



МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 669.021

И.Ю. КУДЕЛКО

научный сотрудник лаборатории проблем надежности и металлоемкости карьерных автосамосвалов большой и особо большой грузоподъемности НТЦ «Карьерная техника»¹

E-mail: samosvaloim@mail.ru

А.Г. СИДОРЕНКО, канд. техн. наук, доц.

заведующий лабораторией проблем надежности и металлоемкости карьерных автосамосвалов большой и особо большой грузоподъемности НТЦ «Карьерная техника»¹

E-mail: samosvaloim@mail.ru

И.И. ВЕГЕРА, канд. техн. наук., доц.

начальник отдела индукционных технологий и термической обработки²

E-mail: smto@tut.by

А.В. ЗИЗИКО

заведующий сектором моделирования и опытно-конструкторских работ²

E-mail: a.ziziko@phti.by

¹Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

²Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 18.03.2024.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТНОЙ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ ИЗ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ

Приведены результаты исследований влияния скоростной электротермической обработки (СЭТО) на структуру и твердость различных зон сварного соединения из низколегированной конструкционной стали 10ХСНД. Показано, что проведение СЭТО при 950–980 °С приводит к формированию однородной мелкозернистой феррито-перлитной микроструктуры при практически неизменных величинах твердости во всех зонах сварного соединения за исключением корня шва, где регистрируются несколько большие значения микротвердости.

Ключевые слова: сварное соединение, низколегированная конструкционная сталь, скоростная электротермическая обработка, структура

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2024-2-67-61-68>

Введение. Для несущих сварных конструкций мобильных машин широко применяют конструкционную низколегированную сталь повышенной прочности. В процессе изготовления конструкций применяемые материалы и сварные соединения подвергаются значительным деформационным и термическим воздействиям, что приводит к существенным изменениям их структуры и сниже-

нию, как правило, физико-механических и эксплуатационных характеристик [1–3].

С целью оптимизации структуры и повышения механических характеристик сварных соединений их нередко подвергают различным видам термической обработки, среди которых весьма перспективной является СЭТО методом индукционного нагрева. Следует отметить, что удельный

вес индукционного нагрева металла под термическую обработку в различных странах неуклонно растет [4–6]. Однако темпы применения СЭТО сдерживаются отсутствием полных и систематических данных по оптимальным режимам такого вида термической обработки для различных марок сталей, фазовым и структурным превращениям в сталях в условиях скоростного нагрева, а также о характере изменения механических свойств в зависимости от температуры, скорости и времени нагрева и охлаждения.

В связи с этим развитие научных основ скоростного нагрева различных марок сталей и сплавов является актуальной задачей, решение которой будет способствовать более быстрому и широко-масштабному применению скоростной электротермической обработки в машиностроении. При этом важной задачей является исследование кинетики структурных и фазовых превращений при скоростной термической обработке методом индукционного нагрева, протекающих в металлах, подвергшихся высокотемпературному воздействию при сварке. Индукционный нагрев является экономичным и высокопроизводительным способом термической обработки, не уступающим методам стандартной печной обработки [7–11]. Теоретические основы индукционного нагрева и рекомендации по его применению достаточно полно изложены в основополагающих работах [12–18].

Целью работы является определение технологических параметров СЭТО и оценка ее влияния на структуру и твердость сварного соединения из низколегированной конструкционной стали 10ХСНД, применяемой для изготовления элементов рамы мобильных машин.

В качестве объекта исследования использовались образцы сварного соединения из стали 10ХСНД, выполненные с учетом геометрии и технологии сварки элементов рамы карьерного самосвала. Сварка производилась сварочной проволокой Св-08Г2С диаметром 1,6 мм согласно инструкции СТБ ISO 15609-1-2009. Скоростная электротермическая обработка данных образцов осуществлялась в Физико-техническом институте НАН Беларуси на установке мощностью 160 кВт при силе тока 3600 А и диапазоне автоподстройки частот 8...50 кГц (рисунок 1).

В процессе СЭТО проводилась отработка режимов термической обработки, заключающаяся в нагреве исследуемых образцов до различных температур: 500, 600, 700 °С (образец № 1); 900 °С (образец № 2); 950–980 °С (образец № 3). Контроль температуры сварных соединений после нагрева индуктором осуществлялся с помощью оборудования Oprtris: измерительного блока ОРТСТЛЗМНЗСФ4 и пирометра ЗМНЗ-СФ4-СВЗ.

Исследование структуры и твердости сварного соединения осуществлялось в соответствии с ГОСТ 5639-82 и СТБ ИСО 9015-1-2023.



Рисунок 1 — Общий вид процесса скоростной электротермической обработки образца со сварным соединением на основе низколегированной конструкционной стали 10ХСНД
Figure 1 — General view of the process of high-speed electrothermal treatment of a sample with a welded joint on the basis of low-alloy structural steel 10KhSND

Металлографические исследования образцов со сварным соединением проводились на микроскопе Leica MEF 4A. Травление образцов с целью выявления структуры проходило в 10-процентном водном растворе азотной кислоты. Для выявления зеренной структуры использовался пересыщенный водный раствор пикриновой кислоты с добавлением ПАВ.

Измерения твердости проводились на твердомере VMNT MOT. Нагрузка на индентор при измерениях твердости составляла 1,961 и 49,03 Н.

На рисунках 2, 3 представлен общий вид шлифов образцов сварного соединения с нанесенными на них линиями и точками замеров микротвердости, а также макроструктурой сварного соединения.

Результаты исследований и их обсуждение. В результате исследования распределения твердости по сварному соединению образца № 1 (температура нагрева 500 °С) выявлены три характерные зоны изменения величин микротвердости: две зоны термического влияния (ЗТВ) и зона сварного шва (СШ) (рисунок 4).

Установлено, что средняя величина микротвердости основного металла (ОМ) составила 187 HV 0,2, СШ — 175 HV 0,2, ЗТВ — 210 HV 0,2. Наблюдается выраженный перепад величин микротвердости между ЗТВ и зоной СШ, составляющий 35 HV 0,2. В микроструктуре сварного шва дефектов в виде микротрещин, непроваров, несплавлений, связанных с качеством сварки, не обнаружено.

Регистрируется различная по морфологии и величине зерна микроструктура. В частности,

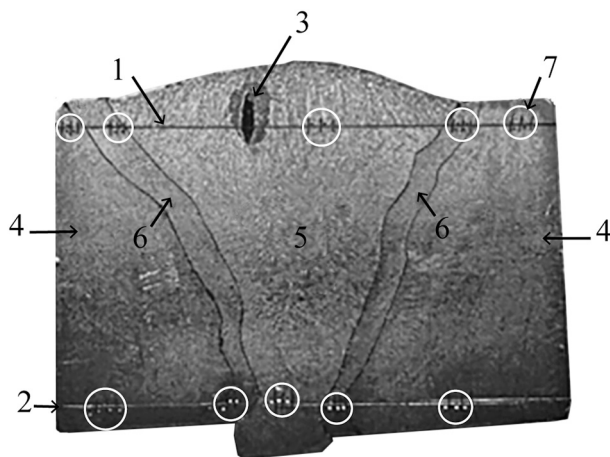


Рисунок 2 — Общий вид металлографического шлифа сварного соединения из стали 10ХСНД в исходном состоянии с расположением зон сварки, линий и точек замеров микротвердости: 1, 2 — линии замеров микротвердости; 3 — несплавление; 4 — основной металл; 5 — сварной шов; 6 — зона термического влияния; 7 — точки замеров микротвердости
Figure 2 — General view of the metallographic slip of the welded joint made of 10KhSND steel in the initial state with the location of welding zones, lines and points of microhardness measurements: 1, 2 — hardness measurement lines; 3 — non-melting; 4 — base metal; 5 — welded seam; 6 — heat affected zone; 7 — microhardness measurement points

в зоне СШ — дендритная грубая структура по высоте от 20 до 100 мкм и ширине от 3 до 10 мкм, отсутствуют участки с зернистой равномерной микроструктурой. В зоне термического влияния неравномерная структура, ближе к зоне СШ — грубая, вытянутая, в районе ОМ — равномерная.

В результате исследования распределения микротвердости по сварному соединению образца № 2 (температура нагрева 900 °С) также выявлены четыре характерные зоны, а именно: зона ОМ, две ЗТВ и зона СШ (рисунок 5).

Средняя величина микротвердости зоны ОМ составила 174 и 168 HV_{0,2}, зоны СШ — 186 HV_{0,2}, ЗТВ — 190 и 169 HV_{0,2}. Можно видеть, что наблюдается практически равномерное распределение микротвердости по всей ширине сварного соединения. В микроструктуре не обнаружено дефектов в виде микротрещин, непроваров, несплавлений, связанных с качеством сварки. При этом в зоне сварного шва наблюдаются участки с различной величиной зерна, а именно:

- участки с вытянутыми зёрнами (дендритами) с размером по высоте от 29 до 60 мкм, по ширине от 4 до 20 мкм (рисунок 6);
- участки со смешанной (дендритной и зернистой) структурой (рисунок 7);
- участки с зернистой равномерной структурой (рисунок 8).

Таким образом, из результатов исследования микроструктуры сварного соединения после различных температур скоростного нагрева следует, что обработка СЭТО в интервале температур 500–700 °С не приводит к перекристаллизации зеренной структуры, сформированной в результате

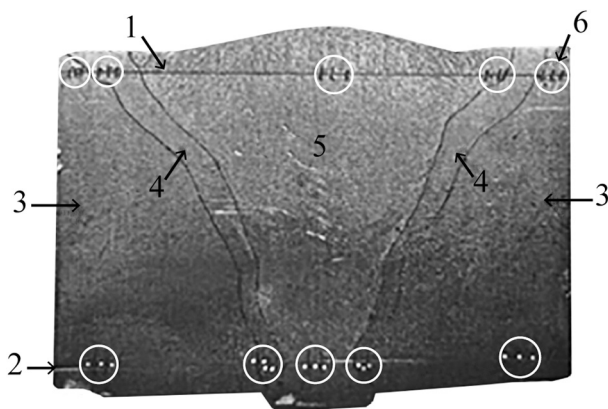


Рисунок 3 — Общий вид металлографического шлифа сварного соединения из стали 10ХСНД после СЭТО с расположением зон сварки, линий и точек замеров микротвердости (образец № 3, температура нагрева 950–980 °С): 1, 2 — линии замеров микротвердости; 3 — основной металл; 4 — зона термического влияния; 5 — сварной шов; 6 — точки замеров микротвердости
Figure 3 — General view of the metallographic slip of the welded joint made of 10KhSND steel after high-speed electrothermal treatment with location of welding zones, lines and points of microhardness measurements (sample no. 3, heating temperature 950–980 °С): 1, 2 — hardness measurement lines; 3 — base metal; 4 — heat affected zone; 5 — welded seam; 6 — microhardness measurement points

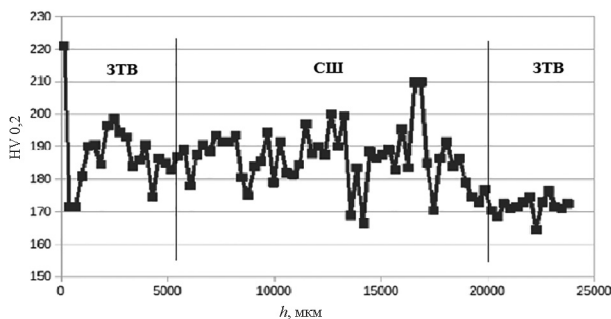


Рисунок 4 — Распределение микротвердости по характерным зонам сварного соединения образца № 1 (температура нагрева 500 °С)
Figure 4 — Microhardness distribution over characteristic zones of welded joint of sample no. 1 (heating temperature 500 °С)

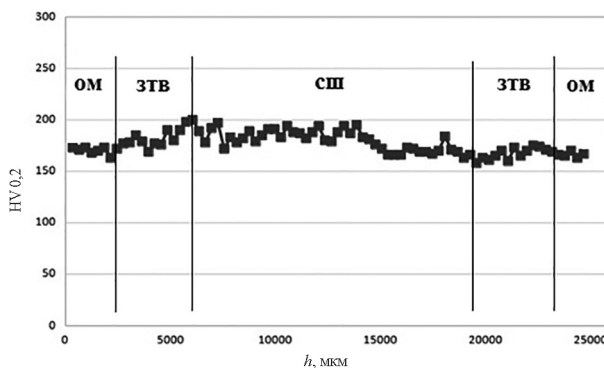


Рисунок 5 — Распределение микротвердости по зонам сварного соединения образца № 2 (температура нагрева 900 °С)
Figure 5 — Microhardness distribution over welded joint zones of sample no. 2 (heating temperature 900 °С)

сварки. Участки сварного соединения сохраняют выраженные зоны основного металла, термического влияния и зону сварного шва, характеризующиеся различными величинами микротвердости.

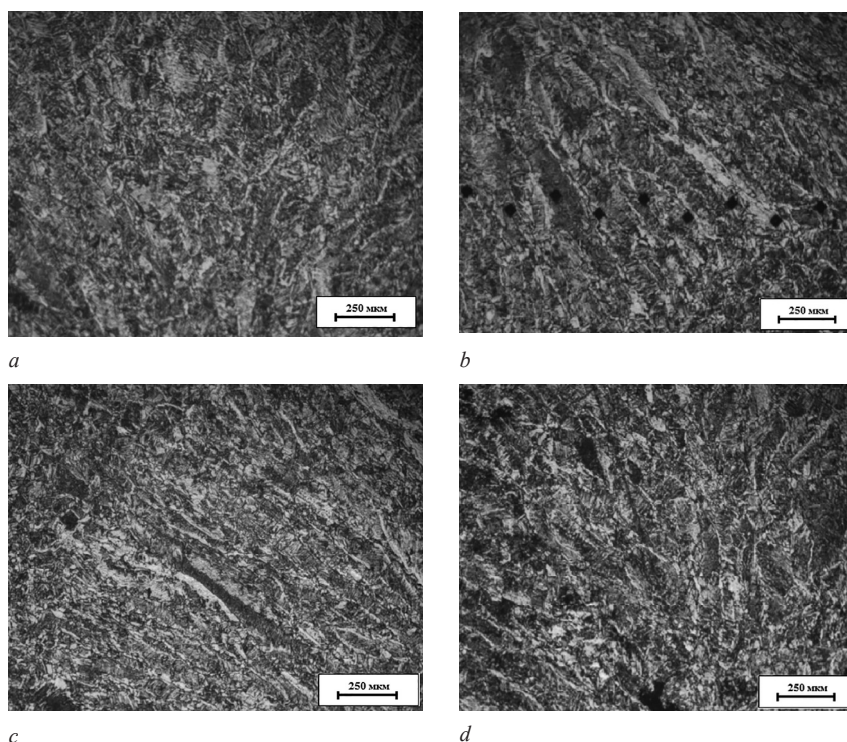


Рисунок 6 — Участки грубой микроструктуры образца № 2 сварного соединения после скоростной электротермической обработки при 900 °С
 Figure 6 — Rough microstructure areas of sample no. 2 of the welded joint after high-speed electrothermal treatment at 900 °C

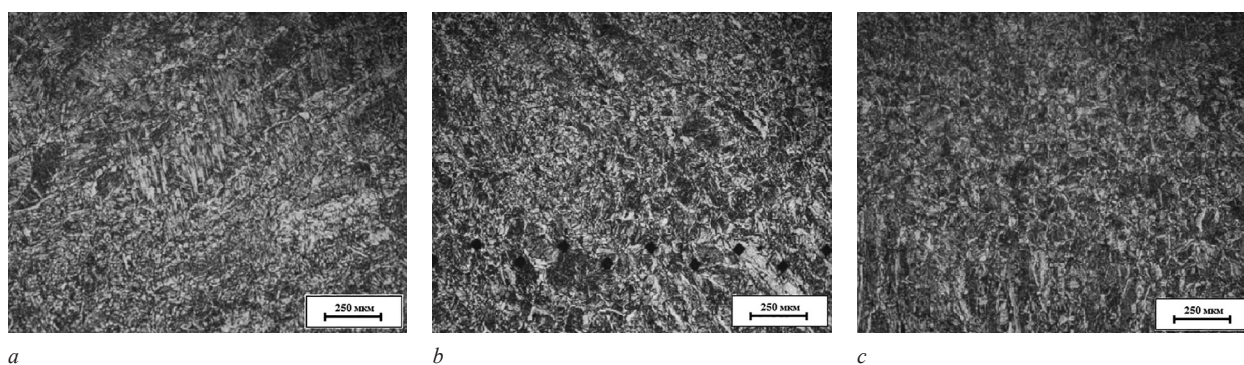


Рисунок 7 — Участки со смешанной (дендритной и зернистой) микроструктурой в зоне сварного шва после скоростной электротермической обработки при 900 °С
 Figure 7 — Mixed (dendritic and granular) microstructure areas in the weld zone after high-speed electrothermal treatment at 900 °C

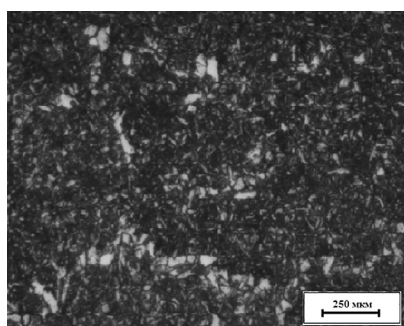


Рисунок 8 — Участки с зернистой равномерной микроструктурой в зоне сварного шва после скоростной электротермической обработки при 900 °С
 Figure 8 — Granular uniform microstructure areas in the weld zone after high-speed electrothermal treatment at 900 °C

Нагрев сварного соединения до 900 °С привел к незавершенному распаду грубой дендритной структуры. Вместе с тем процесс измельчения зе-

рен до конца не завершился, вследствие чего в металле наблюдаются как участки мелкозернистой равномерной структуры, так и участки смешанной дендритной и зернистой микроструктур. При этом следует отметить, что величина микротвердости характерных зон сварного соединения практически выравнялась и составила 170–185 HV 0,2.

Результаты исследований значений твердости по характерным зонам образцов сварного соединения в исходном состоянии и после СЭТО приведены в таблицах 1–2.

Анализ результатов исследований показывает, что сварное соединение из конструкционной низколегированной стали 10ХСНД после СЭТО при температуре 950–980 °С отличается высокой механической и структурной однородностью. Различия в величинах микротвердости в зонах основного металла, термического влияния, сварного шва

Таблица 1 — Результаты измерения микротвердости образца сварного соединения из стали 10ХСНД в исходном состоянии
Table 1 — Measurement results of sample welded joint microhardness made of 10KhSND steel in the initial state

ОМ	ЗТВ	СШ	ЗТВ	ОМ
Линия 1 HV 5				
200	222	230	232	198
199	225	214	235	190
194	228	222	225	189
Линия 2 HV 5				
180	199	228	222	196
183	209	220	230	197
187	225	221	221	196

Таблица 2 — Результаты измерения микротвердости образца сварного соединения из стали 10ХСНД после скоростной электротермической обработки (температура нагрева 950–980 °С)
Table 2 — Microhardness measurement results of sample welded joint made of 10KhSND steel after high-speed electrothermal treatment (heating temperature 950–980 °С)

ОМ	ЗТВ	СШ	ЗТВ	ОМ
Линия 1 HV 5				
161	168	158	163	159
163	164	162	163	162
161	157	156	163	164
Линия 2 HV 5				
153	154	188	185	159
153	167	190	186	162
157	180	192	175	167

практически отсутствует, а некоторое повышение микротвердости в зоне корня шва можно объяснить меньшей температурой нагрева металла в ней вследствие расположения источника нагрева с противоположной стороны. При металлографических исследованиях регистрируемых изменений в микроструктуре различных зон сварного шва не наблюдается.

Микроструктура сварного шва исходного образца — столбчатые кристаллы. Микроструктура сварного шва образца после СЭТО — феррито-перлитная мелкозернистая дифференцированная однородная, размер зерна № 8 по шкале ГОСТ 5639-82 (рисунки 9, 10).

Микроструктура основного металла (прокат конструкционной низколегированной стали) в исходном состоянии, а также после СЭТО — феррито-перлитная, размер зерна № 9 по шкале ГОСТ 5639-82 (рисунки 11, 12).

Таким образом, металл сварного шва образца сварного соединения из стали 10ХСНД после высокотемпературной скоростной электротермической обработки по использованному режиму претерпевает фазовую перекристаллизацию, в результате которой столбчатая, дендритная структура трансформируется в однородную мелкозернистую фер-

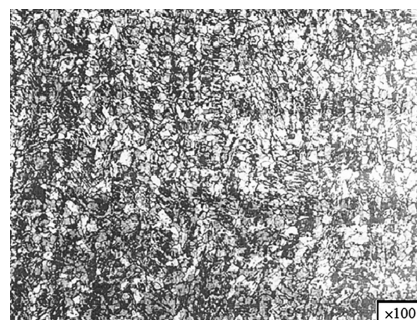


a

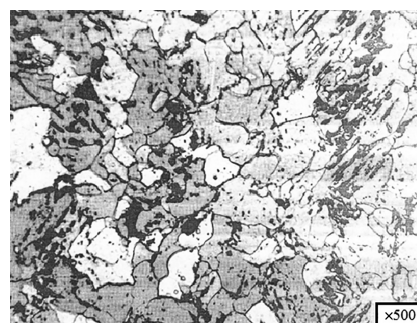


b

Рисунок 9 — Микроструктура сварного шва образца сварного соединения из стали 10ХСНД в исходном состоянии
Figure 9 — Welded seam microstructure of the sample welded joint made of 10KhSND steel in the initial state



a

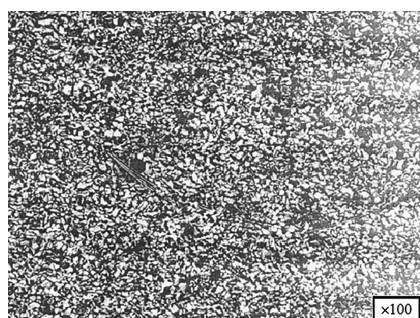


b

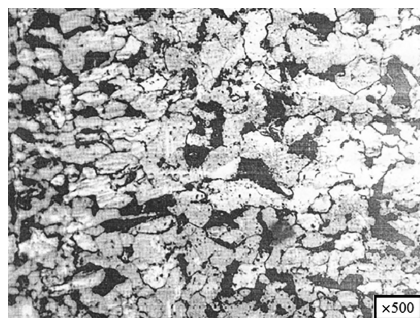
Рисунок 10 — Микроструктура сварного шва образца сварного соединения из стали 10ХСНД после скоростной электротермической обработки при температуре 950–980 °С
Figure 10 — Welded seam microstructure of the sample welded joint made of 10KhSND steel after high-speed electrothermal treatment at the temperature of 950–980 °С

рито-перлитную структуру с размером зерна № 8 по шкале ГОСТ 5639-82.

Вывод. Проведение скоростной электротермической обработки в интервале температур 950–980 °С приводит к фазовой перекристал-

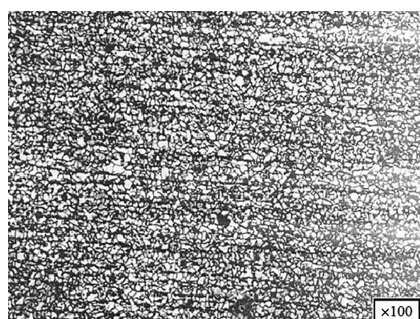


a

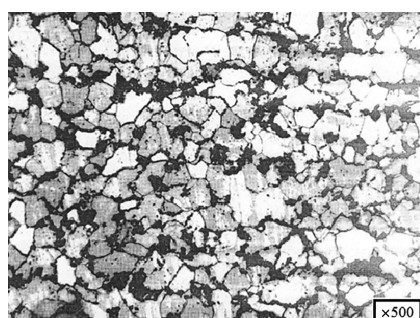


b

Рисунок 11 — Микроструктура основного металла образца сварного соединения из стали 10ХСНД в исходном состоянии
Figure 11 — Base metal microstructure of the sample welded joint made of 10KhSND steel in the initial state



a



b

Рисунок 12 — Микроструктура основного металла образца сварного соединения из стали 10ХСНД после скоростной электротермической обработки при температуре 950–980 °С
Figure 12 — Base metal microstructure of the sample welded joint made of 10KhSND after high-speed electrothermal treatment at the temperature of 950–980 °C

лизации металла сварного шва, в результате чего его столбчатая, дендритная структура трансформируется в однородную мелкозернистую феррито-перлитную структуру с размером зерна № 8 по шкале ГОСТ 5639-82. При этом само сварное

соединение отличается высокой механической и структурной однородностью. Различие в величинах микротвердости зон основного металла, термического влияния, сварного шва после СЭТО практически нивелируется, а некоторое повышение микротвердости в зоне корня шва можно объяснить меньшей температурой нагрева металла в данной области вследствие расположения источника нагрева с противоположной стороны шва.

Таким образом, применение скоростной электротермической обработки в целом приводит к достижению высокой структурной и механической однородности металла сварного соединения, что позволяет прогнозировать повышение его конструкционной равнопрочности.

Список литературы

1. Карьерные самосвалы особо большой грузоподъемности / П.Л. Мариев [и др.]. — Минск: Интегралполиграф, 2008. — 320 с.
2. Мариев, П.Л. Основы структурной равнопрочности стали и элементов крупногабаритных деталей машин / П.Л. Мариев, В.И. Моисеенко. — Минск: Ин-т техн. кибернетики НАН Беларуси, 1999. — 199 с.
3. Мариев, П.Л. Повышение конструкционной равнопрочности крупногабаритных деталей и сварных узлов карьерных самосвалов. — Минск: Ин-т техн. кибернетики НАН Беларуси, 2001. — 180 с.
4. Zunderfreies, induktives Härten und dessen Einsatz in der Kfz-Industrie / H. Altena [et al.] // HTM Journal of Heat Treatment and Materials. — 1999. — Vol. 54, iss. 4. — Pp. 216–223. — DOI: <https://doi.org/10.1515/htm-1999-540405>.
5. Hanisch, G. Neue Anwendungen beim induktiven Randschicht härten in der Automobilindustrie / G. Hanish // HTM Journal of Heat Treatment and Materials. — 1998. — Vol. 53, iss. 6. — Pp. 381–387. — DOI: <https://doi.org/10.1515/htm-1998-530609>.
6. Krauss, G. Volumetric and induction hardening / G. Krauss // Proc. 11th Congr. Fed. Heat Treat. and Surface Eng. and 4th ASM Heat Treat. and Surface Eng. Conf. Eur. — Milano, 1998. — Vol. 1. — Pp. 21–32.
7. Мальцев, И.М. Скоростная электротермическая обработка током высокой плотности доэвтектидных конструкционных сталей / И.М. Мальцев // Вопросы материаловедения. — 2004. — № 4(40). — С. 24–31.
8. Мальцев, И.М. Изменение стабильности и свойств алюминиевых сплавов после скоростной электротермической обработки током высокой плотности / И.М. Мальцев // Материаловедение. — 2004. — № 9. — С. 34–36.
9. Мальцев, И.М. Скоростная обработка стали 30ХГСА током высокой плотности / И.М. Мальцев // Материаловедение и термическая обработка металлов. — 2009. — № 6(648). — С. 42–45.
10. Мальцев, И.М. Investigation of fast electrothermal treatment of metals by high-density current / И.М. Мальцев // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. — 2005. — Т. 71, № 11. — С. 35–38.
11. Исследование влияния скоростной физикотехнической обработки током высокой плотности на структуру и свойства инструментальной стали 8Х6НФТ / Б.В. Устинов [и др.] // Тр. НГТУ им. Р.Е. Алексеева. — 2014. — № 5(107). — С. 317–326.
12. Гриднев, В.Н. Применение скоростной термической обработки для повышения конструктивной прочности сталей / В.Н. Гриднев, С.П. Ошкадеров // Материаловедение и термическая обработка металлов. — 1987. — № 11. — С. 19–23.
13. Обработка изделий машиностроения с применением индукционного нагрева // А.И. Гордиенко [и др.]. — Минск: Беларус. навука, 2009. — 287 с.
14. Гуринович, В.А. Индукционный нагрев – способ повышения свойств стального трубного проката / В.А. Гуринович, П.С. Гурченко, А.И. Михлюк // Автомобильная промышленность. — 2006. — № 6. — С. 25–26.

15. Михлюк, А.И. Улучшение структуры и механических характеристик несущих конструкций мобильных машин путем индукционной термообработки / А.И. Михлюк, И.И. Вегера, О.А. Вегера // *Литье и металлургия*. — 2012. — № 1. — С. 104–109.
16. Вегера, И.И. Исследование процессов фазовой перекристаллизации среднеуглеродистых сталей при отжиге длинномерного круглого проката / И.И. Вегера, А.И. Михлюк // *Весті НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук*. — 2012. — № 2. — С. 24–29.
17. Ивашко, В.В. Исследование процессов разупрочнения холоднодеформированной коррозионностойкой листовой стали AISI 304, применяемой для изготовления сосудов, работающих под давлением / В.В. Ивашко, И.И. Вегера // *Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. мат. V междунар. науч.-техн. конф.*, Минск, 15–17 сент. 2010 г.: в 3 кн. / ФТИ НАН Беларуси; редкол.: С.А. Астапчик (гл. ред.) [и др.]. — Минск, 2010. — Кн. 1. Конструкционные и функциональные материалы в современной технике, методы их получения. Материалы для микро- и нанозлектроники. — С. 37–44.
18. Гордиенко, А.И. Исследование процессов разупрочнения холоднодеформированной листовой стали 09Г2С, применяемой для изготовления сосудов, работающих под давлением / А.И. Гордиенко, В.В. Ивашко, И.И. Вегера // *Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. материалов IV междунар. науч.-техн. конф.*, Минск, 19–21 окт. 2009 г.: в 3 кн. / ФТИ НАН Беларуси; редкол.: С.А. Астапчик (гл. ред.) [и др.]. — Минск, 2009. — Кн. 2. Высокоэнергетические технологии получения и обработки материалов. Технологии и оборудование для упрочнения и восстановления свойств поверхности материалов. — С. 70–75.

KUDELKO Igor U.

Researcher of the Laboratory of Reliability Problems and Metal Intensity of High and Extra-High Capacity Dump Trucks of the R&D Center “Mining Machinery”¹
E-mail: samosvaloim@mail.ru

SIDORENKO Aleksandr G., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.

Head of the Laboratory of Reliability Problems and Metal Intensity of High and Extra-High Capacity Dump Trucks of the R&D Center “Mining Machinery”¹
E-mail: samosvaloim@mail.ru

WEGERA Ivan I., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.

Head of the Department of Induction Technology and Heat Treatment²
E-mail: smto@tut.by

ZIZIKO Alexander V.

Head of the Simulation and R&D Works Sector²
E-mail: a.ziziko@phti.by

¹Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

²Physical-Technical Institute of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Received 18 March 2024.

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF HIGH-SPEED ELECTROTHERMAL TREATMENT ON THE STRUCTURE OF A WELDED JOINT MADE OF LOW-ALLOY STRUCTURAL STEEL

The studies' results of the high-speed electrothermal treatment effect on the structure and hardness of various zones of welded joints made of low-alloy structural steel 10XCHД (10KhSND) are presented. It is shown that carrying out high-speed electrothermal treatment at 950–980 °C leads to the formation of a homogeneous, fine-grained ferrite-perlite microstructure with practically unchanged hardness values in all zones of the welded joint except for the weld root, where slightly higher values of microhardness are registered.

Keywords: welded joint, low-alloy structural steel, high-speed electrothermal treatment, structure

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2024-2-67-61-68>

References

1. Mariev P.L., et al. *Karernye samosvaly osobo bolshoy gruzopodemnosti* [Extra-high capacity dump trucks]. Minsk, Integralpoligraf Publ., 2008. 320 p. (in Russ.).
2. Mariev P.L., Moiseenko V.I. *Osnovy strukturnoy ravnoprochnosti stali i elementov krupnogabaritnykh detaley mashin* [Fundamentals of the structural equal strength of steel and elements

- of the large-size machine parts]. Minsk, Institut tekhnicheskoy kibernetiki NAN Belarusi Publ., 1999. 199 p. (in Russ.).
3. Mariev P.L. *Povyshenie konstruksionnoy ravnoпрочности krupnogabaritnykh detaley i svarynykh uzlov karernykh samovalov* [Increase of the structural equal strength of the large-size parts and welded joints of the dump trucks]. Minsk, Institut tekhnicheskoy kibernetiki NAN Belarusi Publ., 2001. 180 p. (in Russ.).
 4. Altena H., Schrank F., Oberweger G., Krauss D. Zunderfreies, induktives Härten und dessen Einsatz in der Kfz-Industrie. *HTM Journal of heat treatment and materials*, 1999, vol. 54, iss. 4, pp. 216–223. DOI: <https://doi.org/10.1515/htm-1999-540405>.
 5. Hanisch G. Neue Anwendungen beim induktiven Randschichtthärten in der Automobilindustrie. *HTM Journal of heat treatment and materials*, 1998, vol. 53, iss. 6, pp. 381–387. DOI: <https://doi.org/10.1515/htm-1998-530609>.
 6. Krauss G. Volumetric and induction hardening. *Proc. 11th Congress of the International Federation for Heat Treatment and Surface Engineering and 4th ASM heat treatment and surface engineering conference in Europe*. Florence, 1998, vol. 1, pp. 21–32.
 7. Maltsev I.M. Skorostnaya elektrotermicheskaya obrabotka tokom vysokoy plotnosti doevtektoidnykh konstruksionnykh staley [High-speed electrothermal treatment with high-density current of pre-eutectoid structural steels]. *Voprosy materialovedeniya*, 2004, no. 4(40), pp. 24–31 (in Russ.).
 8. Maltsev I.M. Izmenenie stabilnosti svoystv alyuminievykh splavov posle skorostnoy elektrotermicheskoy obrabotki tokom vysokoy plotnosti [Change of property stability of aluminum alloys after high-speed electrothermal treatment by high-density current]. *Materialovedenie*, 2004, no. 9, pp. 34–36 (in Russ.).
 9. Maltsev I.M. Skorostnaya obrabotka stali 30KhGSA tokom vysokoy plotnosti [High-speed treatment of steel 30KhGSA by high-density current]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2009, no. 6(648), pp. 42–45 (in Russ.).
 10. Maltsev I.M. Investigation of fast electrothermal treatment of metals by high-density current. Industrial laboratory. *Diagnostics of materials*, 2005, vol. 71, no. 11, pp. 35–38.
 11. Ustinov B.V., Grishin E.N., Aushev A.A., Maltsev I.M. Issledovanie vliyaniya skorostnoy fizikotekhnicheskoy obrabotki tokom vysokoy plotnosti na strukturu i svoystva instrumentalnoy stali 8Kh6NFT [Research of influence physical-treatment of speed electrothermal processing by current of high density on the structure and properties of 8Kh6NFT tools steel]. *Transactions of Nizhni Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alexeev*, 2014, no. 5(107), pp. 317–326 (in Russ.).
 12. Gridnev V.N., Oshkaderov S.P. Primenenie skorostnoy termicheskoy obrabotki dlya povysheniya konstruktivnoy prochnosti staley [Application of high-speed heat treatment to increase the structural strength of steels]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 1987, no. 11, pp. 19–23 (in Russ.).
 13. Gordienko A.I., Gurchenko P.S., Mikhlyuk A.I., Vegera I.I. *Obrabotka izdeliy mashinostroeniya s primeneniem induktsionnogo nagreva* [Processing of machine-building products using induction heating]. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2009. 287 p. (in Russ.).
 14. Gurinovich V.A., Gurchenko P.S., Mikhlyuk A.I. Induktsionnyy nagrev – sposob povysheniya svoystv stalnogo trubnogo prokata [Induction heating — a way to increase properties of steel tubular rolled products]. *Avtomobilnaya promyshlennost*, 2006, no. 6, pp. 25–26 (in Russ.).
 15. Mikhlyuk A.I., Vegera I.I., Vegera O.A. Uluchshenie struktury i mekhanicheskikh kharakteristik nesushchikh konstruksiy mobilnykh mashin putem induktsionnoy termoobrabotki [Improvement of structure and mechanical characteristics of bearing structures of mobile machines by means of induction heat treatment]. *Foundry production and metallurgy*, 2012, no. 1, pp. 104–109 (in Russ.).
 16. Vegera I.I., Mikhlyuk A.I. Issledovanie protsessov fazovoy perekristallizatsii sredneuglerodistykh staley pri ozhige dlinnomernogo kruglogo prokata [Investigation on the processes of phase recrystallization of middle-carbon alloys at annealing of longitudinal round rolled metal]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2012, no. 2, pp. 24–29 (in Russ.).
 17. Ivashko V.V., Vegera I.I. Issledovanie protsessov razuprochneniya kholodnodeformirovannoy korozionnostoykoy listovoy stali AISI 304, primenyaemoy dlya izgotovleniya sudov, rabotayushchikh pod davleniem [Investigation of the processes of de-hardening of cold-formed corrosion-resistant sheet steel AISI 304, used for the manufacture of pressure vessels]. *Sovremennye metody i tekhnologii sozdaniya i obrabotki materialov. Kniga 1. Konstruksionnye i funktsionalnye materialy v sovremennoy tekhnike, metody ikh polucheniya. Materialy dlya mikro- i nanoelektroniki* [Modern methods and technologies for materials creation and processing. Book 1. Structural and functional materials in modern technology, methods of their production. Materials for micro- and nanoelectronics], 2010, pp. 37–44 (in Russ.).
 18. Gordienko A.I., Ivashko V.V., Vegera I.I. Issledovanie protsessov razuprochneniya kholodnodeformirovannoy listovoy stali 09G2S, primenyaemoy dlya izgotovleniya sudov, rabotayushchikh pod davleniem [Investigation of the softening processes of cold-formed 09G2S sheet steel used for the manufacture of pressure vessels]. *Sovremennye metody i tekhnologii sozdaniya i obrabotki materialov. Kniga 2. Vysokoenergeticheskie tekhnologii polucheniya i obrabotki materialov. Tekhnologii i oborudovanie dlya uprochneniya i vosstanovleniya svoystv poverkhnosti materialov* [Modern methods and technologies for materials creation and processing. Book 2. High-energy technologies for obtaining and processing materials. Technologies and equipment for hardening and restoration of materials surface properties], 2009, pp. 70–75 (in Russ.).