

*Р.А. Шевченко, Н.А. Козырев, А.А. Усольцев, Л.П. Бащенко, С.В. Князев*

Сибирский государственный индустриальный университет

**ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА  
КОНТАКТНОЙ СТЫКОВОЙ СВАРКИ РЕЛЬСОВ**

Современный этап развития путевого хозяйства характеризуется все большим распространением прогрессивных ресурсосберегающих технологий ремонта и технического обслуживания железнодорожного пути, высокопроизводительных путевых машин, внедрением эффективных конструкций пути, к числу которых относится и бесстыковой путь. Развитие технологий, позволяющих обеспечить возможность получения бесстыкового железнодорожного пути с требуемыми качественными характеристиками, в настоящее время является актуальным направлением [1 – 6].

Технологический процесс сварки рельсов электроконтактным способом обычно разделен на несколько этапов: I этап оплавления (1), II этап оплавления (2), форсировка (3), осадка (4), гратосъем (5). Каждому этапу соответствуют определенные характеристики (режимы сварки):  $I$  – сила тока, А;  $U$  – напряжение, В;  $S$  – величина перемещения подвижной станины, мм;  $P$  – давление в системе, атм;  $V$  – скорость перемещения подвижной станины, мм/с;  $T$  – длительность этапа, с (индексы соответствуют этапам 1 – 5).

Технология сварки рельсов на рельсосварочных предприятиях включает в себя обязательную сварку контрольных образцов в начале рабочей смены. Свариваются по два образца на каждой сварочной машине, после чего согласно СТО РЖД 1.08.002 – 2009 «Рельсы железнодорожные, сваренные электроконтактным способом» проводят испытания нетермообработанных стыков на трехточечный статический изгиб. Испытания проводят на прессе типа ПМС-320. Испытание одного контрольного образца проводят с приложением нагруз-

ки на головку (растяжение в подошве), второй контрольный образец нагружают на подошву (растяжение в головке). Результатами испытаний являются значения усилия, возникающего при изгибе ( $P_{изг}$ , кН), и значения стрелы прогиба ( $f_{пр}$ , мм), при которых происходит разрушение контрольного образца, или максимальные значения этих показателей, если образец не разрушился во время испытаний.

В настоящей работе проведена оптимизация процесса контактной сварки рельсов типа Р65 на машине К1100.

Для вышеописанных этапов при сварке на машине К1100 обычно используют значения основных параметров, приведенных в табл. 1.

По параметрам технологического процесса производственного контроля ранее были разработаны математические модели процесса контактной сварки рельсов на машине К1100, которые позволяют оценивать полноту влияния этих параметров на качество сварного шва:

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

$$f_{пр} = -194,21 - 0,24I_{макс5} - 0,02T_{нач4} + 0,07I_{макс4} + 2,43P_{макс4} - 0,75P_{ср4} + 1,94V_{ср4} + 0,01I_{макс3} + 0,05T_{длит1} + 0,08I_{ср1} - 3,32P_{ср1},$$

где индекс 1 – 5 означают номер этапа.

Современная аппаратура управления обеспечивает работу в разных режимах: «Ручное управление», «Полуавтоматическое управление», «Автоматическое управление». Режим

Таблица 1

**Значения основных параметров при сварке на машине К1100**

| Этап               | $T$ , с   | Интервалы значений параметров сварки |           |           |             |             |
|--------------------|-----------|--------------------------------------|-----------|-----------|-------------|-------------|
|                    |           | $I$ , 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         | 2 – 324                              | 1 – 105   | 71 – 129  | 0,11 – 0,56 | 0,1 – 1,0   |

«Ручное управление» обеспечивает безопасную эксплуатацию машины с соблюдением всех блокировок, режим «Полуавтоматическое управление» – подготовительные операции для сварки, режим «Автоматическое управление» – сварку изделия по заданной программе. Контроллер выполняет все функции управления технологическим процессом сварки. Компьютер обеспечивает анимацию процесса, цифровую и графическую визуализацию параметров процесса, документирование параметров сварки. Визуализация процесса сварки в виде осциллограммы позволяет представлять информацию по динамическому изменению программируемых параметров: напряжение  $U$ , сварочный ток  $I$ , давление  $P$  в цилиндре, перемещение  $S$  заготовок в процессе получения соединения.

Управление оплавлением при сварке осуществляется путем корректировки задаваемой скорости оплавления в зависимости от текущего значения тока. Это осуществляется изменением: уставок начала коррекций скорости (тока коррекции  $I_{кор}$ ); тока  $I_{ост}$ , останавливающего подачу; тока  $I_{рев}$ , дающего команду на реверс. Для этого программируемые значения скорости и тока оплавления, реализующие обратную связь величин  $I_{кор}$ ,  $I_{ост}$ ,  $I_{рев}$ , подбирают таким образом, чтобы фактическое среднее значение тока на осциллограмме было в два раза меньше тока короткого замыкания. Это соответствует максимуму электрической мощности, развиваемой в контакте между оплавляемыми торцами заготовок. Недопустимые отклонения тока в форме скачкообразных изменений его величины исключаются благодаря быстродействующей обратной связи. Эта же обратная связь стабилизирует текущее значение сварочного тока.

Принцип работы корректора скорости оплавления с обратной связью по сварочному току показан на рисунке: в точке пересечения кривых мощность, развиваемая машиной (2), и мощность, необходимая для оплавления деталей (1), одинаковы, что обеспечивает устойчивое протекание оплавления. При случайном увеличении тока от установившегося значения  $I_{уст}$  мощность, развиваемая машиной, оказывается больше мощности, необходимой для оплавления. Избыточная мощность способствует ускорению нагрева и разрушению элементарных контактов и, как следствие, увеличению сопротивления искрового промежутка, что сопровождается уменьшением тока до значения  $I_{уст}$ . При токе, меньшем  $I_{уст}$ , мощность, развиваемая машиной, оказывается меньше мощности, необходимой для оплавления. Со-

противление искрового промежутка уменьшается, что приводит к восстановлению установившегося значения тока. Если зависимость (1) использовать, чтобы задавать изменение скорости подачи деталей в функции тока, то такой корректор скорости обеспечит устойчивое оплавление по току [7].

В работе [7] приведено уравнение корректора, в котором зависимой величиной от текущего значения тока является напряжение на якоре электродвигателя привода перемещения подвижной плиты машины. После замены его на скорость перемещения подвижной плиты получим следующее уравнение корректора:

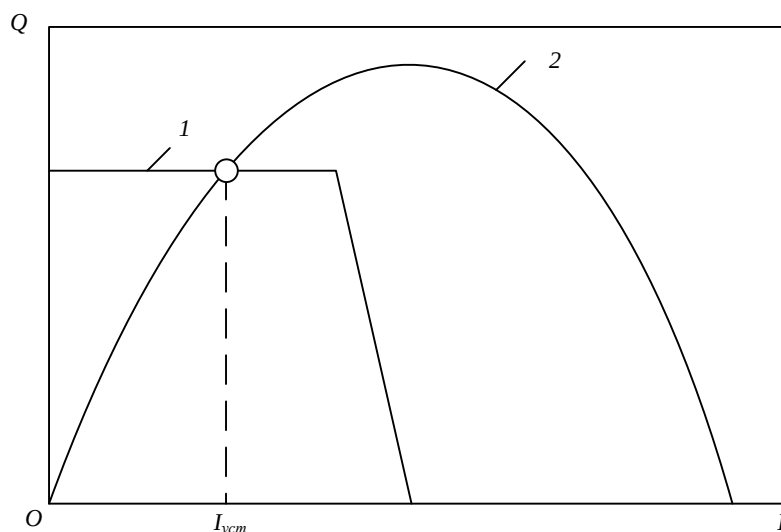
$$\Delta V = k (I_1(t) - I_0 + \delta) \text{ при } I_1(t) - I_0 > \delta,$$

где  $\Delta V$  – изменение скорости перемещения подвижной плиты;  $k$  – коэффициент пропорциональности;  $I_1(t)$  – текущее значение тока;  $I_0$  – заданное значение тока (установка);  $\delta$  – зона нечувствительности схемы сравнения.

Для нормальной работы корректора скорости необходимо постоянство среднего значения тока в течение всего времени сварки. При форсировке режим предусматривает нарастание тока перед осадкой, в этом случае подаются ложные команды на снижение скорости подачи деталей (см. рисунок).

В режиме пульсирующего оплавления для каждого этапа на сварочной машине К1100 возможна регулировка по следующим параметрам:

- путь – величина хода подвижной станины на участках;
- $I_1$  – ток, при котором машина будет двигаться вперед до достижения величины установленного тока (зона нечувствительности);
- $I_2$  – ток, при выполнении условия  $I_1 \geq I_2$  машина останавливается;
- $I_3$  – ток, при выполнении условия  $I_2 \geq I_3$  машина «разводится» по заданной зависимости;
- $V_b$  – скорость «сближения» машины при оплавлении;
- $V_n$  – скорость «разведения» машины при оплавлении;
- $T$  – время осадки под током;
- осадка – величина осадки;
- проковка – время после выполнения осадки и до команды на гратосъем;
- гратосъем – полный ход машины для снятия грата;
- исходное – точка начала сварки;
- напряжение по ступеням – сварочное напряжение по ступеням.



Зависимость мощности, необходимой для оплавления деталей (1), и мощности, развиваемой машиной (2), от тока ( $I_{уст}$  – установившееся значение тока)

Обычно оптимизацию проводят по одному наиболее важному выходному параметру, при этом для остальных выходных параметров задают ограничения. Однако если выходные параметры коррелируют, то нет необходимости задавать граничные значения для менее важного параметра. Чем ближе найденное значение коэффициента корреляции к единице, тем сильнее значение параметра зависит от того, какое значение принимает другой параметр, то есть между такими параметрами существует линейная связь, и при изучении процесса можно рассматривать только один из них [8].

Для проверки значимости коэффициента  $R$  парной корреляции между  $P_{изг}$  и  $f_{пр}$  сравним его значение с табличным (критическим) значением ( $r_{кр}$ ), которое приведено в работе [8]. Критическое значение коэффициента корреляции выбирается, исходя из числа степеней свободы ( $f = n - 2 = 78$ , где  $n = 80$  – количество экспериментов), при уровне значимости  $\alpha = 0,05$  ( $P = 0,95$ ). В рассматриваемом случае  $R = 0,65 > r_{кр} = 0,217$ ; таким образом, между

параметрами имеется тесная линейная связь, оптимизацию можно проводить только по одному параметру.

При оптимизации с использованием регрессионных моделей необходимо задать границы варьирования параметров. Этими границами являются максимальные и минимальные значения параметров, по которым строили регрессионные модели.

Максимальные и минимальные значения входных параметров приведены в табл. 2.

О характере влияния факторов свидетельствуют знаки коэффициентов регрессии: знак плюс – с увеличением значения фактора растет величина параметра оптимизации, знак минус – убывает. Так как нужно найти максимум функции отклика, то увеличение значений всех факторов, коэффициенты которых имеют знак плюс, благоприятно, а имеющих знак минус – неблагоприятно. В соответствии с этим подставим значения параметров в рассматриваемое уравнение.

Таблица 2

#### Максимальные и минимальные значения входных параметров

| Параметр                              | $P_{ср1}$ , атм | $I_{ср1}$ , А  | $V_{ср4}$ , мм/с | $P_{макс4}$ , атм | $P_{мин4}$ , атм | $U_{макс4}$ , В |
|---------------------------------------|-----------------|----------------|------------------|-------------------|------------------|-----------------|
| Знак коэффициента регрессии ( $b_i$ ) | –               | +              | +                | +                 | –                | –               |
| Максимальное значение                 | 32              | 513            | 9,33             | 129               | 100              | 423             |
| Минимальное значение                  | 30              | 434            | 1,56             | 123               | 60               | 359             |
| Параметр                              | $I_{макс4}$ , А | $I_{мин4}$ , А | $T_{нач4}$ , с   | $U_{макс5}$ , В   | $I_{макс5}$ , А  |                 |
| Знак коэффициента регрессии ( $b_i$ ) | +               | –              | –                | +                 | –                |                 |
| Максимальное значение                 | 1174            | 1075           | 144,9            | 105               | 324              |                 |
| Минимальное значение                  | 1074            | 6              | 99,1             | 2                 | 6                |                 |

При выборе наиболее благоприятных значений параметров усилие изгиба  $P_{изг}$  составляет 8437,37 кН. Расчетное значение  $P_{изг}$  практически в три раза выше среднего. В реальном процессе такие режимы реализовать невозможно, так как на пятом этапе оплавления 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 этом случае сила тока пропорциональна напряжению), поэтому одновременная подстановка минимального значения напряжения и максимального значения силы тока некорректна. Подставляя сначала максимальные, а потом минимальные значения напряжения и тока пятого этапа ( $U_{макс5}$ ,  $I_{макс5}$ ), получим наиболее близкие к истине максимальное и минимальное 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. При оптимальных значениях параметров ( $P_{ср1} = 30$  атм;  $I_{ср1} = 513$  А;  $V_{ср4} = 9,33$  мм/с;  $P_{макс4} = 129$  атм;  $P_{мин4} = 60$  атм;  $U_{макс4} = 359$  В;  $I_{макс4} = 1174$  А;  $I_{мин4} = 6$  А;  $T_{нач4} = 99,10$  с;  $U_{макс5} = 105$  В;  $I_{макс5} = 324$  А) прогнозируемые значения по рассматриваемой модели регрессии составляют:  $P_{изг} = 3923,07$  кН;  $f_{пр} = 75,83$  мм.

Для улучшения качества сварного соединения предлагается изменить используемые параметры режима на значения, приведенные выше. Оборудование позволяет установить оптимальные параметры:  $I_1 = 510 \div 520$  А,  $I_{ос} = 1100 \div 1200$  А. При минимальном времени оплавления наблюдаются лучшие показатели качества.

Некоторые из параметров невозможно задать программным путем, для их установки требуется наладка оборудования сварочной машины. Разность параметров  $P_{макс4}$  и  $P_{мин4}$  (четвертого этапа – осадки) говорит о градиенте давления в гидроцилиндрах во время осадки, то есть скорости изменения давления, которая определяет скорость передвижения подвижной станины при осадке. Средние значения скорости передвижения подвижной станины  $V_{ср4}$  варьируются в пределах 1,56 – 9,33 мм/с; этот показатель зависит от состояния гидроаккумулятора. При недостаточном давлении в гидроаккумуляторе необходимо снижать скорость осадки, что может повлечь образование неметаллических включений (оксидов) в металле сварного шва рельсов из электростали, и, соответственно, ухудшение механических свойств сварного стыка.

**Выводы.** На основании математических моделей процесса контактной сварки рельсов определены оптимальные параметры режимов сварки на машине K1100, которые позволяют повысить качество сварного соединения рельсов:  $I_1 = 510 \div 520$  А,  $I_{ос} = 1100 \div 1200$  А,  $T_{нач4} = 100 \div 110$  с,  $V_{ср4} = 9 \div 10$  мм/с. Рассмотрены принципы управления процессом контактной стыковой сварки рельсов. Показаны возможные причины снижения качества сварного стыка рельсов, для устранения которых требуется наладка оборудования.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шур Е.А., Резанов В.А. Комплексный метод контактной сварки рельсов // Вестник ВНИИЖТ. 2012. № 3. С. 20 – 22.
2. Karimine K., Uchino K., Okamura M. Susceptibility to and occurrence of HAZ liquation cracking in rail steels: Study of rail welding with high-C welding materials (4th Report) // Welding International. 1997. Vol. 11. Issue 6. P. 452 – 461.
3. Козырев Н.А. и др. Железнодорожные рельсы из электростали. – Новокузнецк: изд. ЕвразХолдинг, Новокузнецкий металлургический комбинат, 2006. – 388 с.
4. Kuchuk-Yatsenko S.I., Shvets Yu.V., Didkovskii A.V., Chvertko P.N., Shvets V.I., Mikitin Ya.I. Technology and equipment for resistance flash welding of railway crossings with rail ends through an austenitic insert // Welding International. 2008. Vol. 22. Issue 5. P. 338 – 341.
5. Шевченко Р.А. Совершенствование технологии сварки рельсовой стали с повышенным содержанием хрома. – В кн.: Труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Вып. 20. Ч. III. Естественные и технические науки / Под общ. ред. М.В. Темлянцев. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2016. С. 259 – 261.
6. Irving B., Long Island. Rail Road orders an all-welded fleet // Welding journal. 1997. Vol. 22. Issue 9. P. 33 – 37.
7. Гладков Э.А. Управление процессами и оборудованием при сварке: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. – М.: Издательский центр "Академия", 2006. – 432 с.
8. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер и др. – М.: Наука, 1976. – 280 с.

© 2017 г. Р.А. Шевченко, Н.А. Козырев, А.А. Усольцев, Л.П. Бащенко, С.В. Князев  
Поступила 08 февраля 2017 г.