

К ВОПРОСУ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СВАРНЫХ СТЫКОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ

Е. А. ПАНТЕЛЕЙМОНОВ

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Приведены особенности конструкции индукторов с магнитопроводами, применяемые в переносном модуле для термической обработки сварных стыков железнодорожных рельсов, выполненных контактной стыковой сваркой. Показано, что форма индуктирующего провода индукторов, расположение магнитопроводов относительно рельса и технология индукционного нагрева токами частотой 2,4 кГц обеспечивают равномерное распределение температурного поля в сварном стыке, низкий перепад температуры между поверхностными и глубинными слоями рельса, а также уменьшение времени нагрева. В результате термической обработки сварных стыков рельсов Р65 из стали К76Ф и рельсов УIC 60 из стали 900А на переносном модуле ИЭС им. Е. О. Патона существенно изменяется микроструктура металла сварных стыков, равномерно распределяется твердость *HRC* по ширине ЗТВ, уменьшается отклонение твердости *HRC* от уровня основного металла. Библиогр. 7, табл. 2, рис. 6.

Ключевые слова: рельсы, сварные стыки, термическая обработка, индукторы, микроструктура, твердость

При термической обработке (ТО) сварных стыков железнодорожных рельсов, выполненных контактной стыковой сваркой, применяется технология индукционного нагрева сварных стыков токами высокой частоты с последующей закалкой поверхности катания головки рельса сжатым воздухом. Технология ТО должна обеспечить структурную зональную однородность сварных стыков, выравнивание твердости металла, устранение неблагоприятной эпюры внутренних остаточных напряжений [1, 2]. Для ТО сварных стыков рельсов в цеховых и путевых условиях на установках типа УИН-001 различной модификации [3] использовалась частота тока источника индукционного нагрева 8,0...16,0 кГц. Нагрев сварных стыков рельсов типа Р65 до температуры 850...950 °С со сварочного тепла выполняется за время 240 с. Установки считаются ресурсосберегающими с точки зрения мощности источника индукционного нагрева [4]. Переносной модуль установок УИН-001, предназначенный для проведения ТО в путевых условиях, не требует специальных приводов и механизмов для размещения на место сварного стыка и перемещения по рельсу [5].

Однако расположение индуктирующих проводников индукторов вдоль рельса в установках УИН-001 приводит к неоправданному увеличению ширины зоны термического влияния (ЗТВ), следовательно, к увеличению времени нагрева сварных стыков. Большое время нагрева при ТО стыков рельсов в условиях рельсосварочных предприятий тормозит темп производства рельсовых плетей.

Для сокращения времени нагрева сварных стыков и уменьшения перепада температуры между

поверхностными и глубинными слоями рельса целесообразно уменьшить частоту тока. В ИЭС испытана модель переносного модуля для ТО сварных стыков железнодорожных рельсов токами частотой 2,4 кГц. Отличительной особенностью переносного модуля является применение индукторов с магнитопроводами. Индуктирующий провод индуктора ориентирован поперек рельса, повторяет изгиб его поверхности и выполнен с увеличенным воздушным зазором над шейкой и перьями рельса. Ширина индуктирующего провода превышает ширину ЗТВ сварных стыков. Магнитопроводы установлены над поверхностью катания головки, боковыми гранями головки, шейкой и нижней поверхностью подошвы рельса [6, 7]. Тем самым, учитывается сложная форма поверхности рельса, улучшается магнитная связь системы индуктор-деталь и достигается необходимое распределение мощности по элементам рельса. Увеличивается часть мощности, передаваемая в головку и в подошву, по сравнению с шейкой, и уменьшается в перья рельса, предотвращая их перегрев.

В настоящей работе приведены результаты испытания переносного модуля при ТО сварных стыков рельсов Р65 из стали К76Ф и рельсов УIC60 из стали 900А. Качество ТО определяли на основании результатов металлографических исследований стыков после сварки и после ТО. Нагрев стыков выполняли при мощности источника индукционного нагрева 90 кВт. Начальная температура стыков 20 °С. Время нагрева сварных стыков 180 с, что существенно меньше времени, принятого на установках типа УИН-001. За это время температура в плоскости соединения стыков достигла следующих значений: на поверхности ка-

Таблица 1. Балл зерна металла сварных стыков рельсов Р65 после сварки и после ТО

Элемент рельса	Балл зерна после сварки			Балл зерна после ТО			Основной металл
	Линия соединения	5 мм от линии соединения	Зона неполной перекристаллизации	Линия соединения	5 мм от линии соединения	Зона неполной перекристаллизации	
Головка	2-3	4-5	6-7	7-8	6	7	7-8 (5-6)
Шейка	3	5	7	7-8	6-7	7	6
Подшва	3	5	7	7-8	6	7	5-6

тания головки 900...920 °С; на глубине 24 мм от поверхности катания головки 850 °С; по центру шейки 870 °С; на глубине 12 мм от низа подошвы 840 °С. Время нагрева поверхности катания головки до температуры точки магнитных превращений 50 с. После ТО сварные стыки охлаждали на спокойном воздухе.

Металлографические исследования сварных стыков проводили на глубине 24 мм от поверхности катания головки, по центру шейки и на глубине 12 мм от низа подошвы. Определяли микроструктуру металла по ширине ЗТВ и распределение интегральной твердости по Роквеллу (HRC). Полированные поверхности образцов для исследования совпадали с осью симметрии поперечной плоскости рельса. Вдоль рельса поверхность охватывала основной металл и ширину ЗТВ. Для выявления микроструктуры использовали метод химического травления в 4 %-м спиртовом растворе азотной кислоты. Величину зерна металла определяли по ГОСТ 5639-82. Интегральную твердость HRC измеряли на твердомере ТК-2М при нагрузке 150 кг.

Как показали исследования, микроструктура основного металла рельсов Р65 представляет собой сорбит. Имеются участки с баллом зерна 5-6 и 7-8 (табл. 1). После сварки ширина ЗТВ стыков 37...40 мм. Микроструктура металла по линии соединения (рис. 1, а) состоит из сорбита и узких окантовок феррита по границам зерен. Зерно довольно крупное, величина зерна соответствует баллу 2-3 (табл. 1). В зоне крупного зерна, на расстоянии 5 мм от линии соединения (рис. 1, б), имеет место практически чистая сорбитная структура с баллом зерна 4-5. В зоне неполной перекристаллизации, на расстоянии 18...20 мм от линии соединения, наблюдается значительное измельчение сорбитного зерна до балла 6-7. После ТО сварных стыков ширина ЗТВ

55...60 мм. Микроструктура металла по ширине ЗТВ заметно измельчилась. По линии соединения (рис. 1, в) она состоит из отдельных выделений сорбита и феррита. Количество феррита увеличилось. Балл зерна 7-8. На расстоянии 5 мм от линии соединения (рис. 1, г) балл зерна 6-7. Аналогичная микроструктура на расстоянии 18...20 мм от линии соединения. Микроструктура металла в зоне неполной перекристаллизации, на расстоянии 30 мм от линии соединения, не отличается от образцов после сварки. Балл зерна 7.

Графики, приведенные на рис. 2, отражают характер распределения интегральной твердости HRC вдоль рельса после сварки и после ТО. В стыках после сварки (рис. 2, а) твердость по линии соединения в головке HRC 31, что выше уровня основного металла (HRC 27...28). В шейке и в подошве твердость по линии соединения HRC 27...28. В головке рельса, на расстоянии 4...6 мм от линии соединения, твердость увеличилась до HRC 35. В зоне неполной перекристаллизации, на расстоянии 20 мм от линии соединения, твердость уменьшилась до HRC 23...24. После ТО сварных стыков изменение структуры металла привело к изменению твердости (рис. 2, б). По линии соединения она приблизилась к уровню основного металла. В головке и в шейке твердость HRC 26...28, в подошве HRC 25. Твердость в зоне крупного зерна в головке HRC 32...33. Далее, до зоны неполной перекристаллизации, твердость стабилизировалась до уровня HRC 33, что выше уровня основного металла. Твердость на расстоянии 20 мм от линии соединения изменилась от HRC 23...24 (после сварки) до уровня HRC 33 (после ТО). В зоне неполной перекристаллизации, на расстоянии 30...35 мм от линии соединения, твердость не отличалась от стыков после сварки. Следует отметить равномерное распределение

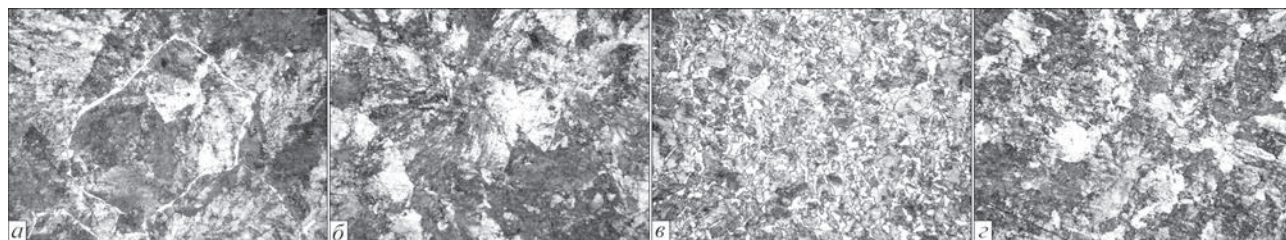


Рис. 1. Микроструктура (×500) металла сварных стыков рельсов Р65: линия соединения (а, в); на расстоянии 5 мм от линии соединения (б, г); после сварки (а, б); после ТО (в, г)

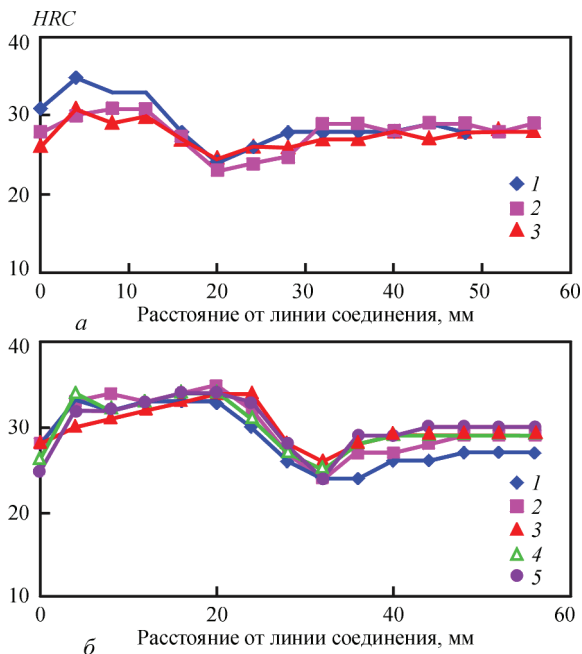


Рис. 2. Распределение твердости *HRC* по ширине ЗТВ сварных стыков рельсов Р65: а — после сварки (1 — головка; 2 — шейка; 3 — подошва); б — после ТО (1 — центр головки; 2 — переход головка-шейка; 3 — центр шейки; 4 — переход шейка-подошва; 5 — центр подошвы)

температурного поля в сварных стыках рельсов. Уровень твердости в местах перехода головки в шейку (на глубине 40 мм от поверхности катания головки) и шейки в подошву (на глубине 25 мм от нижней поверхности подошвы), в проблемных местах для индукционного нагрева токами высокой частоты, соответствует уровню твердости в головке, в шейке и в подошве рельса.

После ТО сварных стыков уменьшилось отклонение твердости *HRC* от уровня основного металла (рис. 3). В частности, по линии соединения в головке рельса отклонение твердости уменьшилось от 10 % (после сварки) до 3 % (после ТО), в зоне от 5 до 20 мм до линии соединения — от 20 до 13 %. В зоне неполной перекристаллизации отклонение твердости 17 % (после сварки) и 18 % (после ТО).

В рельсах типа UIC60 из стали 900А микроструктура основного металла представляет собой сорбит с баллом зерна 5-6 (табл. 2). Изменений балла зерна не отмечено. После сварки ширина ЗТВ стыков 40...42 мм. Микроструктура металла по линии соединения (рис. 4, а) состоит из смеси сорбитообразного и пластинчатого перлита. Про-

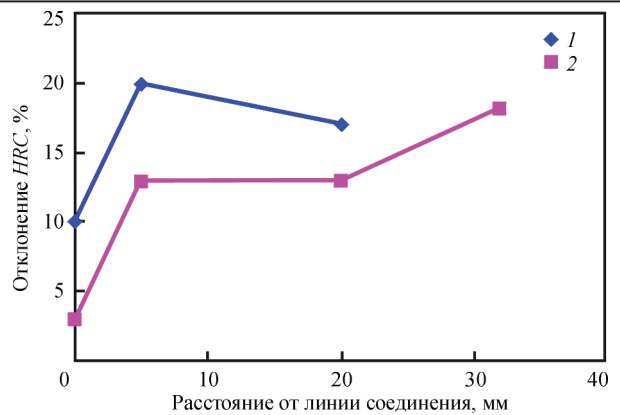


Рис. 3. Отклонение твердости *HRC* в головке сварных стыков рельсов Р65 от уровня основного металла после сварки (1) и после ТО (2)

являются тонкие прослойки феррита по границам зерен, а также отдельные участки ферритной составляющей. Балл зерна 2-3. На расстоянии 5 мм от линии соединения (рис. 4, б), в зоне крупного зерна, микроструктура металла в головке и в подошве сорбит, в шейке — сорбит и сорбитообразный перлит. Балл зерна 4-5. В зоне неполной перекристаллизации, на расстоянии 18...20 мм от линии соединения, наблюдается значительное измельчение структуры сорбита в головке до балла 7-8, в шейке измельчение сорбитообразного перлита до балла 9-10. После ТО сварных стыков рельсов ширина ЗТВ в головке и в подошве 64 мм, в шейке 58 мм. Микроструктура металла по линии соединения (рис. 4, в) представляет собой мелкозернистую сорбитную структуру с выделениями ферритной составляющей по границам зерен. В подошве ферритных выделений заметно меньше, чем в головке и в шейке рельса. Балл зерна 8. На расстоянии 5 мм от линии соединения (рис. 4, з) балл зерна 6-7. В зоне неполной перекристаллизации, на расстоянии 32 мм от линии соединения, микроструктура несущественно отличается от рельсов Р65 после ТО. Балл зерна 7-8.

Твердость основного металла рельсов UIC60 в головке *HRC* 35, в шейке и в подошве *HRC* 30. Исследуемые стыки после сварки отличались резким снижением твердости *HRC* по линии соединения (рис. 5, б) от уровня основного металла, в головке до *HRC* 13, в подошве до *HRC* 15. В зоне крупного зерна, на расстоянии 5 мм от линии соединения, твердость находилась на уровне основного металла. В зоне неполной перекристаллизации,

Таблица 2. Балл зерна металла сварных стыков рельсов UIC60 после сварки и после ТО

Элемент рельса	Балл зерна после сварки			Балл зерна после ТО			Основной металл
	Линия соединения	5 мм от линии соединения	Зона неполной перекристаллизации	Линия соединения	5 мм от линии соединения	Зона неполной перекристаллизации	
Головка	2-3	4-5	7-8	8	6-7	7	5-6
Шейка	3-4	5	9-10	8	7	7-8	5-6
Подошва	3-4	4-5	9-10	8	6	7-8	5-6

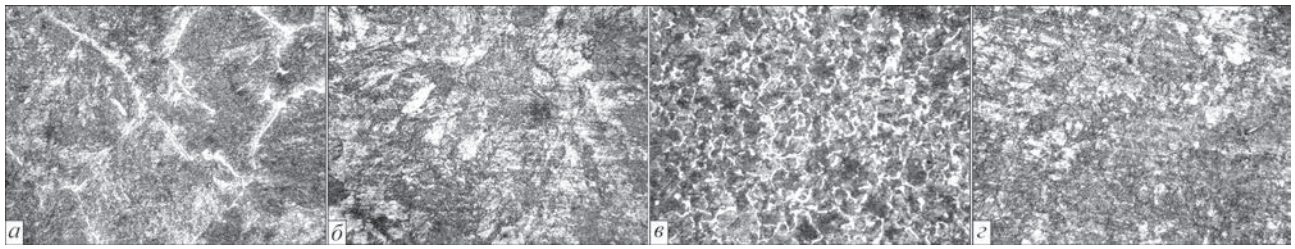


Рис. 4. Микроструктура ($\times 500$) металла сварных стыков рельсов UIC60: линия соединения (а, в); на расстоянии 5 мм от линии соединения (б, д); после сварки (а, б); после ТО (в, д)

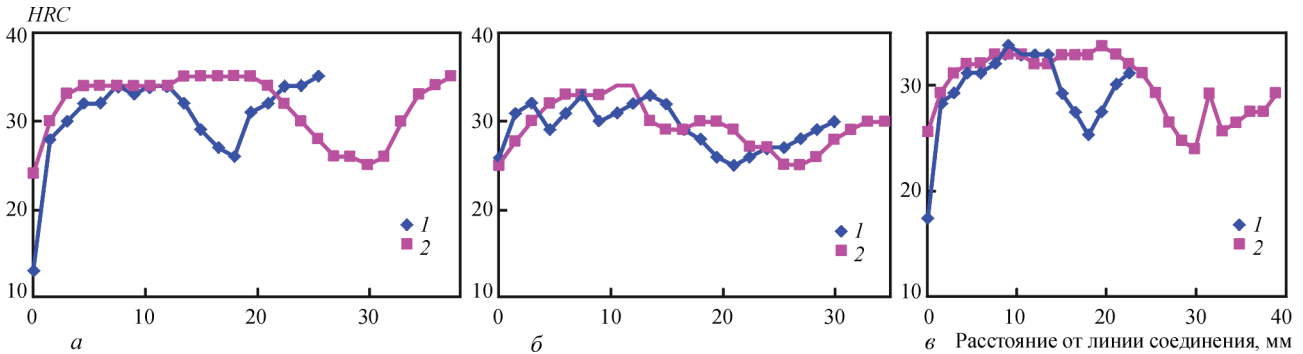


Рис. 5. Распределение твердости по ширине ЗТВ сварных стыков рельсов UIC60 в головке (а), шейке (б) и подошве (в); после сварки (1) и после ТО (2)

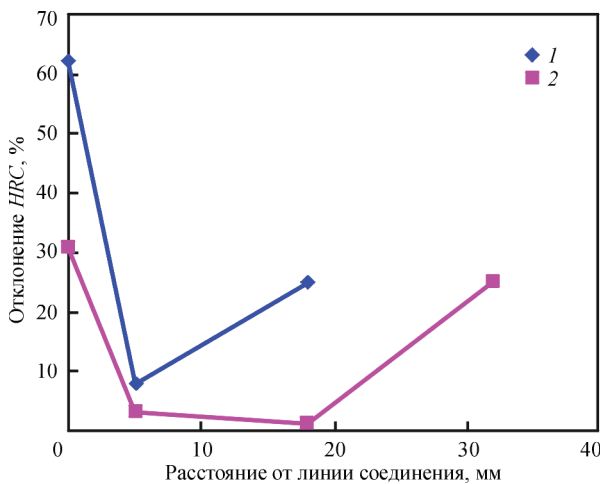


Рис. 6. Отклонение твердости HRC в головке рельсов UIC60 после сварки (1) и после ТО (2)

находящейся на расстоянии 18...22 мм от линии соединения, твердость в головке HRC 26, в шейке и в подошве HRC 23...25. После ТО сварных стыков отклонение твердости уменьшилось. По линии соединения в головке рельсов твердость HRC 24, в подошве HRC 24. На расстоянии 4...6 мм от линии соединения и до зоны неполной перекристаллизации твердость в головке HRC 34...35, что соответствует уровню основного металла. На расстоянии 18...22 мм от линии соединения (зона неполной перекристаллизации после сварки), твердость в головке увеличилась до уровня основного металла. В зоне неполной перекристаллизации снижение твердости не отличалось от стыков после сварки.

В головке рельсов отклонение твердости HRC от уровня основного металла (рис. 6) уменьшилось от 63 % (после сварки) до 30 % (после ТО).

В зоне крупного зерна, на расстоянии до 30 мм от линии соединения, отклонение твердости уменьшилось от 8 до 3 %. В зоне неполной перекристаллизации отклонение твердости HRC 25 % после сварки и после ТО.

Выводы

1. В переносном модуле ИЭС для ТО сварных стыков железнодорожных рельсов применение индукторов с магнитопроводами и технологии индукционного нагрева токами частотой 2,4 кГц обеспечивают равномерное распределение температурного поля в сварных стыках, низкий перепад температуры между поверхностными и глубинными слоями рельса, а также уменьшение времени нагрева.

2. В результате ТО сварных стыков рельсов P65 из стали K76Ф и рельсов UIC 60 из стали 900А на переносном модуле ИЭС существенно изменяется микроструктура металла сварных стыков, равномерно распределяется твердость HRC по ширине ЗТВ, уменьшается отклонение твердости HRC от уровня основного металла.

Список литературы

1. Генкин И. З. (2003) Термическая обработка стыков рельсов на индукционных установках. *Автоматическая сварка*, **9**, 41–44.
2. Нестеров Д. К., Сапожков В. Е., Левченко Н. Ф. и др. (1990) Термическая обработка рельсовой стали с использованием индукционного нагрева. *Металловедение и термическая обработка металлов*, **8**, 30–34.
3. Фешуков А. Н. (2016) *Установка термической обработки сварных стыков рельсов в полевых условиях*. РФ, Пат. 57752, МПК E01B31/18.
4. Резанов В. А., Федин В. М., Башлыков А. В. и др. (2013) Дифференцированная закалка сварных стыков рельсов. *Вестник ВНИИЖТ*, **2**, 28–33.

5. Федин В. М., Земан С. К., Борц А. И., Николин А. И. (2005) Создание нового технологического оборудования для восстановления старогодных рельсов. *Там же*, **4**, 19–23.
6. Пантелеймонов С. О. *Комплекс для термічної обробки зварених стиків залізничних рейок в шляхових умовах*. Україна, Пат. 114593, МПК E01B31/18. 10.03.2017.
7. Пантелеймонов Е. А., Губатюк Р. С. (2016) Индукционное устройство для термической обработки сварных стыков железнодорожных рельсов. *Автоматическая сварка*, **9**, 41–44.

References

1. Genkin, I.Z. (2003) Heat treatment of rail welded joints in induction units. *The Paton Welding J.*, **9**, 38-41.
2. Nesterov, D.K., Sapozhkov, V.E., Levchenko N.F. et al. (1990) Heat treatment of rail steel using induction heating. *Metallovedenie i Term. Obrabotka Metallov*, **8**, 30-34 [in Russian].
3. Feshchukov, A.N. (2016) *System for heat treatment of rail welded joints in track conditions*. Pat. 57752 RF, Int. Cl. E01B31/18 [in Russian].
4. Rezanov, V.A., Fedin, V.M., Bashlykov, A.V. et al. (2013) Differentiated hardening of rail welded joints. *Vestnik VNIIZHT*, **2**, 28-33 [in Russian].
5. Fedin, V.M., Zeman, S.K., Borts, A.I., Nikolin, A.I. (2005) Development of new technological equipment for restoration of used rails. *Ibid.*, **4**, 22-25 [in Russian].
6. Panteleymonov, S.O. *Complex for heat treatment of rail welded joints in track conditions*. Pat. 114593 Ukraine, Int. Cl. E01B31/18; 10.03.2017 [in Ukrainian].
7. Panteleymonov, E.A., Gubatyuk, R.S. (2016) Induction device for heat treatment of welded joints of railway rails. *The Paton Welding J.*, **9**, 41-43.

С. О. Пантелеймонов

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.
03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11.
E-mail: office@paton.kiev.ua

ДО ПИТАННЯ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ЗВАРНИХ СТИКІВ ЗАЛІЗНИЧНИХ РЕЙОК

Наведено особливості конструкції індукторів з магнітопроводами, що застосовуються в переносному модулі для термічної обробки зварних стиків залізничних рейок, виконаних контактним стиковим зварюванням. Показано, що форма ін-

дукуючого дроту індукторів, розташування магнітопроводів відносно рейки і технологія індукційного нагріву струмами частотою 2,4 кГц забезпечують рівномірний розподіл температурного поля в зварному стикі, низький перепад температури між поверхневими і глибинними шарами рейки, а також зменшення часу нагріву. В результаті термічної обробки зварних стиків рейок Р65 зі сталі К76Ф і рейок UIC 60 із сталі 900А на переносному модулі ІЕЗ ім. Є. О. Патона істотно змінюється мікроструктура металу зварних стиків, рівномірно розподіляється твердість *HRC* по ширині ЗТВ, зменшується відхилення твердості *HRC* від рівня основного металу. Бібліогр. 7, табл. 2, рис. 6.

Ключові слова: рейки, зварні стики, термічна обробка, індуктори, мікроструктура, твердість

E. A. Panteleymonov

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.
11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine.
E-mail: office@paton.kiev.ua

TO THE ISSUE OF HEAT TREATMENT OF WELDED BUTTS OF RAILS

The features of design of inductors with magnetic conductors are given, applied in a portable module for heat treatment of welded butts of rails produced by flash-butt welding. It is shown that the shape of the inducing wire of inductors, the location of magnetic conductors relative to the rail and the technology of induction heating by currents of 2.4 kHz frequency provide a uniform distribution of the temperature field in welded butt, low temperature difference between the surface and deep layers of the rail, and also a decrease in the heating time. As a result of heat treatment of welded butts of rails R65 of steel K76F and rails of UIC 60 of steel 900A on a portable module of the E.O. Paton Electric Welding Institute, the microstructure of metal of welded butts changes significantly, the hardness *HRC* is uniformly distributed over the width of HAZ, the deviation of hardness *HRC* from the level of base metal decreases. 7 Ref., 2 Tabl., 6 Fig.

Keywords: rails, welded butts, heat treatment, inductors, microstructure, hardness

Поступила в редакцію 01.02.2018



Международная инженерная ярмарка

1–5 октября 2018 г.

Брно, Чехия



В рамках ярмарки из пяти выставок будет проведена
24-я Международная выставка сварочных технологий.

Основная тема ярмарки — Индустрия 4.0
(автоматизация, роботизация, цифровые технологии).