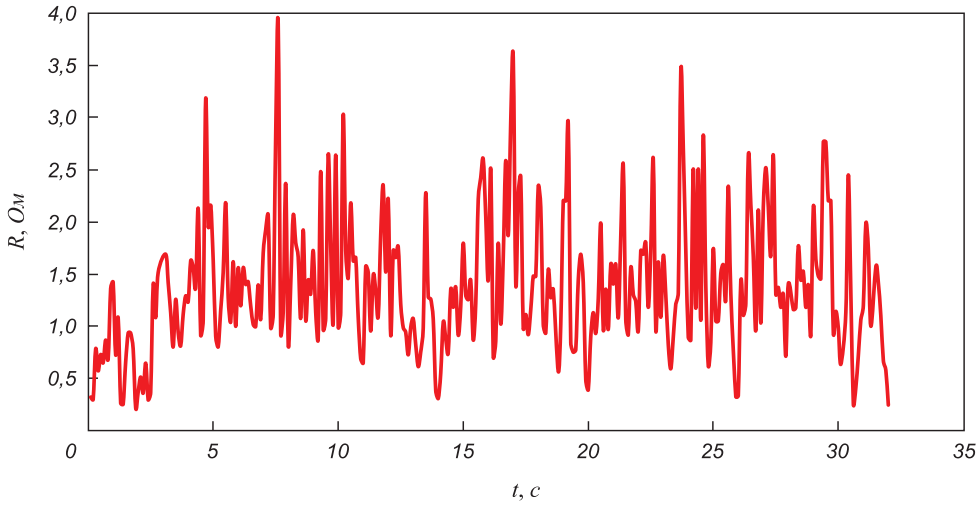

Рис. 7. Смоделированные сопротивления искрового промежутка на первом этапе оплавления

Fig. 7. Simulated values of the spark gap resistance at the first stage of reflow

процессы при оплавлении, используя закон гамма-распределения. Полученные результаты при дальнейших исследованиях позволят определять вложение тепла на различных этапах оплавления. Корреляции между силой сварочного тока и скоростью перемещения не наблюдается, так как значение тока, зависящее от суммарного электрического сопротивления образовавшихся в искровом промежутке микроконтактов, является случайной величиной. Параметры гамма-распределения зависят от скорости перемещения подвижной плиты сварочной машины.

Предложено использовать полученные закономерности для изучения процессов контактной стыковой сварки оплавлением. Использование таких закономерностей в совокупности с моделированием распределения тепла позволит получить конечную структуру металла сварного соединения для рельсовой стали с соответствующим профилем рельса.

Список литературы / References

1. Клименко Л.В. Бесстыковой путь прогрессивная конструкция железнодорожного пути // Приложение к журналу «Мир транспорта» МКЖТ МПС РФ. 2004. № 1. С. 88–93.
2. Кучук-Яценко С.И., Богорский М.В., Горонков Н.Д. Контактная стыковая сварка рельсов повышенной прочности // Автоматическая сварка. 1994. № 3 (492). С. 34–40.
3. Шур Е.А. Перспективные требования Российских железных дорог к рельсам // Железнодорожный транспорт. 2008. № 2. С. 41–45.
4. Шур Е.А. Влияние структуры на эксплуатационную стойкость рельсов. В кн.: Влияние свойств металлической матрицы на эксплуатационную стойкость рельсов. Екатеринбург: УИМ, 2006. С. 37–63.
5. Козырев Н.А., Шевченко Р.А., Усольцев А.А., Прудников А.Н., Бащенко Л.П. Разработка и моделирование технологического процесса сварки дифференцированно термоупрочненных железнодорожных рельсов. Моделирование процессов, протекающих при сварке и локальной термической обработке // Известия вузов. Черная металлургия. 2020. Т. 63. № 2. С. 93–101. https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-2-93-101
6. Козырев Н.А., Шевченко Р.А., Усольцев А.А., Прудников А.Н., Бащенко Л.П. Разработка и моделирование технологического процесса сварки дифференцированно термоупрочненных железнодорожных рельсов. Промышленное опробование // Известия вузов. Черная металлургия. 2020. Т. 63. № 5. С. 305–312. https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-5-305-312
7. Солодовников С.А. и др. Оборудование для контактной сварки рельсов и его эксплуатация. Киев: Изд-во «Наукова думка», 1974. 184 с.
8. Schmid-Fetzer R., Andersson D., Chevalier P.Y., etc. Assessment techniques, database design and software facilities for thermodynamics and diffusion // Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry. 2007. Vol. 31. No. 1. P. 38–52. https://doi.org/10.1016/j.calphad.2006.02.007
9. Dahl B., Mogard B., Gretoft B., Ulander B. Repair of rails on-site by welding // Svetsaren. 1995. Vol. 50. No. 2. P. 10–14.
10. Kavunichenko A.V., Shvets V.I., Antipin E.V. Peculiarities of flash-butt welding of rail frogs with rail ends // The Paton Welding Journal. 2018. No. 4. P. 14–18. https://doi.org/10.15407/tpwj2018.04.03
11. Duvel J., Mutton P. Rail requirements for 40 tonne axle loads. In: Int. Heavy Haul Association Conf. 2005. P. 719–729.
12. Saita K., Ueda M., Miyazaki T. Developing technologies to improve the reliability of flash-butt welds. In: Int. Heavy Haul Association Conf. Grabe P.J., Frohling R.D. eds. Cape Town, South Africa, 2017. P. 208–215.
13. Farhangi H., Mousavizadeh S.M. Horizontal split-web fractures of flash butt welded rails. In: Proceedings of the 8th Int. Fracture Conf. 2007. P. 509–517.
14. Porcaro R.R., Araújo F.C., Godefroid L.B., Faria G.L., Silva L.L. Simulation of flash-butt welding process of a railway steel. Part 2: Dilatometric and numerical analysis // Soldagem & Inspeção. 2020. No. 25. Article 2533. https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI25.33
15. Pernach M. Application of the mixed-mode model for numerical simulation of pearlitic transformation // Journal of Materials Engi-

1. Klimenko L.V. Continuous welded rail: Progressive design of a railway track. *Prilozhenie k zhurnalu "Mir transporta" MKZhT MPS RF*. 2004, no. 1, pp. 88–93. (In Russ.).
2. Kuchuk-Yatsenko S.I., Bogorskii M.V., Goronkov N.D. Contact butt welding of high-strength rails. *Avtomaticheskaya svarka*. 1994, no. 3 (492), pp. 34–40. (In Russ.).
3. Shur E.A. Perspective requirements of Russian railways to rails. *Zheleznodorozhnyi transport*. 2008, no. 2, pp. 41–45. (In Russ.).
4. Shur E.A. Influence of the structure on rails operational stability. In: *Influence of Metal Matrix Properties on Rails Operational Stability*. Yekaterinburg: UIM, 2006, pp. 37–63. (In Russ.).
5. Kozyrev N.A., Shevchenko R.A., Usol'tsev A.A., Prudnikov A.N., Bashchenko L.P. Welding of differentially heat-strengthened rails. Modeling of processes during welding and local thermal processing. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2020, vol. 63, no. 2, pp. 93–101. (In Russ.). https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-2-93-101
6. Kozyrev N.A., Shevchenko R.A., Usol'tsev A.A., Prudnikov A.N., Bashchenko L.P. Welding of differentially heat-strengthened rails. Industrial testing. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2020, vol. 63, no. 5, pp. 305–312. (In Russ.). https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-5-305-312
7. Solodovnikov S.A., etc. *Equipment for Contact Welding of Rails and its Operation*. Kiev: Naukova dumka, 1974, 184 p. (In Russ.).
8. Schmid-Fetzer R., Andersson D., Chevalier P.Y., etc. Assessment techniques, database design and software facilities for thermodynamics and diffusion. *Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry*. 2007, vol. 31, no. 1, pp. 38–52. https://doi.org/10.1016/j.calphad.2006.02.007
9. Dahl B., Mogard B., Gretoft B., Ulander B. Repair of rails on-site by welding. *Svetsaren*. 1995, vol. 50, no. 2, pp. 10–14.
10. Kavunichenko A.V., Shvets V.I., Antipin E.V. Peculiarities of flash-butt welding of rail frogs with rail ends. *The Paton Welding Journal*. 2018, no. 4, pp. 14–18. https://doi.org/10.15407/tpwj2018.04.03
11. Duvel J., Mutton P. Rail requirements for 40 tonne axle loads. In: *Int. Heavy Haul Association Conf*. 2005, pp. 719–729.
12. Saita K., Ueda M., Miyazaki T. Developing technologies to improve the reliability of flash-butt welds. In: *Int. Heavy Haul Association Conf.* Grabe P.J., Frohling R.D. eds. Cape Town, South Africa, 2017, pp. 208–215.
13. Farhangi H., Mousavizadeh S.M. Horizontal split-web fractures of flash butt welded rails. In: *Proceedings of the 8th Int. Fracture Conf*. 2007, pp. 509–517.
14. Porcaro R.R., Araújo F.C., Godefroid L.B., Faria G.L., Silva L.L. Simulation of flash-butt welding process of a railway steel. Part 2: Dilatometric and numerical analysis. *Soldagem & Inspeção*. 2020, no. 25, article 2533. (In Port.). https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI25.33
15. Pernach M. Application of the mixed-mode model for numerical simulation of pearlitic transformation. *Journal of Materials Engi-*

neering and Performance. 2019. No. 28. P. 3136–3148. https://doi.org/10.1007/s11665-019-04069-0
16. Milenin A., Pernach M., Rauch R., Kuziak R., Zygmunt T., Pietrzyk M. Modelling and optimization of the manufacturing chain for rails // Procedia Engineering. 2017. No. 207. P. 2011–2016. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.1112
17. Faria G.L., Godefroid L.B., Cândido L.C., Porcaro R.R. Microstructural characterization and kinetic study about phase transformations in standard and premium rail steels. In: Congresso Anual da ABM, Rio de Janeiro-RJ. Anais. Rio de Janeiro: ABM, 2016. https://doi.org/10.5151/1516-392X-27668
18. Tawfik D., Mutton P.J., Chiu W.K. Experimental and numerical investigations: Alleviating tensile residual stresses in flash-butt welds by localized rapid post-weld heat treatment // Journal of Materials Processing Technology. 2008. Vol. 196. No. 1-3. P. 279–291. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.05.055
19. Гладков Э.А. Управление процессами и оборудованием при сварке. М.: ИЦ «Академия», 2006. 432 с.
20. Джонсон Н.Л., Коц С., Балакришнан Н. Одномерные непрерывные распределения. М.: БИНОМ, Лаборатория знаний, 2010. 703 с.

neering and Performance. 2019, no. 28, pp. 3136–3148. https://doi.org/10.1007/s11665-019-04069-0
16. Milenin A., Pernach M., Rauch R., Kuziak R., Zygmunt T., Pietrzyk M. Modelling and optimization of the manufacturing chain for rails. *Procedia Engineering.* 2017, no. 207, pp. 2011–2016. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.1112
17. Faria G.L., Godefroid L.B., Cândido L.C., Porcaro R.R. Microstructural characterization and kinetic study about phase transformations in standard and premium rail steels. In: *Congresso Anual da ABM, Rio de Janeiro-RJ. Anais*. Rio de Janeiro: ABM, 2016. (In Port.). https://doi.org/10.5151/1516-392X-27668
18. Tawfik D., Mutton P.J., Chiu W.K. Experimental and numerical investigations: Alleviating tensile residual stresses in flash-butt welds by localized rapid post-weld heat treatment. *Journal of Materials Processing Technology*. 2008, vol. 196, no. 1-3, pp. 279–291. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.05.055
19. Gladkov E.A. *Control of Processes and Equipment in Welding*. Moscow: Akademiya, 2006, 432 p. (In Russ.).
20. Johnson N.L., Kotz S., Balakrishnan N. *Continuous Univariate Distributions*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1994. (Russ. ed.: Johnson N.L., Kotz S., Balakrishnan N. *Odnomernye nepreryvnye raspredeleniya*. Moscow: BINOM, Laboratoriya znanii, 2010, 703 p.).

Сведения об авторах / Information about the authors

Роман Алексеевич Шевченко, *ассистент кафедры материаловедения, литейного и сварочного производства,* Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: shefn1200@mail.ru

Алексей Борисович Юрьев, *д.т.н., ректор,* Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0003-4403-9006
E-mail: rector@sibsiu.ru

Николай Анатольевич Козырев, *д.т.н., профессор, проректор по научной и инновационной деятельности,* Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0002-7391-6816
E-mail: kozyrev_na@mtsp.sibsiu.ru

Алексей Романович Михно, *аспирант кафедры материаловедения, литейного и сварочного производства,* Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0002-7305-6692
E-mail: mikno-mm131@mail.ru

Roman A. Shevchenko, *Assistant of the Chair "Materials, Foundry and Welding Production",* Siberian State Industrial University
E-mail: shefn1200@mail.ru

Aleksei B. Yur'ev, *Dr. Sci. (Eng.), Rector,* Siberian State Industrial University
ORCID: 0000-0003-4403-9006
E-mail: rector@sibsiu.ru

Nikolai A. Kozyrev, *Dr. Sci. (Eng.), Prof., Vice-Rector for Research and Innovation,* Siberian State Industrial University
ORCID: 0000-0002-7391-6816
E-mail: kozyrev_na@mtsp.sibsiu.ru

Aleksei R. Mikhno, *MA Student of the Chair "Materials, Foundry and Welding Production",* Siberian State Industrial University
ORCID: 0000-0002-7305-6692
E-mail: mikno-mm131@mail.ru

Вклад авторов / Contribution of the authors

Р. А. Шевченко – определение целей и задач, подбор и анализ источников информации по теме процессов, протекающих в искровом промежутке.
А. Б. Юрьев – сбор статистических данных, редактирование финальной версии.
Н. А. Козырев – подбор и анализ источников информации о законах распределения случайных величин, редактирование финальной версии.
А. Р. Михно – проведение сварки и сбор статистических данных, проведение математических расчетов.

R. A. Shevchenko – formation of goals and objectives, selection and analysis of information sources on the topic of processes occurring in the spark gap.
A. B. Yur'ev – collection of statistical data, editing of the manuscript final version.
N. A. Kozyrev – selection and analysis of information sources on the laws of distribution of random variables, editing of the manuscript final version.
A. R. Mikhno – welding conducting and statistical data collection, mathematical calculations.

Поступила в редакцию 24.02.2022
После доработки 09.03.2022
Принята к публикации 16.03.2022

Received 24.02.2022
Revised 09.03.2022
Accepted 16.03.2022