



Оригинальная статья

УДК 625.143.48

DOI 10.17073/0368-0797-2022-7-486-493

<https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2342>

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА КОНТАКТНОЙ СТЫКОВОЙ СВАРКИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ

Н. А. Козырев¹, Л. П. Бащенко², Р. А. Шевченко², А. Р. Михно²

¹Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина (Россия, 105005, Москва, ул. Радио, 23/9)

²Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. Оптимизация технологического процесса изготовления длинномерных рельсовых плетей является сложной задачей, так как помимо большого количества операций, используемое сегодня для контактной стыковой сварки железнодорожных рельсов методом пульсирующего оплавления оборудование имеет большое количество технологических параметров (входных факторов), воздействующих на качество получаемого сварного стыка (выходные факторы). Такое количество параметров не позволяет в полной мере подобрать оптимальные режимы сварки и приводит к невозможности применения полного или дробного факторного эксперимента. В работе с помощью регрессионного анализа проведена обработка данных 79 опытных сварок. Выделены основные этапы процесса сварки: первый этап оплавления; второй этап оплавления; форсировка; осадка. Исходя из полученных осциллограмм процесса сварки на рельсосварочной машине K1100 при сварке рельсов типа Р65 категории ДТ350, определены средние значения силы тока, напряжения, скорости перемещения подвижной станины на различных этапах оплавления, а также усилия осадки, время осадки под током, пути осадки на последнем этапе. Полученные регрессионные уравнения, определяющие результаты испытаний на статический трехточечный изгиб, были проанализированы и из них исключены неудовлетворяющие параметры по t -критерию Стьюдента. Полученные в конечном итоге регрессионные уравнения учитывают влияние каждого технологического этапа процесса контактной стыковой сварки железнодорожных рельсов на выходные свойства и модель является адекватной по F -критерию Фишера. С помощью данных регрессионных моделей получены рекомендованные режимы контактной стыковой сварки пульсирующим оплавлением и проведено их опробование на рельсосварочном предприятии.

Ключевые слова: контактная стыковая сварка, рельсовая сталь, искровой промежуток, сила тока, этапы оплавления, регрессионное уравнение

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: Козырев Н.А., Бащенко Л.П., Шевченко Р.А., Михно А.Р. Оптимизация режима контактной стыковой сварки железнодорожных рельсов // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 7. С. 486–493. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-7-486-493>

Original article

OPTIMIZING THE MODE OF CONTACT BUTT WELDING OF RAILWAY RAILS

N. A. Kozыrev¹, L. P. Bashchenko², R. A. Shevchenko², A. R. Mikhno²

¹I.P. Bardin Central Research Institute of Ferrous Metallurgy (23/9 Radio Str., Moscow 105005, Russian Federation)

²Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654007, Russian Federation)

Abstract. Optimization of the technological process of manufacturing long-length rail lashes is a difficult task, since in addition to a large number of operations, the equipment used today for contact butt welding of railway rails by pulsating reflow has a large number of technical parameters (input factors) affecting the quality of the resulting welded joint (output factors). Such a number of parameters does not allow us to fully select the optimal welding modes and leads to the impossibility of using a full or fractional factor experiment. In the work, data processing of 79 experimental welds was carried out using regression analysis. The main stages of the welding process are highlighted: the first stage is melting; the second stage is melting, forcing, precipitation. Based on the obtained oscillograms of the welding process on the K1100 rail welding machine, average values of current, voltage, speed of movement of the movable bed were obtained at various stages of melting, as well as precipitation forces, precipitation time under current, precipitation paths at the last stage when welding R65 rails of the DT350 category. The obtained regression equations determining the results of tests for static three-point bending were analyzed and unsatisfactory parameters according to the Student's t -criterion were excluded from them. These equations in the end take into account the influence of each technological stage of the process of contact butt welding of railway rails on the output properties and the model is adequate according to the Fischer's F -criterion. With the help of these regression models, the recommended modes of contact butt welding by pulsating reflow were obtained and their testing was carried out at a rail welding company.

Keywords: contact butt welding, rail steel, spark gap, current strength, melting stages, regression equation

Funding: The research was supported by 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: Kozyrev N.A., Bashchenko L.P., Shevchenko R.A., Mikhno A.R. Optimizing the mode of contact butt welding of railway rails. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 7, pp. 486–493. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-7-486-493>

ВВЕДЕНИЕ

Железные дороги обеспечивают перевозку грузов и пассажиров в больших объемах и на большие расстояния, при этом с каждым годом растет общий объем перевозок и грузонапряженность пути. Все это приводит к необходимости строительства новых и ремонта старых железнодорожных путей [1 – 3].

При этом основная нагрузка ложится на рельсы, а стыки рельсов являются наиболее слабым местом пути, так как в них возникает дополнительное динамическое воздействие колеса на рельс. Основным способом уменьшения данного воздействия с давних пор является увеличение длины рельсов с уменьшением количества стыков [4, 5].

В настоящее время прогрессивной конструкцией железнодорожного полотна является бесстыковой путь, который позволяет создавать скоростные железнодорожные магистрали при отсутствии стыков рельсов с применением прогрессивных ресурсосберегающих технологий строительства и технического обслуживания железнодорожного пути. Наиболее эффективным по технико-экономическим показателям способом соединения рельсов в бесстыковой путь является их электроконтактная сварка. В настоящее время применяется метод пульсирующего оплавления, который позволяет выбирать оптимальный термический цикл при сварке рельсов в зависимости от химического состава стали. Вместе с тем, существуют трудности по сварке высокоуглеродистой стали, из которой состоят рельсы: необходимость термообработки после сварки для получения нормативных показателей механических свойств, непостоянство механических показателей от сварки к сварке. При этом дефекты в сварном стыке занимают 35 % всех видов дефектов. В настоящее время на рельсосварочных предприятиях показателем качества сварки являются результаты сплошного ультразвукового контроля сварных стыков, а также результаты механических испытаний образцов сваренных рельсов на трехточечный изгиб с получением значений усилия при изгибе и величины стрелы прогиба [6, 7]. Поэтому важно провести анализ изменения показателей механических свойств стыков в зависимости от изменения технологических параметров сварки, а также оптимизацию параметров сварки с целью повышения качества сварных стыков рельсов.

Целью настоящей работы является повышение качества сварных стыков дифференцированно упроч-

ненных железнодорожных рельсов, сваренных электроконтактным способом путем оптимизации технологических параметров.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Оптимизация параметров проводилась по алгоритму, представленному на рис. 1. Работа состояла из следующих этапов:

- сбор данных по пяти этапам сварки;
- корреляционный анализ;
- расчет параметров и построение регрессионных моделей для каждого этапа сварки рельсов (10 уравнений для каждой машины – по выходным параметрам (усилию изгиба и стреле прогиба));
- выяснение статистической значимости, т. е. пригодности модели для использования ее в целях прогнозирования значений отклика;
- выявление выбросов и их удаление;
- выбор наиболее значимых факторов с дальнейшим их включением в общую модель;
- подстановка в модель оптимальных значений параметров на основе знаков регрессионного уравнения и апробация полученного режима [8 – 10].

Для оптимизации процесса контактной стыковой сварки рельсов [11, 12] пульсирующим оплавлением на машинах K1100 в условиях рельсосварочного предприятия был использован регрессионный анализ производственных данных контроля сварки рельсов и испытания образцов рельсов на статический изгиб [13 – 15]. Сбор данных проводился в два этапа. Сначала были собраны данные сварки рельсов и испытаний на статический поперечный изгиб за два месяца по трем машинам K1100. На втором этапе после нахождения оптимальных значений параметров по трем машинам были собраны данные сварок и испытаний на одной машине K1100 [16 – 18].

Производственные данные обрабатывались с использованием пакета прикладных программ Statistica 10.0. Одним из его важных свойств является быстрое действие при работе с большим объемом данных и вычислительная мощность приложений, требующих регулярного построения запросов к базам данных и комплексного управления данными. Также пакет программ включает в себя графический модуль, содержащий удобные инструменты для визуализации данных и проведения графического анализа [19, 20].

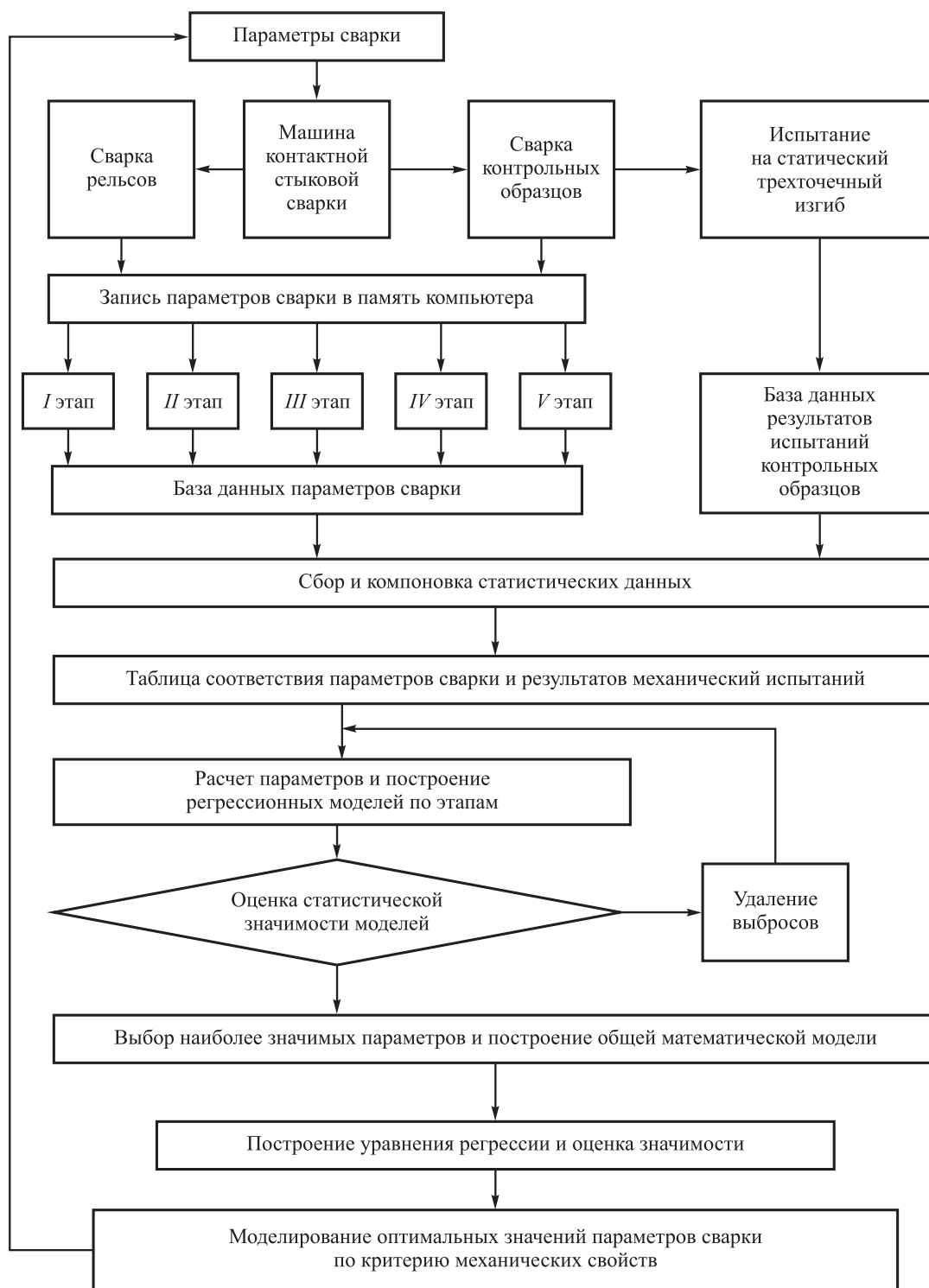


Рис. 1. Алгоритм проведения исследований

Fig. 1. Research algorithm

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На машине K1100 было сварено 79 стыков, которые в последующем были испытаны на статический трехточечный изгиб. В табл. 1 приведены интервалы значений контролируемых параметров, где $T_{\text{нач}}$, $T_{\text{длит}}$ – длительность первого и второго этапа оплавления; I – сила

тока, А; U – напряжение, В; V – скорость сварки (движения подвижной станины), мм/с; P – давление в гидросистеме, атм.; S – путь, мм.

На каждом этапе (первый этап оплавления, второй этап оплавления, форсировка, осадка, гратосъем) были построены регрессионные модели с выходными параметрами $P_{\text{изг}}$ и $f_{\text{пр}}$ и рассчитаны коэффициенты детер-

Интервалы значений параметров сварки на рельсосварочной машине

Table 1. Intervals of values of welding parameters on a rail welding machine

Название этапа	Интервалы значений параметров сварки					
	T , с	I , А	U , В	P , атм.	V , мм/с	S , мм
I этап оплавления	28 – 46	7 – 1088	335 – 440	27 – 42	0,00 – 0,67	4,4 – 5,4
II этап оплавления	60 – 100	24 – 736	148 – 424	26 – 35	0,22 – 0,89	7,0
Форсировка	4,2 – 6,1	110 – 788	280 – 443	27 – 33	1,33 – 1,89	6,5
Осадка	1,1 – 3,0	6 – 1174	2 – 423	25 – 129	1,56 – 9,33	17,8 – 18,6
Гратосъем	1,0	2 – 324	1 – 105	71 – 129	0,11 – 0,56	0,1 – 1,0

минации, где $P_{изг}$ – усилие изгиба, кН; $f_{пр}$ – стрела прогиба, мм; $S_{прип}$, $S_{поз}$ – путь, пройденный станиной при припуске на оплавление и на начальном этапе, мм; нижние индексы «ср», «мин» и «макс» означают среднее, минимальное и максимальное:

– модель первого этапа оплавления

$$P_{изг} = 5129,96 + 49,02V_{ср} + 9,63V_{мин} + 12,54V_{макс} - 10,14S_{прип} - 3,92S_{поз} - 51,61P_{ср} + 6,82P_{мин} + 19,54P_{макс} + 8,59U_{ср} - 7,95U_{мин} - 2,69U_{макс} - 3,72I_{ср} + 1,51I_{мин} - 1,21I_{макс} - 2,24T_{длит},$$

$$R^2 = 0,24,$$

$$f_{пр} = -100,44 + 3,22V_{ср} + 1,01S_{поз} - 2,96P_{мин} - 0,61P_{макс} + 0,55U_{ср} - 0,35U_{макс} + 0,08I_{ср} + 0,10I_{макс} - 0,22,$$

$$R^2 = 0,50;$$

– модель второго этапа оплавления

$$P_{изг} = 11\,497,07 + 57,11V_{ср} + 178,46V_{мин} - 86,14V_{макс} - 6,99S_{прип} - 2,12S_{поз} - 119,85P_{ср} - 69,42P_{мин} - 21,97P_{макс} - 11,16U_{ср} + 0,45U_{мин} - 0,49U_{макс} + 2,40I_{ср} + 5,24I_{мин} + 1,70I_{макс} - 0,22T_{длит} - 1,39T_{нач},$$

$$R^2 = 0,20,$$

$$f_{пр} = -436,24 + 1,92V_{ср} + 7,94V_{мин} - 0,49V_{макс} + 5,92S_{прип} + 0,332S_{поз} - 0,03P_{ср} - 0,24P_{мин} - 4,47P_{макс} + 0,56U_{ср} + 0,07U_{мин} - 0,11U_{макс} + 0,22I_{ср} - 0,05I_{мин} - 0,02I_{макс} - 0,03T_{длит},$$

$$R^2 = 0,27;$$

– модель на этапе форсировки

$$P_{изг} = 5792,22 + 159,64V_{ср} + 60,29V_{мин} + 33,69V_{макс} + 4,72S_{прип} - 15,53S_{поз} + 52,83P_{ср} - 130,84P_{мин} + 55,38P_{макс} - 11,82U_{ср} + 0,15U_{мин} + 11,43U_{макс} - 4,71I_{ср} - 0,35I_{мин} - 0,29I_{макс} + 14,28T_{длит} - 0,29T_{нач},$$

$$R^2 = 0,15,$$

$$f_{пр} = -75,95 - 4,68V_{ср} + 4,30V_{мин} + 1,47V_{макс} + 1,90S_{прип} - 0,37S_{поз} + 0,82P_{ср} - 2,30P_{мин} - 2,98P_{макс} + 0,19U_{ср} - 0,04U_{мин} + 0,21U_{макс} + 0,04I_{ср} - 0,02I_{мин} + 0,57T_{длит},$$

$$R^2 = 0,20;$$

– модель на этапе осадки

$$P_{изг} = -1856,13 + 200,10V_{ср} - 43,91V_{мин} + 6,52V_{макс} - 18,40S_{прип} - 15,05S_{поз} + 22,86P_{ср} - 3,32P_{мин} + 61,72P_{макс} + 7,28U_{ср} - 0,07U_{мин} - 13,67U_{макс} - 2,63I_{ср} - 0,19I_{мин} + 3,92I_{макс} + 39,64T_{длит} - 0,43T_{нач},$$

$$R^2 = 0,24,$$

$$f_{пр} = -161,50 + 2,00V_{ср} - 0,01V_{мин} + 0,16V_{макс} - 0,14S_{прип} - 0,26S_{поз} - 0,82P_{ср} + 0,10P_{мин} + 2,42P_{макс} + 0,11U_{ср} - 0,06U_{макс} - 0,02I_{ср} - 0,01I_{мин} + 0,03I_{макс} + 0,79T_{длит} - 0,01T_{нач},$$

$$R^2 = 0,15;$$

– модель на этапе гратосъема

$$P_{изг} = 2878,60 + 941,99V_{ср} + 72,97V_{макс} - 128,93S_{прип} - 1,88S_{поз} + 104,21P_{ср} - 84,19P_{мин} - 13,36P_{макс} + 5,19U_{ср} - 102,99U_{мин} + 54,51U_{макс} + 19,41I_{ср} - 0,55I_{мин} - 20,33I_{макс} - 0,47T_{нач},$$

$$R^2 = 0,36,$$

$$f_{пр} = 97,35 - 36,29V_{ср} - 2,95V_{макс} + 2,83S_{прип} - 0,13S_{поз} + 3,31P_{ср} - 2,08P_{мин} - 1,30P_{макс} + 1,09U_{ср} - 3,80U_{мин} + 0,91U_{макс} + 1,56I_{ср} - 1,07I_{мин} - 0,56I_{макс},$$

$$R^2 = 0,18.$$

Коэффициенты детерминации для каждой модели низкие. Это говорит о том, что входные переменные на каждом отдельном этапе процесса контактной сварки не в полной мере отражают свое влияние на выходные параметры. Очевидно, что каждый из этапов оказывает влияние на выходные параметры, но полное влияние

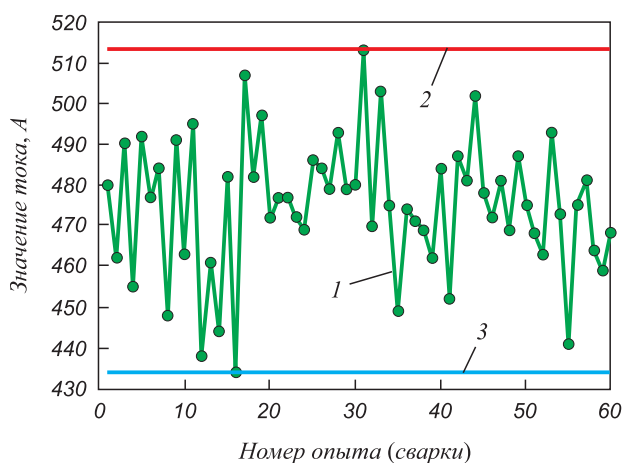


Рис. 2. Разброс средних значений тока на I этапе оплавления:
1 – фактические значения; 2 и 3 – максимум и минимум

Fig. 2. Spread of the average current values at melting stage I:
1 – actual values; 2 and 3 – maximum and minimum

входных переменных можно оценить только в совокупности этих этапов.

Отбросив неудовлетворяющие параметры по t -критерию Стьюдента и собрав значимые параметры каждого этапа в одном уравнении, получили следующие модели, описывающие для машины К1100 весь процесс в целом:

$$P_{изг} = 814,08 - 12,93I_{макс5} + 40,84U_{макс5} - 0,64T_{нач4} - 0,26I_{мин4} + 3,20I_{макс4} - 6,29U_{макс4} - 2,12P_{мин4} + 41,79P_{макс4} + 53,33V_{ср4} + 6,60I_{ср1} - 219,91P_{ср1},$$

$$R^2 = 0,79;$$

$$f_{пр} = -194,21 - 0,24I_{макс5} - 0,02T_{нач4} + 0,07I_{макс4} + 2,43P_{макс4} - 0,75P_{ср4} + 1,94V_{ср4} + 0,01I_{макс3} + 0,05T_{длит4} + 0,08I_{ср1} - 3,32P_{ср1},$$

$$R^2 = 0,71.$$

Из 79 наблюдений после удаления выбросов осталось 62. Значимость по F -критерию Фишера (для $P_{изг}$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$: $F_{факт} = 9,88 > F_{кр} = 0,38$; для $f_{пр}$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$: $F_{факт} = 6,90 > F_{кр} = 0,38$). Для $P_{изг}$ средняя ошибка аппроксимации составляет 2,8 %. Для $f_{пр}$ средняя ошибка аппроксимации равна 5 % (при условии $\varepsilon \leq 10$).

Токовые границы первого этапа показаны на рис. 2. Режимы сварки с измененными значимыми параметрами указаны в табл. 2. Работа модели при изменении параметра $I_{ср}$ на первом этапе приведена на рис. 3.

Уровень корреляции между усилием изгиба и стрелой прогиба при испытании на изгиб в зависимости от применяемой машины показан на рис. 4. Таким образом видно, что процесс можно моделировать только по одной зависимой переменной, так как вторая переменная также изменяется.

На данном этапе были найдены по полученным моделям оптимальные параметры на основе знаков коэффициентов регрессии (табл. 3). При выборе наиболее

Т а б л и ц а 2

Режимы сварки с измененным значением $I_{ср1}$ и производственные параметры

Table 2. Welding modes with a modified $I_{ср1}$ value and production parameters

Параметр	$P_{ср1}$, атм.	$I_{ср1}$, А	$V_{ср4}$, мм/с	$P_{макс4}$, атм.	$P_{мин4}$, атм.	$U_{макс4}$, В	$I_{макс4}$, А	$I_{мин4}$, А	$T_{нач4}$, с	$U_{макс5}$, В	$I_{макс5}$, А	$P_{изг}$, кН	$f_{пр}$, мм
Режим	31	448	8,56	123	99	372	1109	975	128,3	102	314	2670	37,1
Модель	31	448	8,56	123	99	372	1109	975	128,3	102	314	2580	38,2

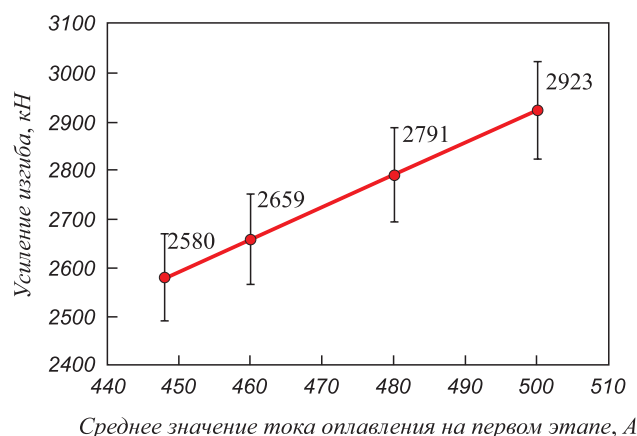


Рис. 3. Зависимость усилия изгиба от среднего значения тока на первом этапе оплавления

Fig. 3. Dependence of the bending force on the average value of current at melting stage I

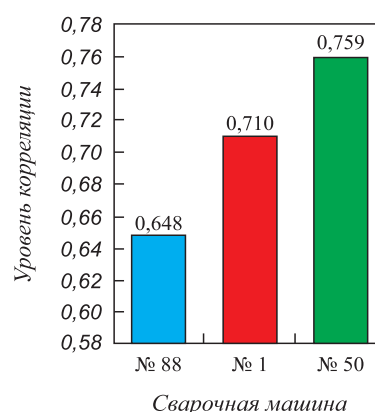


Рис. 4. Корреляционная зависимость между усилием изгиба и стрелой прогиба при испытании на изгиб в зависимости от применяемой машины

Fig. 4. Correlation between the bending force and the deflection boom during the bending test, depending on the machine used

Т а б л и ц а 3

Оптимальные значения параметров машины K1100

Table 3. Optimal values of K1100 unit parameters

Параметр	$P_{\text{ср1}},$ атм.	$I_{\text{ср1}},$ А	$V_{\text{ср4}},$ мм/с	$P_{\text{макс4}},$ атм.	$P_{\text{мин4}},$ атм.	$U_{\text{макс4}},$ В	$I_{\text{макс4}},$ А	$I_{\text{мин4}},$ А	$T_{\text{нач4}},$ с	$U_{\text{макс5}},$ В	$I_{\text{макс5}},$ А
Знак уравнения	—	+	+	+	—	—	+	—	—	+	—
Минимум	30	434	1,56	123	25	359	1074	6	99,1	2	6
Максимум	32	521	9,33	129	124	423	1174	1075	144,9	105	324
Оптимальный	30	521	9,33	129	25	359	1174	6	99,1	105	324

благоприятных параметров значений усилие изгиба $P_{\text{изг}}$ составляет 8437,37 кН. Расчетное значение $P_{\text{изг}}$ практически в три раза выше среднего. На реальном процессе данные режимы осуществить невозможно, так как на пятом этапе оплавление не происходит, ток протекает уже по всему сечению сварного рельса. В результате нет возможности осуществлять регулировку силы тока оплавления с помощью передвижения подвижной станины (в данном случае сила тока пропорциональна напряжению). Поэтому одновременная подстановка минимального значения напряжения и максимального значения силы тока некорректна. Подставляя сначала максимальные значения, а потом минимальные значения напряжения и тока пятого этапа ($U_{\text{макс5}}, I_{\text{макс5}}$), получим наиболее близкие к истине значения усилия при изгибе 3923,07 и 3828,29 кН соответственно. Таким образом, наличие тока после осадки в свариваемых рельсах положительно влияет на качество сварного соединения. Значение $T_{\text{нач4}}$ также указывает на то, что минимальное время оплавления позволяет получить лучшие показатели качества. Прогнозируемые по данным моделям регрессии значения усилия при изгибе и

стрелы прогиба составляют 3923,07 кН и 75,83 мм соответственно.

Выводы

Разработаны математические модели процесса контактной сварки рельсов на машине K1000, которые позволяют оценить полноту влияния параметров технологического процесса контактной сварки рельсов на качество сварного шва. С помощью регрессионных моделей предлагается прогнозировать качество сварного шва и управлять технологическими параметрами процесса контактной сварки рельсов. На основе выбора значимых факторов получены общие модели процесса сварки с учетом влияния параметров каждого этапа на весь процесс сварки. Проведена апробация полученных моделей в условиях рельсосварочного предприятия. Выявлено, что одной из причин снижения механических свойств рельсов, а именно усилия при изгибе и стрелы прогиба, является невозможность поддерживать в пределах режимов средний ток на каждом этапе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Роботизированный рельсостыковочный агрегат // Железные дороги мира. 2012. № 12. С. 64–67.
2. Mortazavian E., Wang Z., Teng H. Repair of light rail track through restoration of the worn part of the railhead using submerged arc welding process // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2020. Vol. 107. No. 7–8. P. 3315–3332. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05208-x>
3. Сергієнко Ю.В., Жук В.І. Зварювання стиків рейок в польових умовах // Актуальні наукові дослідження в сучасному світі. 2021. № 1–1 (69). Р. 237–240.
4. Шур Е.А., Резанов В.А. Комплексный метод контактной сварки рельсов // Вестник ВНИИЖТ. 2012. № 3. С. 20–22.
5. Gavrilo P., Ivanov V. Analysis of rail profile 610 E1 joints welded by means of mobile rail welding machine // Proceedings of the Int. Sci. Conf. "Engineering for Rural Development". 2018. Vol. 17. P. 1969–1977. <https://doi.org/10.22616/ERDev2018.17.N021>
6. Резанов В.А. Методика исследования изменения температуры на различном расстоянии от стыков при сварке рельсов // Вестник ВНИИЖТ. 2011. № 4. С. 40–43.
7. Карпачевский В.В., Новиков М.В., Залавский В.Н. О сварке рельсовых плетей при низких температурах с одновременным восстановлением их температуры закрепления с применением подогрева // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. 2016. № 4. С. 30–32.
8. Gong L., Zhu L., Zhou H.X. Effect on hardness and microstructures of rail joint with ultra-narrow gap arc welding by post weld heat treatment // Key Engineering Materials. 2017. Vol. 737. P. 90–94. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.737.90>
9. Гладков Э.А. Управление процессами и оборудованием при сварке. Москва: Академия, 2006. 432 с.
10. Voronin N.N., Seydakhmetov N.B., Rezanov V.A. The influence of technological parameters on the thermal cycle at butt flash welding of rails // Welding International. 2019. Vol. 33. No. 7–9. P. 328–334. <https://doi.org/10.1080/09507116.2021.1881346>
11. Mutton P., Cookson J., Qiu C., Welsby D. Microstructural characterisation of rolling contact fatigue damage in flashbutt welds // Wear. 2016. Vol. 366–367. P. 368–377. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.03.020>
12. Tawfik D.P., Mutton P.J., Chiu W.K. Experimental and numerical investigations: Alleviating tensile residual stresses in flash-butt welds by localised 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>
13. Voronin N.N., Seydakhmetov N.B., Rezanov V.A. Development of the combined flashing method in welding of rails // Welding International. 2017. Vol. 31. No. 12. P. 984–987. <https://doi.org/10.1080/09507116.2017.1369066>
14. Козырев Н.А., Шевченко Р.А., Крюков Р.Е., Усольцев А.А. Разработка новой технологии сварки рельсов для высокоскоростного движения // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2018. № 8 (1424). С. 50–57. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2018-8-50-57>
15. Полевой Е.В., Шевченко Р.А., Козырев Н.А., Кушев Д.Ю., Юнусов А.М. Исследование неметаллических включений, образующихся при электроконтактной сварке рельсовой стали // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2019. № 1 (27). С. 8–12.
16. Козырев Н.А., Шевченко Р.А., Усольцев А.А., Крюков Р.Е., Михно А.Р. Исследование износостойкости сварного стыка железнодорожных рельсов // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2020. Т. 76. № 8. С. 818–825. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2020-8-818-825>
17. Соболев А.А., Тазигов Э.Б., Жуков Д.А. Применение технологии фирмы Elektro-Thermit для сварки рельсов в России // Новые материалы и технологии в машиностроении. 2004. № 3. С. 89–91.
1. Robotic rail welding unit. *Zheleznye dorogi mira*. 2012, no. 12, pp. 64–67. (In Russ.).
2. Mortazavian E., Wang Z., Teng H. Repair of light rail track through restoration of the worn part of the railhead using submerged arc welding process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020, vol. 107, no. 7–8, pp. 3315–3332. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05208-x>
3. Sergienko Yu.V., Zhuk V.I. Welding of rail joints in the field. *Aktual'nye nauchnye issledovaniya v sovremennom mire*. 2021, no. 1–1 (69), pp. 237–240. (In Ukr.).
4. Shur E.A., Rezanov V.A. Integrated method of contact welding of rails. *Vestnik VNIIZhT*. 2012, no. 3, pp. 20–22. (In Russ.).
5. Gavrilo P., Ivanov V. Analysis of rail profile 610 E1 joints welded by means of mobile rail welding machine. *Proceedings of the Int. Sci. Conf. "Engineering for Rural Development"*. 2018, vol. 17, pp. 1969–1977. <https://doi.org/10.22616/ERDev2018.17.N021>
6. Rezanov V.A. Method of investigation of temperature changes at different distances from joints during rail welding. *Vestnik VNIIZhT*. 2011, no. 4, pp. 40–43. (In Russ.).
7. Karpachevskii V.V., Novakovich M.V., Zalavskii V.N. On welding of rail lashes at low temperatures with simultaneous restoration of their fixing temperature using heating. *Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya*. 2016, no. 4, pp. 30–32. (In Russ.).
8. Gong L., Zhu L., Zhou H.X. Effect on hardness and microstructures of rail joint with ultra-narrow gap arc welding by post weld heat treatment. *Key Engineering Materials*. 2017, vol. 737, pp. 90–94. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.737.90>
9. Gladkov E.A. *Control of Processes and Equipment during Welding*. Moscow: Akademiya, 2006, 432 p. (In Russ.).
10. Voronin N.N., Seydakhmetov N.B., Rezanov V.A. The influence of technological parameters on the thermal cycle at butt flash welding of rails. *Welding International*. 2019, vol. 33, no. 7–9, pp. 328–334. <https://doi.org/10.1080/09507116.2021.1881346>
11. Mutton P., Cookson J., Qiu C., Welsby D. Microstructural characterisation of rolling contact fatigue damage in flashbutt welds. *Wear*. 2016, vol. 366–367, pp. 368–377. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.03.020>
12. Tawfik D.P., Mutton P.J., Chiu W.K. Experimental and numerical investigations: Alleviating tensile residual stresses in flash-butt welds by localised 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>
13. Voronin N.N., Seydakhmetov N.B., Rezanov V.A. Development of the combined flashing method in welding of rails. *Welding International*. 2017, vol. 31, no. 12, pp. 984–987. <https://doi.org/10.1080/09507116.2017.1369066>
14. Kozyrev N.A., Shevchenko R.A., Kryukov R.E., Usol'tsev A.A. Development of a new technology of welding of high speed movement rails. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2018, no. 8 (1424), pp. 50–57. (In Russ.). <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2018-8-50-57>
15. Polevoi E.V., Shevchenko R.A., Kozyrev N.A., Kushev D.Yu., Yunusov A.M. Investigation of non-metallic inclusions formed during electric contact welding of rail steel. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta*. 2019, no. 1 (27), pp. 8–12. (In Russ.).
16. Kozyrev N.A., Shevchenko R.A., Usol'tsev A.A., Kryukov R.E., Mikhno A.R. Study of wear resistance of railway rails welded joint. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2020, vol. 76, no. 8, pp. 818–825. (In Russ.). <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2020-8-818-825>
17. Sobolev A.A., Tazikov E.B., Zhukov D.A. Application of Elektro-Thermit technology for rail welding in Russia. *Novye materialy i tekhnologii v mashinostroenii*. 2004, no. 3, pp. 89–91. (In Russ.).

18. Gavrilov P., Ivanov V. Research of weldability of rail profile 60 El manufactured in factory "Arcelor Mittal". In: *Transport Means – Proceedings of the 23rd Int. Sci. Conf.*, Palanga, 2–4 October 2019. Palanga: Kaunas University of Technology, 2019. P. 945–949.
19. Gavrilov P., Ivanov V. Study of exothermic welded joint grinding by "speno" rail grinders. In: *Proceedings of the 18th Int. Sci. Conf. "Engineering for Rural Development"*, Jelgava, May 22–24, 2019. Jelgava: 2019. P. 1013–1021.
<https://doi.org/10.22616/ERDev2019.18.N132>
20. Kuchuk-Yatsenko S.I., Shvets Y.V., Didkovskii A.V., Chvertko P.N., Shverts V.O., Mikitin Ya.I. Technology and equipment for resistance flash welding of railway crossings with rail ends through an austenitic insert // *Welding International*. 2008. Vol. 22. No. 5. P. 338–341. <https://doi.org/10.1080/09507110802205365>
18. Gavrilov P., Ivanov V. Research of weldability of rail profile 60 El manufactured in factory "Arcelor Mittal". In: *Transport Means – Proceedings of the 23rd Int. Sci. Conf.*, Palanga, October 2–4, 2019. Palanga: Kaunas University of Technology, 2019, pp. 945–949.
19. Gavrilov P., Ivanov V. Study of exothermic welded joint grinding by "speno" rail grinders. In: *Proceedings of the 18th Int. Sci. Conf. "Engineering for Rural Development"*, Jelgava, May 22–24, 2019. Jelgava: 2019, pp. 1013–1021.
<https://doi.org/10.22616/ERDev2019.18.N132>
20. Kuchuk-Yatsenko S.I., Shvets Y.V., Didkovskii A.V., Chvertko P.N., Shverts V.O., 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. <https://doi.org/10.1080/09507110802205365>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Николай Анатольевич Козырев, д.т.н., профессор, заместитель директора научного центра качественных сталей, Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина

ORCID: 0000-0002-7391-6816

E-mail: kozyrev_na@mtsp.sibsiu.ru

Людмила Петровна Бащенко, к.т.н., доцент кафедры теплоэнергетики и экологии, Сибирский государственный индустриальный университет

ORCID: 0000-0003-1878-909X

E-mail: luda.baschenko@gmail.com

Роман Алексеевич Шевченко, к.т.н., доцент кафедры металлургии черных металлов, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: shefn1200@mail.ru

Алексей Романович Михно, аспирант института машиностроения и транспорта, Сибирский государственный индустриальный университет

ORCID: 0000-0002-7305-6692

E-mail: mikno-mm131@mail.ru

Nikolai A. Kozyrev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Deputy Director of the Scientific Center for High-Quality Steels, I.P. Bardin Central Research Institute of Ferrous Metallurgy

ORCID: 0000-0002-7391-6816

E-mail: kozyrev_na@mtsp.sibsiu.ru

Lyudmila P. Bashchenko, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair "Thermal Power and Ecology", Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0003-1878-909X

E-mail: luda.baschenko@gmail.com

Roman A. Shevchenko, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair of Ferrous Metallurgy, Siberian State Industrial University

E-mail: shefn1200@mail.ru

Aleksei R. Mikhno, Postgraduate of the Institute of Mechanical Engineering and Transport, Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0002-7305-6692

E-mail: mikno-mm131@mail.ru

ВКЛАД АВТОРОВ

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Н. А. Козырев – формирование основной идеи исследований, разработка методологии работы, анализ результатов исследований, подготовка материалов для статьи.

Л. П. Бащенко – подбор и анализ источников информации, анализ результатов исследований, подготовка материалов для статьи.

Р. А. Шевченко – определение целей и задач, подбор и анализ источников информации по теме процессов.

А. Р. Михно – проведение сварки и сбор статистических данных, подготовка материалов для статьи.

N. A. Kozyrev – formation of the main idea of research, development of the work methodology, analysis of the research results, preparation of materials for the article.

L. P. Bashchenko – selection and analysis of information sources, analysis of the research results, preparation of materials for the article.

R. A. Shevchenko – formation of goals and objectives, selection and analysis of information sources on the processes.

A. R. Mikhno – welding and statistical data collection, preparation of materials for the article.

Поступила в редакцию 24.02.2022

После доработки 15.06.2022

Принята к публикации 16.06.2022

Received 13.03.2018

Revised 15.06.2022

Accepted 16.06.2022