Оригинальная статья
УДК 669.14
DOI 10.17073/0368-0797-2021-6-420-426

Исследование фазовых и структурных превращений при формировании сварного соединения из рельсовой стали. Сообщение 3. Использование термокинетической и изотермической диаграмм распада аустенита для выбора оптимальных режимов электроконтактной сварки

Е. В. Полевой [1], Ю. Н. Симонов [2], Н. А. Козырев [3], Р. А. Шевченко [3], А. Р. Михно [3]

[1] **АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат»** (Россия, 654043, Кемеровская область – Кузбасс, Новокузнецк, шоссе Космическое, 16)
[2] **Пермский национальный исследовательский политехнический университет** (Пермь, 614990, Комсомольский проспект, 29)
[3] **Сибирский государственный индустриальный университет** (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. При контактной стыковой сварке рельсов оплавлением происходит нагрев и непрерывное охлаждение металла в зоне термического влияния. Ускоренный нагрев и последующее интенсивное охлаждение, реализуемые пульсирующим методом оплавления, приводят к образованию закалочных структур. В последующем, при эксплуатации сварного стыка рельсов это ведет к образованию трещин и к хрупкому разрушению. Исследованы возможности использования контактного подогрева после сварки для исключения образования закалочных структур в металле сварного соединения из рельсовой стали R350LHT. Проведена запись термических циклов при сварке и последующем контактном подогреве. Установлена закономерность формирования структуры металла сварного шва, включая зону термического влияния, при импульсном контактном подогреве для рельсовой стали R350LHT. Показано, что контактный импульсный подогрев замедляет охлаждение сварного стыка и позволяет предотвратить образование закалочных структур. Однако контактный импульсный подогрев при использовании неоптимальных режимов может привести и к обратному эффекту. Определено, что при значительном вложении тепла с помощью контактного подогрева скорость охлаждения металла превышает критическую, процесс превращения проходит по бездиффузионному механизму с образованием крупнозернистой структуры мартенсита. Использование термокинетических и изотермических диаграмм распада аустенита при известных термических циклах сварки позволяет значительно сузить пределы поиска оптимальных режимов контактной стыковой сварки железнодорожных рельсов и последующего контактного подогрева. Использование оптимальных режимов контактного подогрева позволяет получить минимальную протяженность зон термического влияния с пониженной твердостью без образования закалочных структур в сварном стыке железнодорожных рельсов.

Ключевые слова: рельсовая сталь, распад переохлажденного аустенита, непрерывное охлаждение, контактная стыковая сварка, сварное соединение, закалочные структуры, зона термического влияния, контактный подогрев

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

Для цитирования: Полевой Е.В., Симонов Ю.Н., Козырев Н.А., Шевченко Р.А., Михно А.Р. Исследование фазовых и структурных превращений при формировании сварного соединения из рельсовой стали. Сообщение 3. Использование термокинетической и изотермической диаграмм распада аустенита для выбора оптимальных режимов электроконтактной сварки // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 6. С. 420–426. https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-6-420-426

Original article

Phase and structural transformations when forming a welded joint from rail steel. Report 3. The use of thermokinetic and isothermal diagrams of austenite decomposition for selection of optimal modes of electric contact welding

E. V. Polevoi [1], Yu. N. Simonov [2], N. A. Kozyrev [3], R. A. Shevchenko [3], A. R. Mikhno [3]

[1] **JSC "EVRAZ – Joint West Siberian Metallurgical Plant"** (16 Kosmicheskoe Route, Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654043, Russian Federation)
[2] **Perm National Research Polytechnic University** (29 Komsomolskii Ave., Perm 614990, Russian Federation)
[3] **Siberian State Industrial University** (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654007, Russian Federation)

Abstract. During contact flash welding of rails, the metal is heated and continuously cooled in the zone of thermal influence. Accelerated heating and subsequent intensive cooling, implemented by the pulsed flashing-off method, lead to the formation of quenching structures. Subsequently, during the operation of the rails welded joint, this leads to the formation of cracks and to brittle destruction. We have investigated the possibilities of using contact heating after welding to avoid the formation of quenching structures in the metal of the welded joint made of R350LHT rail steel. The thermal cycles during welding and subsequent contact heating were recorded. The regularity of formation of the weld metal structure was established including the zone of thermal influence during pulsed contact heating for R350LHT rail steel. It is shown that contact pulse heating slows down the welded joint cooling and prevents the formation of quenching structures. However, contact pulse heating when using suboptimal modes can also lead to the opposite effect. It is determined that with a significant investment of heat by contact heating, cooling rate of the metal exceeds the critical one, transformation process passes through a diffusion-free mechanism with the formation of martensite coarse-grained structure. The use of thermokinetic and isothermal diagrams of austenite decomposition at known thermal welding cycles allows us to significantly narrow the search limits for optimal modes of contact butt welding of railway rails and subsequent contact heating. The use of optimal contact heating modes makes it possible to obtain a minimum length of heat-affected zones with reduced hardness without the formation of quenching structures in the welded joint of railway rails.

Keywords: rail steel, decomposition of supercooled austenite, continuous cooling, contact butt welding, welded joint, hardening structures, heat-affected zone, contact heating

Funding: The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (RFBR) and the Kemerovo Region in the framework of scientific project No. 20-48-420003 p_a "Development of physicochemical and technological fundamentals of creation of essentially new welding method for differentially heat-strengthened rails".

For citation: Polevoi E.V., Simonov Yu.N., Kozyrev N.A., Shevchenko R.A., Mikhno A.R. Phase and structural transformations when forming a welded joint from rail steel. Report 3. The use of thermokinetic and isothermal diagrams of austenite decomposition for selection of optimal modes of electric contact welding. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 6, pp. 420–426. (In Russ.).
https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-6-420-426

Введение

При контактной сварке рельсов как и при других видах сварки происходит нагрев и непрерывное охлаждение металла в зоне термического влияния. В зависимости от химического состава стали выбирается технологический процесс сварки с использованием существующих способов [1 – 3]. Изучение структурных превращений, протекающих в рельсовой стали при сварке и термической обработке, имеет важное значение при выборе режимов обработки [4, 5].

В процессе охлаждения стали превращение аустенита происходит только после его переохлаждения ниже температуры $Ar1$, что объясняется изменением свободной энергии фаз и структуры сплавов при нагреве и охлаждении [6]. При переохлаждении стали аустенит превращается в пластинчатый перлит. При малой степени переохлаждения аустенита в интервале температур 711 – 650 °С образуется перлит. При большей степени переохлаждения в интервале температур 650 – 600 °С после превращения аустенита образуется сорбит. При еще больших степенях переохлаждения в интервале температур 600 – 500 °С получают троостит [7 – 9]. Высокая скорость охлаждения металла после сварки приводит к бездиффузионному превращению и образованию структуры мартенсита [10 – 14]. Выбор теплового режима основан на исключении образования структур закалки (мартенсита и бейнита), вызывающих дополнительные напряжения и трещины, которые приводят к разрушению рельсов [15, 16]. В связи с этим [17 – 19] особое значение приобретает разработка режимов сварки для железнодорожных рельсов высокоскоростных магистралей, изготовленных из хромистой стали.

Материалы и методика исследования

Для получения минимальной протяженности участка с пониженной твердостью предлагается проводить сварку рельсов на жестких режимах электроконтактным способом пульсирующим методом оплавления, а для исключения образования дефектов в виде закалочных структур управлять охлаждением сварного соединения с помощью контактного нагрева.

При исследовании возможности получения бездефектной структуры металла сварного соединения управление охлаждением металла после сварки проводили путем пропускания переменного электрического тока по заданным режимам. Исследуемыми параметрами управляемого охлаждения являлись: X_1 – время охлаждения после осадки (характеризуется скоростью охлаждения (степень переохлаждения аустенита) и температурой T_1, до которой происходит охлаждение); X_2 – время подогрева (характеризуется температурой T_2, до которой происходит нагрев); X_3 – время охлаждения после подогрева (характеризуется температурой T_1, до которой происходит охлаждение); X_4 – количество импульсов подогрева (характеризуется инкубационным периодом превращения аустенита в перлит).

Длительность выдержки (X_1) подбирали таким образом, чтобы сварной стык остывал до температуры, при которой образуется необходимая структура металла шва. Импульсы пропускания тока задавали с опре-

деленным интервалом. Длительность импульса (X_2) определяется температурой сварного стыка, которая не должна подниматься выше значений температур, требуемых для образования необходимой структуры. Длительность интервала (X_3) подбирается таким образом, чтобы температура сварного стыка не опускалась ниже температур, при которых образуется необходимая структура металла шва. Количеством импульсов (X_4) задается время, в течение которого поддерживается средняя температура сварного стыка, необходимая для формирования требуемой структуры при сварке.

Для сварки вырезали образцы из рельсов сечением 10×30 мм длиной 90 мм. Сечение образцов выбирали из условий возможности ведения процесса контактной стыковой сварки непрерывным оплавлением на машине МС-2008 по следующему режиму: ступень трансформатора 10; $K_{тр} = 65$; $U_2 = 5{,}76$ В; $I_2 = 11\,700$ А; $\Delta_{опл} = 10$ мм; $\Delta_{ос} = 4$ мм; $v_{опл} = 1$ мм/с (где $K_{тр}$ – коэффициент трансформации; U_2 – вторичное напряжение; I_2 – сварочный ток; $\Delta_{опл}$ и $\Delta_{ос}$ – припуск на оплавление и на осадку; $v_{опл}$ – скорость оплавления). Исследования проводили в лабораторных условиях. Для проведения исследований использовали образцы стали марки R350LHT. Режимы контактного импульсного подогрева приведены в таблице.

Для получения информации о термическом влиянии на структуру металла разработана методика измерения температур в зоне термического влияния во время сварки лабораторных образцов. Предполагаемая зона термического влияния изменялась при различных режимах от 5 до 25 мм от центра шва. Так как измерять температуру в центре шва контактными способами невозможно, температуру замеряли тепловизором HotFind-D в точке T_1. Для измерения температуры в зоне термического влияния применяли хромель-алюмелевые термопары.

Металлографический анализ структуры выполняли с помощью оптического микроскопа Olympus GX–51. Для создания оптического контраста образцы химически травили 4 %-ным раствором азотной кислоты в этиловом спирте.

Результаты экспериментов

При расчете распределения температуры по методике, приведенной в работе [20], определено, что при режиме *1* импульсного контактного подогрева скорость охлаждения металла шва составляет 5,8 м/с. При наложении полученной скорости охлаждения на диаграмму термокинетического распада аустенита (рис. 1, кривая *1*) становится ясно, что образование закалочных структур в металле сварного соединения неизбежно. При режиме *2* скорость охлаждения составляет 1,9 м/с, при наложении на диаграмму термокинетического распада аустенита (рис. 1, кривая *2*) видно, что превращение протекает по диффузионному механизму с образованием феррито-карбидной смеси различной степени дисперсности.

На рис. 2 показаны термические циклы при сварке оплавлением с последующим управляемым охлаждением. В соответствии с режимами сварки и управляемого охлаждения процесс нагрева и последующего импульсного подогрева занимает 90,8 с (режим *1*) и 67,4 с (режим *2*).

Режимы контактного подогрева

Contact heating modes

Режим	Значения факторов			
	X_1, с	X_2, с	X_3, с	X_4
1	25	0,6	10	4
2	20	0,2	20	4

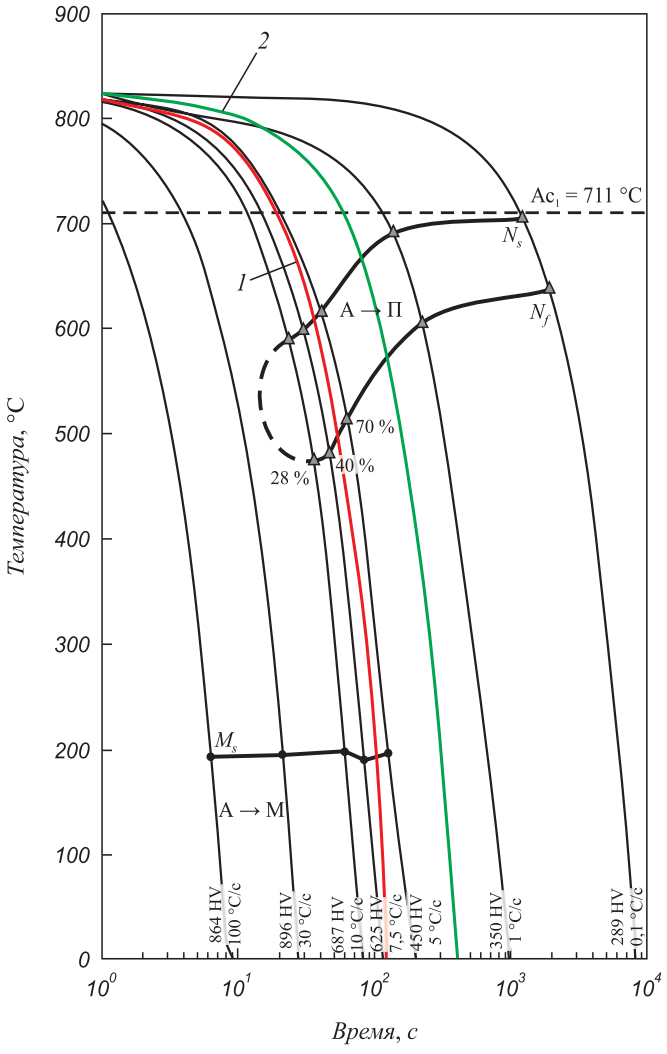

Рис. 1. Термокинетическая диаграмма распада переохлажденного аустенита: охлаждение металла шва на режимах контактного подогрева *1* и *2*

Fig. 1. Thermokinetic diagram of supercooled austenite decomposition: cooling of the weld metal in contact heating modes *1* and *2*

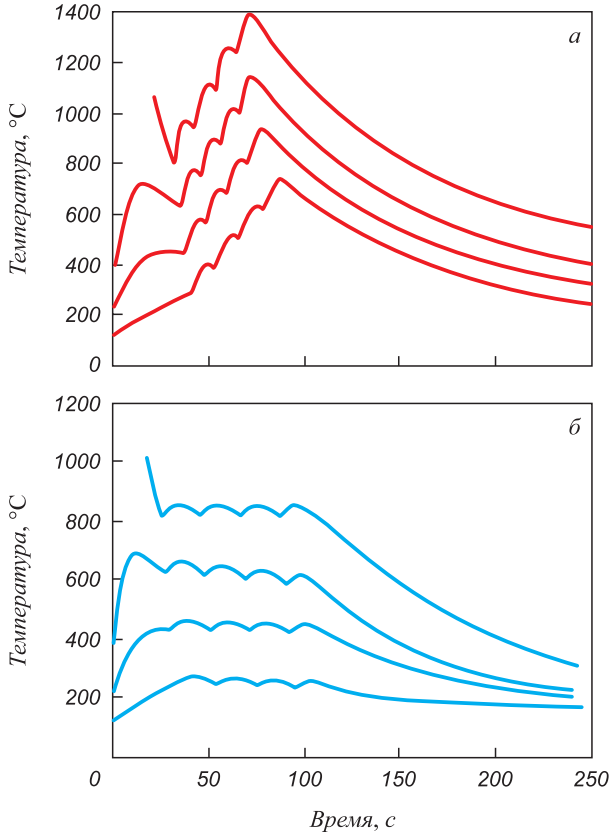

Рис. 2. Распределение температуры при сварке:
а – режим *1*; *б* – режим *2*

Fig. 2. Temperature distribution during welding:
а – mode *1*; *б* – mode *2*

На рис. 3 представлена микроструктура металла сварных швов. При изучении микроструктуры сварных соединений лабораторных образцов наблюдается наличие нескольких зон, образованных в результате действия тепла сварки и кратковременного подогрева, используемого для управляемого охлаждения.

При исследовании образца после сварки на режиме *1* отмечено наличие крупнозернистой структуры (2-3 номер шкалы ГОСТ 5639 – 82) в околошовной зоне и микроструктуры с преобладанием мартенситной составляющей, характерной для перегретого металла (рис. 3, *а*, *б*).

При просмотре травленых шлифов образцов по месту шва (полученного на режимах *1* и *2*) обезуглероженной зоны в виде ферритной сетки, образующейся, как правило, при оплавлении рельсовых торцов при сварке, стыков не выявлено, что обусловлено, вероятно, ускоренным нагревом и малым сечением образцов (рис. 3, *в*).

Микроструктура образца после сварки на режиме *2* на удалении до 2,5 мм от шва состоит из мелкодисперсного пластинчатого перлита (сорбита) с мелкими участками троостита. На расстоянии 2,5 – 4,5 мм наблюдается отпущенная структура скоагулированного сорбита. На удалении свыше 5 мм от шва микроструктура характерна для основного рельсового металла в термоупрочненном состоянии.

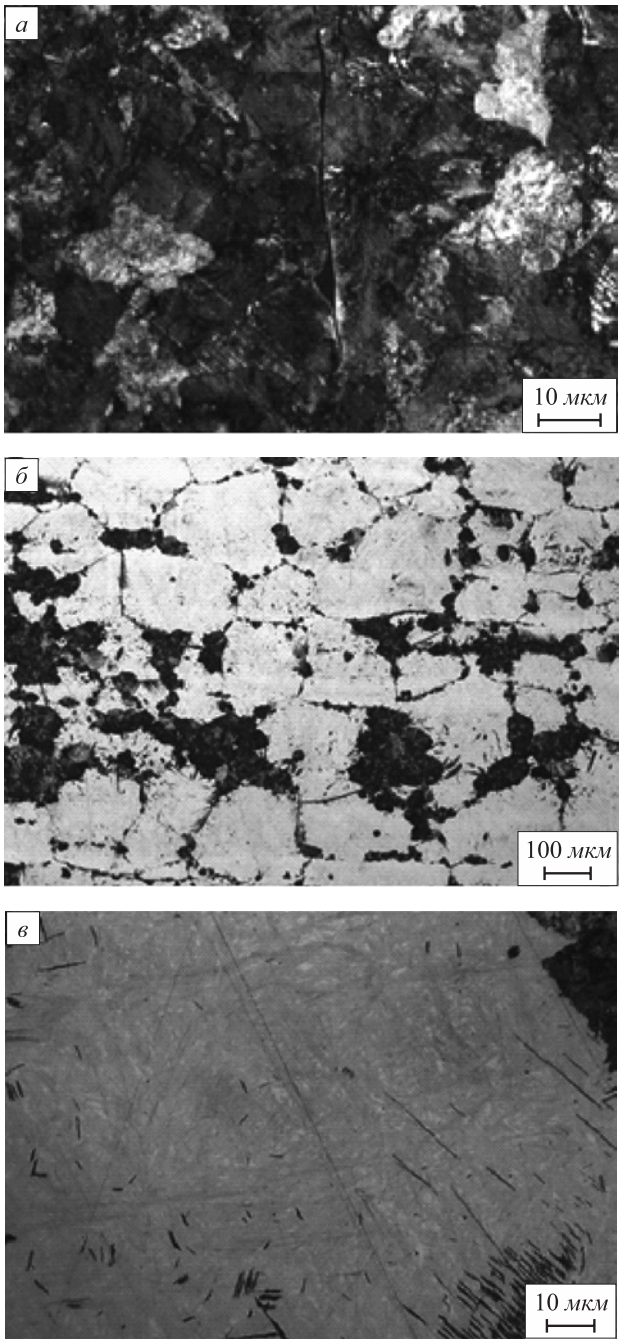

Рис. 3. Микроструктура металла сварного соединения образца, полученного при режиме *1* (*а*, *б*) и режиме *2* (*в*)

Fig. 3. Microstructure of the metal of welded joint of the sample obtained in mode *1* (*а*, *б*) and mode *2* (*в*)

На всех образцах присутствует участок сфероидизации, имеющий различные размеры в зависимости от режима управляемого охлаждения. На рис. 4 показана зависимость микротвердости от объемной доли структурных составляющих. При увеличении объемной доли зернистого перлита происходит снижение микротвердости. При наличии и увеличении количества закалочных структур происходит увеличение твердости.

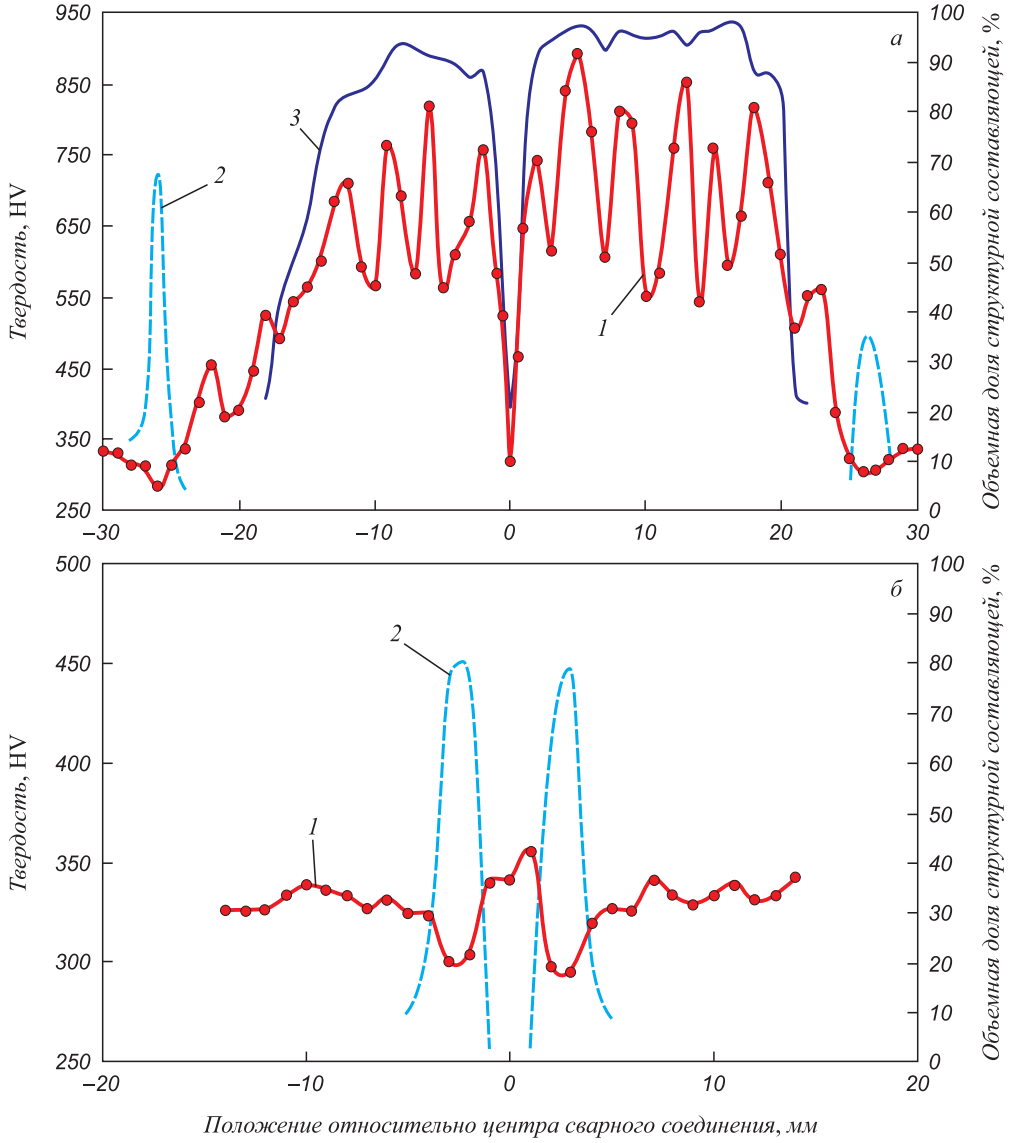

Рис. 4. Распределение микротвердости, объемной доли структурных составляющих в сварном соединении образца, полученного при режиме *1* (*а*) и режиме *2* (*б*):
1 – микротвердость; *2* и *3* – объемная доля зернистого перлита и мартенсита

Fig. 4. Distribution of microhardness, volume fraction of structural components in the welded joint of the sample obtained in mode *1* (*a*) and mode *2* (*б*) :
1 – microhardness; *2* and *3* – volume fraction of granular pearlite and martensite, respectively

Выводы

Установлена закономерность формирования структуры металла сварного шва (включая зону термического влияния) при импульсном контактном подогреве для рельсовой стали R350LHT. Показано, что контактный импульсный подогрев позволяет предотвратить образование закалочных структур, замедляет охлаждение сварного стыка. При использовании неоптимальных режимов контактный импульсный подогрев может привести к обратному эффекту.

Использование термокинтеческих и изотермических диаграмм распада аустенита при известных термических циклах сварки позволяет значительно сузить пределы поиска оптимальных режимов электроконтактной сварки.

Список литературы / References

1. Штайгер М.Г. Балановский А.Е. Анализ технологий для сварки высокопрочных рельсов с позиции структурообразования при строительстве и реконструкции скоростных железнодорожных магистралей. Часть 1 // Вестник Иркутского госу-

1. Shtaiger M.G. Balanovskii A.E. Analysis of technologies for welding high-strength rails according to the structure formation at construction and reconstruction of high-speed railways. Part 1. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2018,

дарственного технического университета. 2018. № 6 (137). С. 48–74. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-6-48-74

2. Dahl B., Mogard B., Gretoft B., Ulander B. Repair of rails on-site by welding // Svetsaren. 1995. Vol. 50. No. 2. P. 10–14.
3. Tachikawa H., Uneta T., Nishimoto H., Sasaki Y., Yanai J. Steel welding technologies for civil construction applications // Nippon Steel Technical Report. 2000. Vol. 82. No. 7. P. 35–41.
4. Okumura M., Karimine K., Uchino K., Yurioka N. Development of field fusion welding technology for railroad rails // Nippon Steel Technical Report. 1995. Vol. 65. No. 4. P. 41–49.
5. Myers J., Geiger G.H., Poirier D.R. Structure and properties of thermite welds in rails // Welding Journal. 1982. Vol. 258. No. 8. P. 258–268.
6. Yuan-qing Wang, Hui Zhou, Yong-jiu Shi, Bao-rui Feng. Mechanical properties and fracture toughness of rail steels and thermite welds at low temperature // International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials. 2012. Vol. 19. No. 5. P. 409–420. https://doi.org/10.1007/s12613-012-0572-8
7. 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
8. Тихомирова Л.Б., Ильиных А.С., Галай М.С., Сидоров Е.С. Исследование структуры и механических свойств алюминотермических сварных соединений рельсов // Вестник ЮУрГУ. Серия: Металлургия. 2016. Т. 16. № 3. С. 90–95. http://doi.org/10.14529/met160313
9. Saita K., Karimine K., Ueda M., Iwano K., Yamamoto T., Hiroguchi K. Trends in rail welding technologies and our future approach // Nippon Steel and Sumitomo Metal Technical Report. 2013. No. 105. P. 84–92.
10. Weingrill L., Krutzler J., Enzinger N. Temperature field evolution during flash butt welding of railway rails // Materials Science Forum. 2017. Vol. 879. P. 2088–2093. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.879.2088
11. Штайгер М.Г., Балановский А.Е. Анализ технологий для сварки высокопрочных рельсов с позиции структурообразования при строительстве и реконструкции скоростных железнодорожных магистралей (обзор). Часть 2 // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. № 7 (138). С. 41–68.
12. Bajic D., Kuzmenko G.V., Samardžić I. Welding of rails with new technology of arc welding // Metalurgija. 2013. Vol. 52. No. 3. P. 399–402.
13. Takimoto T. Latest welding technology for long rail and its reliability // Tetsu-to-Hagane. 1984. Vol. 70. No. 10. P. 40–45.
14. 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
15. Кархин В.А., Хомич П.Н., Иванов С.Ю. Расчет температурного поля при контактной стыковой сварке стали непрерывным оплавлением // Известия ТулГУ. Технические науки. 2008. № 2. С. 211–218.
16. Кархин В.А., Хомич П.Н., Федотов Б.В., Раямяки П. Анализ термических циклов при контактной стыковой сварке стали оплавлением // Сварочное производство. 2008. № 1. С. 12–17.
17. Шур Е.А., Резанов В.А. Комплексный метод контактной сварки рельсов // Вестник ВНИИЖТ. 2012. № 3. С. 20–22.
18. Резанов В.А., Федин В.М., Башлыков А.В., Фимкин А.И., Земан С.К. Дифференцированная закалка сварных стыков рельсов // Вестник ВНИИЖТ. 2013. № 2. С. 28–34.
19. Кучук-Яценко С.И., Богорский М.В., Горонков Н.Д. Контактная стыковая сварка рельсов повышенной прочности // Автоматическая сварка. 1994. № 3 (492). С. 34–40.

no. 6 (137), pp. 48–74. (In Russ.). https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-6-48-74

2. Dahl B., Mogard B., Gretoft B., Ulander B. Repair of rails on-site by welding. *Svetsaren*. 1995, vol. 50, no. 2, pp. 10–14.
3. Tachikawa H., Uneta T., Nishimoto H., Sasaki Y., Yanai J. Steel welding technologies for civil construction applications. *Nippon Steel Technical Report*. 2000, vol. 82, no. 7, pp. 35–41.
4. Okumura M., Karimine K., Uchino K., Yurioka N. Development of field fusion welding technology for railroad rails. *Nippon Steel Technical Report*. 1995, vol. 65, no. 4, pp. 41–49.
5. Myers J., Geiger G.H., Poirier D.R. Structure and properties of thermite welds in rails. *Welding Journal*. 1982, vol. 258, no. 8, pp. 258–268.
6. Yuan-qing Wang, Hui Zhou, Yong-jiu Shi, Bao-rui Feng. Mechanical properties and fracture toughness of rail steels and thermite welds at low temperature. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2012, vol. 19, no. 5, pp. 409–420. https://doi.org/10.1007/s12613-012-0572-8
7. 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
8. Tikhomirova L.B., Il'inykh A.S., Galai M.S., Sidorov E.S. Investigation of the structure and mechanical properties of aluminum-thermal welded joints of rails. *Vestnik YuUrGU. Seriya: Metallurgiya*. 2016, vol. 16, no. 3, pp. 90–95. (In Russ.). http://doi.org/10.14529/met160313
9. Saita K., Karimine K., Ueda M., Iwano K., Yamamoto T., Hiroguchi K. Trends in rail welding technologies and our future approach. *Nippon Steel and Sumitomo Metal Technical Report*. 2013, no. 105, pp. 84–92.
10. Weingrill L., Krutzler J., Enzinger N. Temperature field evolution during flash butt welding of railway rails. *Materials Science Forum*. 2017, vol. 879, pp. 2088–2093. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.879.2088
11. Shtaiger M.G., Balanovskii A.E. Analysis of technologies for welding high-strength rails according to the structure formation at construction and reconstruction of high-speed railways. Part 2. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2018, no. 7 (138), pp. 41–68. (In Russ.).
12. Bajic D., Kuzmenko G.V., Samardžić I. Welding of rails with new technology of arc welding. *Metalurgija*. 2013, vol. 52, no. 3, pp. 399–402.
13. Takimoto T. Latest welding technology for long rail and its reliability. *Tetsu-to-Hagane*. 1984, vol. 70, no. 10, pp. 40–45.
14. 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. https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-2-93-101
15. Karkhin V.A., Khomich P.N., Ivanov S.Yu. Calculation of temperature field during continuous flash contact welding of steel. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki*. 2008, no. 2, pp. 211–218. (In Russ.).
16. Karkhin V.A., Khomich P.N., Fedotov B.V., Rayamyaki P. Analysis of thermal cycles in contact flash welding of steel. *Svarochnoe proizvodstvo*. 2008, no. 1, pp. 12–17. (In Russ.).
17. Shur E.A., Rezanov V.A. Complex method of rails contact welding. *Vestnik VNIIZhT*. 2012, no. 3, pp. 20–22. (In Russ.).
18. Rezanov V.A., Fedin V.M., Bashlykov A.V., Fimkin A.I., Zeman S.K. Differentiated hardening of rails welded joints. *Vestnik VNIIZhT*. 2013, no. 2, pp. 28–34. (In Russ.).
19. 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.).

20. Шевченко Р.А., Козырев Н.А., Шишкин П.Е., Крюков Р.Е., Усольцев А.А. Расчет оптимальных режимов электроконтактной сварки железнодорожных рельсов // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии. 2016. № 37. С. 175–180.

20. Shevchenko R.A., Kozyrev N.A., Shishkin P.E., Kryukov R.E., Usol'tsev A.A. Calculation of optimal modes of electric contact welding of railway rails. *Vestnik gorno-metallurgicheskoi sektsii Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Otdelenie metallurgii*. 2016, no. 37, pp. 175–180. (In Russ.).

Сведения об авторах / Information about the authors

Егор Владимирович Полевой, *к.т.н., начальник бюро металловедения и термической обработки технического отдела рельсовой площадки,* АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат»
E-mail: egor.polevoj@evraz.com

Egor V. Polevoi, *Cand. Sci. (Eng.), Head of the Bureau of Metal Science and Heat Treatment of Technical Department of the Rail Site,* JSC "EVRAZ – Joint West Siberian Metallurgical Plant"
E-mail: egor.polevoj@evraz.com

Юрий Николаевич Симонов, *д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Металловедение, термическая и лазерная обработка металлов»,* Пермский национальный исследовательский политехнический университет
E-mail: simonov@pstu.ru

Yurii N. Simonov, *Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Chair of Metal Science, Thermal and Laser Processing of Metals,* Perm National Research Polytechnic University
E-mail: simonov@pstu.ru

Николай Анатольевич Козырев, *д.т.н., профессор, заведующий кафедрой материаловедения, литейного и сварочного производства,* Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0002-7391-6816
E-mail: kozyrev_na@mtsp.sibsiu.ru

Nikolai A. Kozyrev, *Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Chair "Materials, Foundry and Welding Production",* Siberian State Industrial University
ORCID: 0000-0002-7391-6816
E-mail: kozyrev_na@mtsp.sibsiu.ru

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

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

Алексей Романович Михно, *магистрант кафедры материаловедения, литейного и сварочного производства,* Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: mikno-mm131@mail.ru

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

Вклад авторов:

Полевой Е.В. – подготовка образцов для проведения дилатометрических исследований, редактирование финальной версии.
Симонов Ю.Н. – проведение дилатометрических исследований, анализ дилатограмм, построение термокинетической диаграммы распада переохлажденного аустенита.
Козырев Н.А. – научное руководство, определение целей и задач, проведение металлографических исследований, подбор и анализ источников информации по теме структурных превращений в рельсовой стали, редактирование финальной версии.
Шевченко Р.А. – проведение измерений микротвердости, проведение расчетов, редактирование финальной версии.
Михно А.Р. – подбор и анализ источников информации по теме распада переохлажденного аустенита для рельсовых сталей, редактирование финальной версии.

Поступила в редакцию 24.09.2020
После доработки 15.01.2021
Принята к публикации 20.01.2021

Received 24.09.2020
Revised 15.01.2021
Accepted 20.01.2021