УДК 621.791.762.5 DOI: http://dx.doi.org/10.15407/as2019.03.04

СВАРИВАЕМОСТЬ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВА ПРИ КОНТАКТНОЙ СТЫКОВОЙ СВАРКЕ

А.А. Полишко, Л.Б. Медовар, А.П. Стовпченко, Е.В. Антипин, А.В. Дидковский, А.Ю. Туник
ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Представлены результаты исследований структуры и свойств образцов лабораторной выплавки рельсового металла (в слабодеформированном и литом состоянии), полученного электрошлаковым переплавом после контактной стыковой сварки оплавлением. Исследования показали, что микроструктура металла шва и зоны термического влияния в обоих случаях отличается однородным плотным строением. Разрушение образцов происходило преимущественно в зоне термического влияния. Прочность сварных соединений из металла в литом состоянии ниже, чем слабодеформированного, что, по-видимому, обусловлено крупным зерном, размер которого может быть измельчен применением термической обработки. Рельсовая сталь электрошлакового переплава в литом и слабодеформированном состоянии имеет уровень механических свойств в диапазоне требований, предъявляемых к нетермоупрочненным рельсам К76 по ГОСТ Р 51045 и ДСТУ 4344, что открывает перспективы применения электрошлакового переплава для изготовления рельсов, в том числе и остряковых рельсов, применяемых в литом состоянии. Библиогр. 25, табл. 3, рис. 7.

Ключевые слова: контактная стыковая сварка, рельсовая сталь, электрошлаковый переплав, слабодеформированный и литой металл, сварной стык, металлографические исследования, механические свойства

Тенденцией развития железных дорог сегодня является повышение скорости движения, организация которого для пассажирских поездов потребовала изменений в техническом оснащении путей и технологиях производства и соединения рельсов [1]. На железных дорогах Украины для особо нагруженных участков железнодорожного пути в последнее время производится укладка высокопрочных рельсов нового поколения К76Ф (ДСТУ 4344:2004), 76Ф (ГОСТ Р 51045-97) и, не так давно, R350HT (EN 13674-1:2011+A1:2017) [2]. Все эти рельсы произведены в конвертерах с последующей внепечной обработкой и, далее, непрерывной разливкой и прокаткой стали. В силу отсутствия современного балко-рельсового стана на ПАО «МК «Азовсталь» (г. Мариуполь, «Метинвест») отечественные рельсы не во всем удовлетворяют современным требованиям (малая длина и невысокая стойкость, которая практически в два раза ниже, чем зарубежных образцов) [3, 4]. Импортные рельсы в среднем выстаивают в пути до замены прохождения по ним примерно 800...1000 млн брутто тонн грузов против 450...500 млн брутто тонн у отечественных [5].

Для уменьшения повреждений рельсов при их взаимодействии с колесами подвижного состава необходимо обеспечить высокую твердость, износостойкость, контактно-усталостную прочность металла головки, и, одновременно, пластичность, вязкость, стойкость к знакопеременным нагрузкам шейки и подошвы рельса [6].

С этой целью рельсовые стали проходят внепечную и вакуумную обработку, однако, несмотря на глубокую очистку стали, неметаллические включения (НВ) неблагоприятной морфологии часто являются причиной разрушения рельсов [7–9]. Так, исследованиями ВНИИЖТ [10, 11] установлено, что на вязкость разрушения, в первую очередь, влияют форма и размер включений, характер их и распределение в стали.

Исследователями ПАО «МК «Азовсталь» показано, что наиболее опасными являются остроугольные включения нитридов титана и подобные, а также крупные включения оксида алюминия и их скопления, которые являются продуктами раскисления и микролегирования рельсовой стали, что привело к смене технологии производства рельсов [12, 13].

Эффективным способом удаления НВ и изменения их морфологии на благоприятную является процесс электрошлакового переплава [14, 15]. На сегодня выполнен широкий комплекс исследований НВ в металле ЭШП, который показал, что при переплаве под фторидно-оксидными шлаками количество НВ в металле слитка значительно ниже, чем в исходном электроде за счет рафинирования металла от серы и ассимиляции их шлаком [16–18].

Известно, что современные рельсы изготавливают из непрерывно литых заготовок последующей прокаткой. Скорость разливки на МНЛЗ зависит от сечения заготовки и может достигать

© А.А. Полишко, Л.Б. Медовар, А.П. Стовпченко, Е.В. Антипин, А.В. Дидковский, А.Ю. Туник, 2019

Таблица 1. Сравнение методов сварки рельсов [23]

Способ сварки	Время сварки, мин	Оборудование		Навыки оператора	Качество сварного шва
		Начальные капиталовложения	Мобильность		
КСС	2…4	Большие	Низкая	Не требуются	Превосходное
Газопрессовая	5…7	Большие	Средняя	Требуются	Превосходное
Термитная	30	Небольшие	Высокая	Не требуются	Хорошее
Электродуговая	60	Небольшие	Высокая	Требуются	Хорошее

нескольких метров в минуту. Большая скорость разливки непрерывно литой заготовки приводит к образованию глубокой жидкой лунки, где подпитка усадки ограничена. Это приводит к возникновению дефектов сегрегации и пористости. Однако значительно уменьшить скорость разливки невозможно, так как мениск остывает и качество поверхности заготовки при этом ухудшается. Напротив, при электрошлаковом переплаве (ЭШП) можно получить очень плотную структуру металла, но производительность процесса ЭШП намного меньше и стоимость процесса при этом значительно выше, чем непрерывной разливки. Основываясь на мировом опыте использования ЭШП можно ожидать, что увеличение стоимости рельсов при их изготовлении методом ЭШП с расходуемыми электродами не будет превышать $ 100...300 за тонну.

Работы по получению качественного рельсового металла методом ЭШП были начаты в Институте электросварки им. Е.О. Патона НАНУ совместно с ПАО «МК «Азовсталь» еще в 1980-х годах. Опытная партия рельсов из стали ЭШП прошла полномасштабные натурные испытания на экспериментальном кольце ВНИИЖТ радиусом 400 м по кривой, размещенном на шпалах из дерева, которые показали, что долговечность рельсов из стали, выполненных ЭШП, в 3,4…4,7 раза выше, чем сравнительных [19]. Однако в то время увеличение стоимости рельсов в 2 раза стало основным препятствием для использования ЭШП. Чтобы оценить преимущества металла, полученного ЭШП для различных ответственных назначений, нами проведены экспериментальные плавки [20, 21] и комплекс исследований качества металла темплетов в литом состоянии, после небольшой деформации и в сварных стыках.

Целью работы является оценка на основе комплекса исследований структуры и свойств образцов лабораторной выплавки возможности применения рельсового металла (в слабодеформированном и литом состоянии), полученного методом ЭШП, для рельсового пути, соединяемого контактной стыковой сваркой оплавлением.

Сварка рельсов. **Виды процессов**. Соединение рельсов в плети и затем в путь производят сваркой, чтобы уменьшить число стыков и достичь максимальной плавности хода. Более того, удар колеса при переходе через стык рельсов вызывает опережающий износ их концов. Авторы работы [22] показали, что на дорогах с преимущественно пассажирским движением поездов (SNCF, HSPC, NS, DB, EJR) число дефектов в сварных соединениях составляет от 5 до 30 % общего их количества, а на дорогах для грузовых перевозок (SPOORNET, HH1, HH2) и смешанных (BRANVERKET) большее количество дефектов наблюдается как раз в сварных соединениях (от 15 до 60 %). Поэтому необходимо уделять особое внимание качеству сварного шва.

Для соединения рельсов высокоскоростных и высоконагруженных магистралей в мире применяют четыре основные технологии сварки, которые обеспечивают безопасность и надежность рельсовых сварных соединений. Это контактная стыковая (КСС), газопрессовая, термитная и электродуговая сварка [23] (табл. 1).

Каждый из рассматриваемых способов сварки рельсов отличается собственными «плюсами» и «минусами». В Украине для сварки рельсовых сталей применяют в основном КСС, которая широко распространена и за рубежом, поскольку обеспечивает современные жесточайшие требования к бесстыковым железнодорожным путям.

Методика изготовления образцов электрошлакового металла, их контактная стыковая сварка и металлографические исследования. Металл для экспериментальной программы выплавляли традиционным электрошлаковым процессом в лабораторных условиях на печи вместимостью 3 т с вытяжкой слитка при скоростях вытяжки 20 и 40 мм/мин. В качестве расходуемого электрода использовали рельс К76Ф (содержание углерода до 0,82 %) промышленной выплавки (ДСТУ 4344:2004). Использовали шлак АНФ-28М состава, мас. %: 47 CaF_2; 3 Al_2O_3; 21 CaO; 11 MgO; 18 SiO_2. Получили слитки ЭШП диаметром 180 мм, из которых вырезали темплеты для сварки в литом виде. Часть металла слитков ЭШП из рельсовой стали прокатали на полосу с нагревом заготовок до температуры 1050 °С. Степень деформации была 4:1, поскольку возмож-

ности лабораторного стана, на котором вели прокатку, ограничены.

Для сравнительной оценки качества сварных соединений рельсовой стали электрошлаковой выплавки на образцах (пластинах) площадью поперечного сечения 1020 мм^2 из литого и слабодеформированного металла КСС проводили по технологии непрерывного оплавления. Режим сварки выбирали в соответствии с параметрами, регламентирующимися в ТУ У 24.1-40075815-002:2016 для рельсов Р65 [24, 25]. В качестве основного параметра, определяющего энерговложение, приняли длительность оплавления, которая для рельсов Р65 составляет 180 с.

Металлографические исследования проводили на микроскопе «Neophot-32», оснащенном приставкой для цифрового фотографирования «QuickPhoto». Полученные изображения обрабатывали программой «Atlas» при увеличениях 25 ... 500 раз в светлом поле. Для выявления микроструктуры шлифы травили в растворе 5 %-ой азотной кислоты.

Механические испытания литого и деформированного металла ЭШП рельсовой стали, а также их сварных соединений, проводили по стандартной методике в соответствии с требованиями ГОСТ 1497-84 и ГОСТ 6996-66 на статическое (кратковременное) растяжение на образцах типа Ми3 и Ми18 на машине MTS 318.25 (США) с обработкой в программном обеспечении TestWorks4 (MTS), обеспечивающем удовлетворительную точность результатов (± 0,5 %).

Исследования структуры и свойств литого и деформированного металла из слитка ЭШП. Металл слитков рельсовой стали электрошлакового переплава имеет однородную плотную структуру. Каких-либо дефектов обнаружено не было. Размер перлитных зерен в слитке ЭШП со скоростью вытягивания 20 мм/мин составляет 100…120 мкм, субзерен 20…30 мкм, в то время как размер перлитных зерен в слитке, полученном при скорости вытяжки 40 мм/мин, достигает 80…100 мкм, субзерен 10…15 мкм. Таким образом, даже небольшое снижение скорости подачи металла при постепенном формировании слитка оказывает положительное влияние на его структуру. Повышается и плотность за счет улучшения подпитки усадки, что способствует избежанию центральной неоднородности слитка.

Металл обоих слитков ЭШП имеет типичную перлитную равномерную микроструктуру с тонкими ламелями цементита (рис. 1). Измерения межпластинчатого расстояния в перлите показали близкие результаты для металла обоих слитков (0,74 и 0,56 мкм для слитков со скоростью вытяжки 20 и 40 мм/мин соответственно). Дисперсность перлита в металле слитков после ЭШП меньше, нежели обычно наблюдаемая в образцах рельсовой стали после деформации и термической обработки (около 0,2 мкм), однако, следует учитывать,

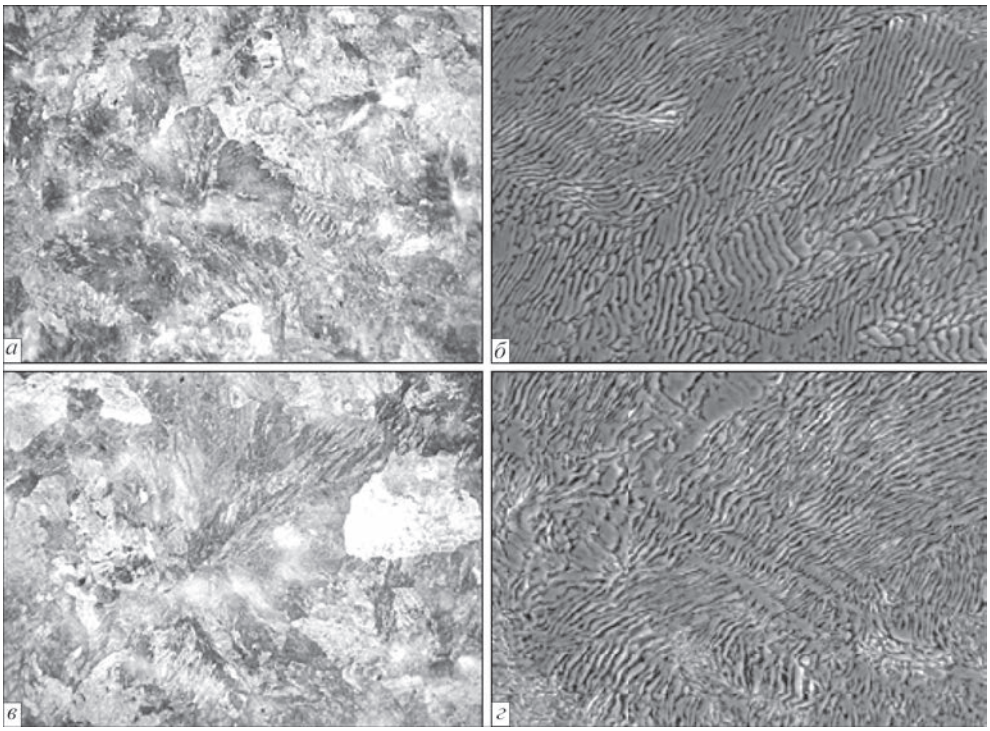


Рис. 1. Микроструктура (×100) оптическая (*а*, *в*) и СЭМ (*б*, *г*) образцов металла модельных слитков ЭШП, сформированных с разной скоростью вытяжки: *а*, *б* — 20 мм/мин; *в*, *г* — 40 мм/мин

Таблица 2. Химический состав рельсовой стали К76Ф до и после ЭШП

Марка	Стандарт	Содержание элементов, мас. %						
		C	Mn	Si	V	Al	P	S
К76Ф	ДСТУ 4344:2004	0,71…0,82	0,8…1,3	0,25…0,45	0,03…0,07	0,025	0,035	0,04
К76Ф	После ЭШП	0,76	0,93	0,11	0,05	0,020	0,035	0,020

что это литой металл без деформации и термической обработки.

Результаты спектрального химического анализа металла до и после электрошлакового переплава приведены в табл. 2 Анализ содержания элементов свидетельствует о соответствии марочному составу стали К76Ф согласно ДСТУ 4344:2004. Наблюдается снижение содержания кремния и серы.

Сварку темплетов из литой и слабодеформированной (далее — деформированной) рельсовой стали электрошлакового переплава выполнили на стационарной машине К1000 разработки ИЭС при одинаковых режимах. Сваренные стыки пластин длиной 350…400 мм после удаления грата разрезали на образцы для всесторонних металлографических исследований и механических испытаний с целью оценки качества полученных соединений.

Темплеты литого металла под сварку составляли таким образом, чтобы сварные соединения, выполненные КСС, формировались в продольном сечении модельных слитков ЭШП по двум вариантам направления роста кристаллов: по росту (сварной стык соединяет центральные части продольных темплетов) и с переворотом на 180° таким образом, чтобы стык соединял худшие зоны слитка ЭШП — головную и донные части. Сварку деформированного металла проводили вдоль направления прокатки. Общий вид сварного соединения представлен на рис. 2. На поверхности сварных стыков образовался грат шириной 13…15 мм, высотой 12…13 мм. Ширина зоны термического влияния сварного соединения достигает по 30 мм в каждую сторону.

Структура металла всех стыков из рельсовой стали, полученной ЭШП, ферритно-перлитная, с харак-

Рис. 2. Сварные стыки темплетов деформированного металла ЭШП

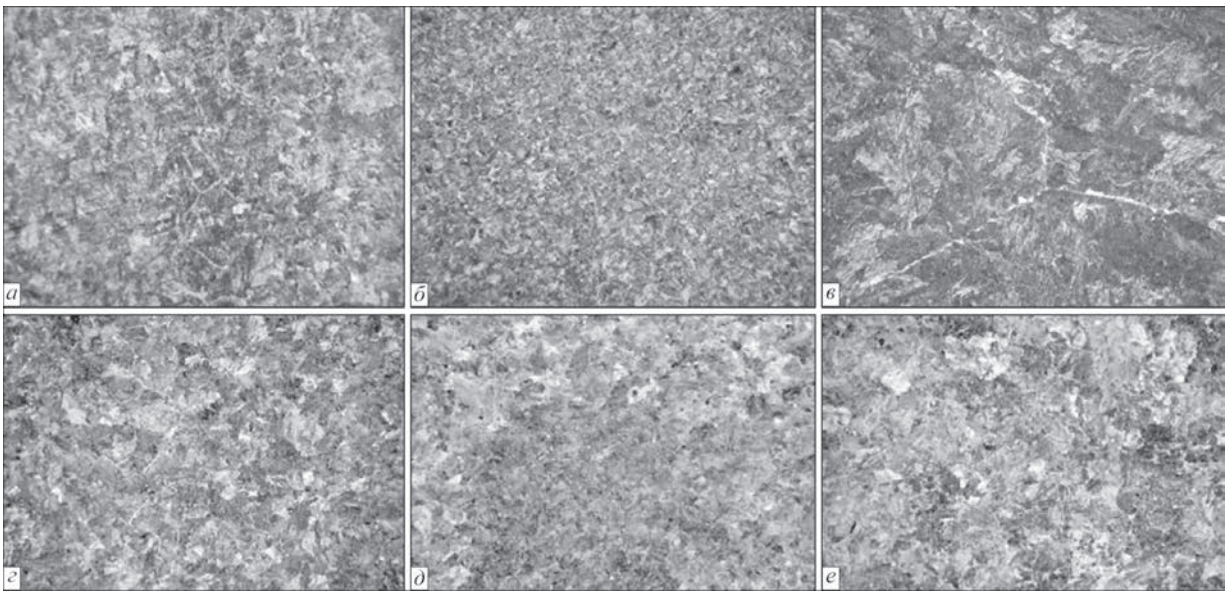


Рис. 3. Микроструктура (×100) сварного соединения литого (*а–в*) и деформированного (*г–е*) металла рельсовой стали ЭШП: *а*, *г* — шов; *б*, *д* — ЗТВ; *в*, *е* — ОМ

Таблица 3. Механические свойства литого и деформированного металла рельсовой стали ЭШП до сварки и сварных соединений, выполненных КСС

Состояние металла		$\sigma_в$, МПа	δ, %
До сварки	Литой	871…887	2…3
	Деформированный	954…959	4…5
После КСС	Литой	647…795	2…3
	Деформированный	989…995	4…5
ГОСТ Р 51045 – 97		780 (для нетермоупрочненных)	3

терными для сварных соединений зонами (рис. 3). Микроструктура сварных швов из литого и деформированного металла однородна и состоит из равноосных зерен примерно одинакового размера.

В металле швов наблюдается выделение цементита по границам зерен (рис. 3, *а*, *г*), которые более выражены для швов из литого металла. Это закономерно, поскольку характерная картина наблюдается и в структуре металла ЭШП — основной металл сварного соединения (рис. 3, *в*). В зоне термического влияния (ЗТВ) структура и литого, и деформированного металла практически идентична за счет рекристаллизации под воздействием температурного цикла сварки. В области ЗТВ, вследствие измельчения зерна, цементитные оторочки располагаются не по их контуру, а фрагментарно.

Во всех зонах сварного соединения оценили размер зерна литого металла ЭШП (при помощи компьютерной программы «Tescan»). Установлено, что в стыках из литых темплетов средний размер зерен составляет в основном металле 87 мкм, в ЗТВ 60 мкм, в шве 85 мкм, а в стыках из деформированного металла 54, 61 и 87 мкм, соответственно.

Результаты механических испытаний литого и деформированного металла ЭШП до сварки и сварных соединений, выполненных КСС, представлены в табл. 3.

Значение предела прочности для литого металла ЭШП в состоянии без термической обработки на 10 % ниже, как и его пластические свойства, что обусловлено напряженным состоянием металла в литом состоянии, которое может быть релаксировано термообработкой. В то же время в обоих случаях значения находятся в диапазоне требований, которые предъявляются нетермоупрочненным рельсам К76 в соответствии с ГОСТ Р 51045-97.

Оценка механических свойств сварных соединений металла рельсовой стали ЭШП, выполненных КСС, показала, что анизотропности металла слитка (голова–дно) не наблюдается (см. табл. 3). Разрушение образцов происходило в ЗТВ, но на некоторых образцах — по основному металлу, что связано, по нашему мнению, с наследственно крупным размером зерна в литом металле ЭШП. Уровень прочности стыков литого металла ЭШП в среднем на 27 % ниже, чем деформированного, ниже и пластичность. В то же время значительное измельчение структуры, наблюдаемое в металле ЗТВ, подтверждает необходимость применения

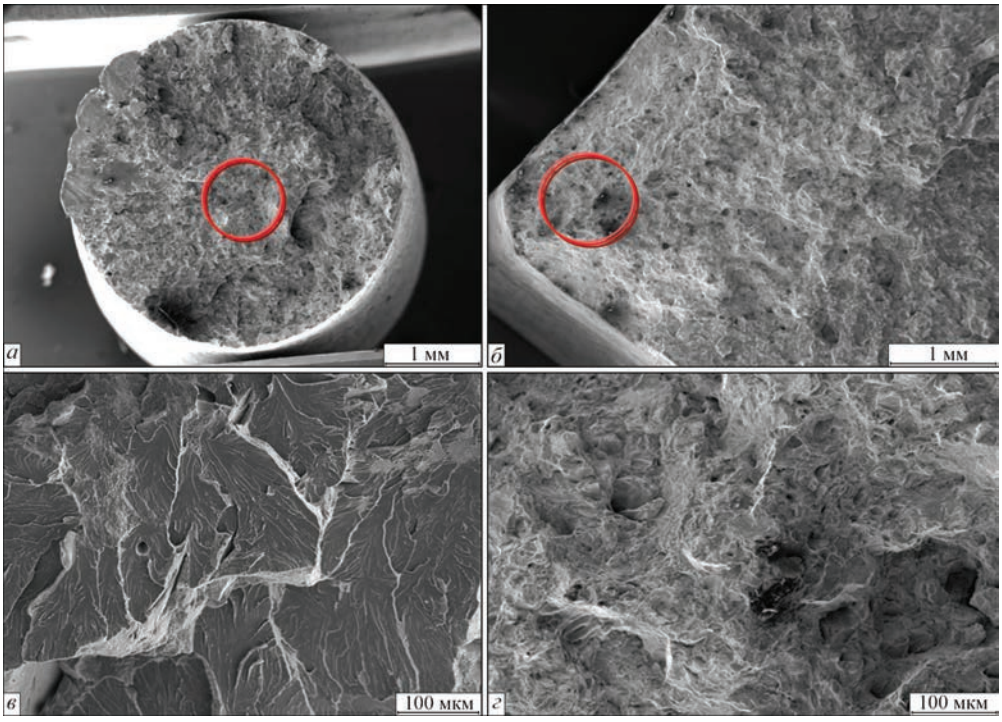


Рис. 4. Макро- (*а*, *б*) и микрофрактограммы (*в*, *г*) поверхностей изломов сварных соединений после механических испытаний литого (*а*, *в*) и деформированного (*б*, *г*) металла ЭШП

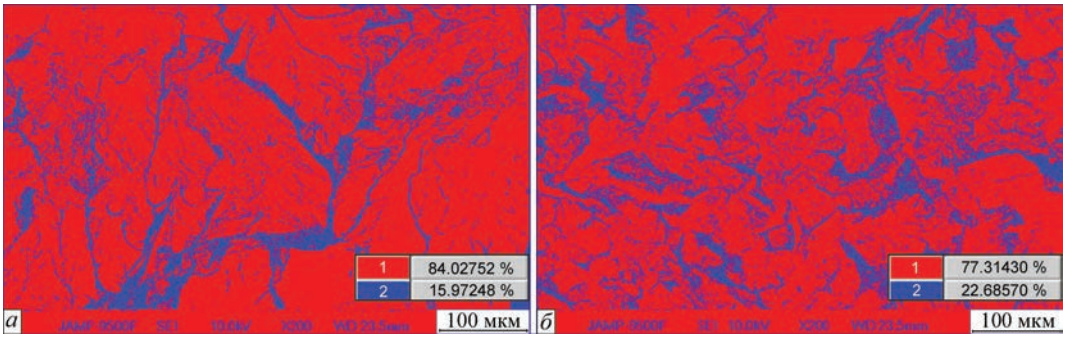


Рис. 5. Вязкая составляющая поверхности излома сварного соединения литого (*а*) и деформированного (*б*) металла рельсовой стали ЭШП: 1 — хрупкая составляющая; 2 — вязкая

термообработки для улучшения свойств литого металла ЭШП.

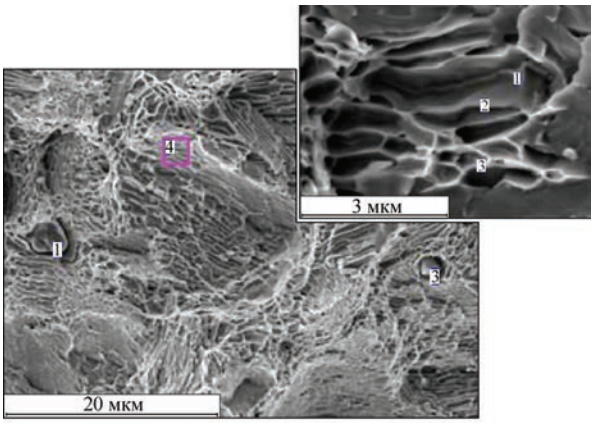
Разрушение стыков из темплетов КСС металла ЭШП после деформации происходило в металле ЗТВ на расстоянии 45…55 мм от линии сплавления (см. рис. 2). Прочность и показатель пластичности сварного соединения несколько выше, чем для исходного деформированного металла, выполненного ЭШП (табл. 3), что может быть обусловлено разным размером образцов и точностью измерений.

Фрактографический анализ поверхностей изломов показал смешанный характер разрушения по механизмам скола и смещения для всех исследованных вариантов. Разрушение начиналось по механизму растрескивания, а заканчивалось быстрым доломом, о чем свидетельствует наличие в участке долома вязкой составляющей (рис. 4, *а*, *б*). Основная часть поверхности излома представлена хрупкой составляющей, что характерно для высокопрочных рельсовых сталей, причем размеры сколов в образце из литой стали крупнее, что отвечает большему размеру зерен.

С помощью компьютерной программы ImagePro оценили долю вязкой составляющей на поверхностях изломов сварных соединений литого и деформированного металла (рис. 5). Содержание вязкой составляющей в литом металле, выполненном ЭШП, достигает 18 %, в сварном соединении литого металла 16 %, а в деформированном металле 24 и 23 %, соответственно. Большее содержание вязкой составляющей в деформированном металле обусловлено измельчением зерна.

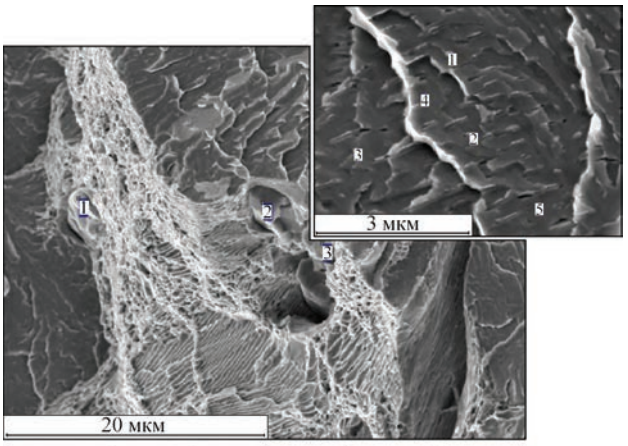
Вязкая составляющая отличается при осмотре поверхности по более темному серому цвету и матовой поверхности, но по своему химическому составу не отличается от хрупкой составляющей (рис. 6, 7).

На поверхности вязкой составляющей обнаружили включения сульфида марганца и оксида



Спектр	C	O	Al	S	Mn
1	2,23	0,63	0,03	34,37	58,75
2	2,17	0,35	0,06	27,20	55,13
3	1,88	42,73	27,99	0,58	0,84
4	2,05	0,83	0	0	1,34

Рис. 6. Микрофрактограмма вязкой составляющей поверхности излома металла рельсовой стали ЭШП



Спектр	C	O	Al	S	Mn
1	2,06	0,17	0	24,39	51,01
2	2,20	0,96	0	35,69	55,90
3	0,21	3,58	3,07	14,24	70,85

Рис. 7. Микрофрактограмма хрупкой составляющей поверхности излома металла рельсовой стали ЭШП

алюминия, а в хрупкой составляющей преимущественно включения сульфида марганца

Металлографическими исследованиями литого и деформированного металла, выполненного ЭШП, показано, что нагрев перед прокаткой и небольшое деформирование металла (степень деформации 4:1) обеспечивает уменьшение размера зерна в металле в 1,5 раза. В ЗТВ и металле шва стыков эта разница нивелируется. Однако большой размер зерна в рельсовой стали из электрошлакового слитка (в литом состоянии) ухудшает свойства сварного соединения, что может быть изменено применением термической обработки, разработке режимов которой будет посвящено отдельное исследование.

В заключение следует отметить, что рельсовая сталь электрошлакового переплава в литом и деформированном состоянии имеет плотную и однородную структуру с комплексом свойств в диапазоне требований, предъявляемых к нетермоупрочненным рельсам К76 по ГОСТ Р 51045 и ДСТУ 4344, что открывает перспективы применения ЭШП для изготовления рельсов, в том числе и остряковых рельсов, применяемых в литом состоянии.

Рельсовая сталь электрошлакового переплава в литом и слабо деформированном состоянии сваривается контактной стыковой сваркой оплавлением. Испытания металла стыков рельсовой стали лабораторной выплавки, сваренных контактной сваркой, показали, что микроструктура металла шва и зоны термического влияния в обоих случаях отличается однородным плотным строением. Разрушение образцов происходило преимущественно в ЗТВ. Прочность сварных соединений из металла в литом состоянии ниже, чем слабо деформированного, что, по-видимому, обусловлено крупным зерном, размер которого может быть измельчен применением термической обработки.

Список литературы

1. Кучук-Яценко С.И., Дидковский А.В., Швец В.И. и др. (2016) Контактная стыковая сварка высокопрочных рельсов современного производства. *Автоматическая сварка*, **5 6**, 7–16.
2. https://mrpl.city/news/view/ukrzaliznytsya-perehodit-na-relsy-vysshej-kategorii-kotorye-izgotovleny-azovstalyu
3. Медовар Л.Б., Стовпченко Г.П., Полішко Г.О. та ін. (2018) Сучасні рейкові сталі і можливості ЕШП (Огляд) Повідомлення 1. Сучасні умови експлуатації рейок і дефекти, що зменшують строк їх служби. *Современная электрометаллургия*, **1**, 3–7.
4. Медовар Л.Б., Стовпченко Г.П., Полішко Г.О. та ін. (2018) Сучасні рейкові сталі і можливості ЕШП (Огляд) Повідомлення 2. Вимоги стандартів до хімічного складу сталі для залізних колій. *Там же*, **2**, 28–36.
5. Пихтін Я., Левченко В., Іванисенко Л. та ін. (2009) Аналіз вимог національних стандартів до якості залізничних рейок і результатів випробувань їх експлуатаційної стійкості. *Стандартизація, сертифікація, якість*, **4**, 24–30.
6. Рудюк А.С., Азаркевич А.А., Восковец Ю.А. и др. (2011) Дефектность рельсов на дорогах Украины. *Путь и путевое хозяйство*, **7**, 28–32.
7. Симачев А.С., Осколкова Т.Н., Темлянцев М.В. (2016) Влияние неметаллических включений рельсовой стали на высокотемпературную пластичность. Известия высших учебных заведений. *Черная металлургия*, 59, **2**, 134–137.
8. Кучук-Яценко С.И., Швец В.И., Дидковский А.В., Антипин Е.В. (2016) Влияние неметаллических включений рельсовой стали на формирование сварного соединения. *Автоматическая сварка*, **5 6**, 28–32.
9. Шур Е.А., Трушевский С.М. (2005) Влияние неметаллических включений на разрушение рельсов и рельсовой стали. *Неметаллические включения в рельсовой стали. Сб. науч. тр.* Екатеринбург, ГНЦ РФ ОАО «УИМ», с. 87.
10. Шур Е.А., Борц А.И., Сухов А.В. и др. (2015) Эволюция повреждаемости рельсов дефектами контактной усталости. *Вестник ВНИИЖТ*, **3**, 3–8.
11. Великанов А. В., Рейхарт В. А., Баулин И. С., Дьяконов В. Н. (1978) Статистическое обоснование допустимой нормы загрязненности рельсовой стали строчечными неметаллическими включениями. *Вестник ВНИИЖТ*, **8**, 50–51.
12. https://cyberleninka.ru/article/v/rezervy-povysheniya-kachestva-relsov-sovershenstvovanie-tehnologii-mikrolegirovaniya-relsovoy-stali
13. Троцан А.И., Каверинский В.В., Кошулэ И.М., Носоченко А.О. (2013) О факторах, влияющих на качество рельсовой стали и рельсов. *Металл и литье Украины*, **6**, 9–14.
14. (1981) *Электрошлаковый металл*. Патон Б.Е., Медовар Б.И. (редакторы). Киев, Наукова думка.
15. Hoyle G. (1983) *Electroslag Processes: Principles and Practice*. Elsevier Science Ltd.
16. Медовар Б.И., Емельяненко Ю.Г., Тихонов В.А. (1975) О механизме трансформации и удаления неметаллических включений в процессе ЭШП электродов большого сечения. *Рафинирующие переплавы*. Вып. 2. Киев, Наукова думка, сс. 73–81.
17. Жеребцов С.Н. (2004) Особенности очищения металла от неметаллических включений при электрошлаковом переплаве. *Омский научный вестник*, **1**, 75–77.
18. Полишко А.А., Саенко В.Я., Степанюк С.Н. и др. (2014) Поведение неметаллических включений в структуре литой электрошлаковой нержавеющей стали AISI типа 316. *Современная электрометаллургия*, **1**, 10–18.
19. Бешенцев А.В., Галушка А.А., Шур Е.А. (1992) О выборе технологической схемы производства рельсов ЭШП в условиях металлургического комбината «Азовсталь». *Проблемы специальной электрометаллургии*, **2**, 22–28.
20. Kayda P., Medovar L., Polishko G., Stovpchenko G. (2015) ESR Possibilities to improve railroad rail steel performance. *Proc. of 9th Intern. Conf. on CLEAN STEEL, 8–10 Sept. 2015, Budapest, Hungary*.
21. Медовар Л.Б., Стовпченко А.П., Кайда П.Н. и др. (2016) Новый подход к улучшению качества заготовки для производства высокопрочных рельсов. *Современная электрометаллургия*, **1**, 7–15.
22. Sawley K., Reiff R. (2000) Rail failure assessment for the office of the rail regulator. An assessment of railtrack's methods for managing broken and defective rails. P-00-070.
23. Saita K., Karimine K., Ueda M. et. al. (2013) Trends in rail welding technologies and our future approach. Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical Report, 105.
24. Генкин И.З. (1951) Электроконтактная сварка рельсов. Москва, Трансжелдориздат. Технический справочник железнодорожника. *Путь и путевое хозяйство*, **5**, сс. 378–390.
25. Кучук-Яценко С.И., Лебедев В.К. (1976) *Контактная стыковая сварка непрерывным оплавлением*. Киев, Наукова думка.

References

1. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Didkovsky, A.V., Shvets, V.I. et al. (2016) Flash-butt welding of high-strength rails of nowadays production. *The Paton Welding J*., **5 6**, 4-12.
2. https://mrpl.city/news/view/ukrzaliznytsya-perehodit-narelsy-vysshej-kategorii-kotorye-izgotovleny-azovstalyu.
3. Medovar, L.B., Stovpchenko, G.P., Polishko, G.O. et al. (2018) Modern rail steels and solutions ESR (Review). Information 1. Operating conditions and defects observed. *Sovrem. Elektrometall*., **1**, 3-8 [in Russian].
4. Medovar, L.B., Stovpchenko, G.P., Polishko, G.O. et al. (2018) Modern rail steels, application of ESR (Review). Information 2. Requirements of standards to chemical composition of steel for railway rails of main-line tracks. *Ibid*., **2**, 28-36 [in Russian].
5. Pykhtin, Ya., Levchenko, V., Ivanysenko, L. et al. (2009) Analysis of requirements of national standards on quality of railway rails and results of their service endurance. *Standartyzatsiya, Sertyfikatsiya, Yakist,* **4**, 24-30 [in Ukrainian].
6. Rudyuk, A.S., Azarkevich, A.A., Voskovets, Yu.A. et al. (2011) Defectiveness of rails on Ukrainian railways. *Put i Putevoe Khozyajstvo*, **7**, 28-32 [in Russian].
7. Simachev, A.S., Oskolkova, T.N., Temlyantsev, M.V. (2016) Effect of nonmetallic inclusions of rail steel on high-temperature plasticity. *Izv. Vuzov. Chyorn. Metallurgiya*, 59(**2**), 134-137 [in Russian].
8. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Shvets, V.I., Didkovsky, A.V., Antipin, E.V. (2016) Effect of non-metallic inclusions of rail steel on welded joint formation. *The Paton Welding J*., **5 6**, 24-28.
9. Shur, E.A., Trushevsky, S.M. (2005) Effect of nonmetallic inclusions on fracture of rails and rail steel. Nonmetallic inclusions in rail steel. *In: Transact. Ekaterinburg, UIM*, 87-90 [in Russian].
10. Shur, E.A., Borz, A.I., Sukhov, A.V. et al. (2015) Evolution of rail damageability by contact fatigue defects. *Vestnik VNIIZhT*, **3**, 3-8 [in Russian].
11. Velikanov, A.V., Rejkhart, V.A., Baulin, I.S., Dyakonov, V.N. (1978) Statistical justification of permissible contamination standard of rail steel by stringer nonmetallic inclusions. *Vestnik VNIIZhT*, **8**, 50-51 [in Russian].
12. https://cyberleninka.ru/article/v/reservy-povysheniya-kachestva-relsov-sovershenstvovanie-tehnologii-mikrolegirovaniya-relsovoj-stali
13. Trotsan, A.I., Kaverinsky, V.V., Koshule, I.M., Nosochenko, A.O. (2013) On factors influencing the quality of rail steel and rails. *Metall i Litio Ukrainy*, **6**, 9-14 [in Russian].
14. (1981) *Electroslag metal*. Ed. by B.E.Paton, B.I. Medovar. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
15. Hoyle, G. (1983) *Electroslag processes: Principles and practice*. Elsevier Science Ltd.
16. Medovar, B.I., Emelyanenko, Yu.G., Tikhonov, V.A. (1975) *On mechanism of transformation and removal of nonmetallic inclusions in ESR process of large-section electrodes. Refining remeltings. Issue 2*. Kiev, Naukova Dumka, 73-81 [in Russian].
17. Zherebtsov, S.N. (2004) Peculiarities of metal refining from nonmetallic inclusions in electroslag remelting. *Omsky Naychny Vestnik*, **1**, 75-77 [in Russian].
18. Polishko, A.A., Saenko, V.Ya., Stepanyuk, S.N. et al. (2014) Behavior of non-metallic inclusions in structure of cast electroslag stainless steel of AISI of 316 type. *Sovrem. Elektrometallurgiya*, **1**, 10-18 [in Russian].
19. Beshentsev, A.V., Galushka, A.A., Shur, E.A. (1992) On selection of technological scheme for manufacture of ESR rails in conditions of Metallurgical Combine Azovstal. *Problemy Spets. Elektrometallurgii*, **2**, 22-28 [in Russian].
20. Kayda, P., Medovar, L., Polishko, G., Stovpchenko, G. (2015) ESR possibilities to improve railroad rail steel performance. *In: Proc. of 9th Int. Conf. on Clean Steel (8-10 Sept. 2015, Budapest, Hungary)*.
21. Medovar, L.B., Stovpchenko, A.P., Kaida, P.N. et al. (2016) New approach to the improvement of quality of billets for manufacture of high-strength rails. *Sovrem. Elektrometallurgiya*, **1**, 7-15 [in Russian].
22. Sawley, K., Reiff, R. (2000) Rail failure assessment for the office of the rail regulator. An assessment of railtrack's methods for managing broken and defective rails. P-00-070.
23. Saita, K., Rarimine, K., Ueda, M. et al. (2013) Trends in rail welding technologies and our future approach. *Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical Report*, 105.
24. Genkin, I.Z. (1951) Resistance welding of rails. Moscow, Transzheldorizdat. In: Techn. refer. book of railwayman. *Put i Putevoe Khozyajstvo*, **5**, 378-390 [in Russian].
25. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Lebedev, V.K. (1976) Continuous flash-butt welding. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].

ЗВАРЮВАННЯ ВИСОКОВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВУ ПРИ КОНТАКТНОМУ СТИКОВОМУ ЗВАРЮВАННІ

Г.О. Полішко, Л.Б. Медовар, Г.П. Стовпченко, Є.В. Антипин, О.В. Дідковський, А.Ю. Тунік

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

Представлені результати досліджень структури і властивостей зразків лабораторної виплавки рейкового металу (в слабодеформованому і литому стані), отриманого електрошлаковим переплавом після контактного стикового зварювання оплавленням. Дослідження показали, що мікроструктура металу шва і зони термічного впливу в обох випадках відрізняється однорідною щільною будовою. Руйнування зразків відбувалося переважно в зоні термічного впливу. Міцність зварних з'єднань з металу в литому стані нижче, ніж слабодеформованого, що на перший погляд обумовлено великим зерном, розмір якого може бути подрібнений застосуванням термічної обробки. Рейкова сталь електрошлакового переплаву в литому та слабодеформованому стані має рівень механічних властивостей в діапазоні вимог, що пред'являються до нетермозміцнених рейок К76 по ГОСТ Р 51045 і ДСТУ 4344, що відкриває перспективи застосування електрошлакового переплаву для виготовлення рейок, в тому числі і острякових рейок, застосовуваних в литому стані. Бібліогр. 25, табл. 3, рис. 7.

Ключові слова: контактне стикове зварювання, рейкова сталь, електрошлаковий переплав, слабодеформований і литий метал, зварювальний стик, металографічні дослідження, механічні властивості

WELDABILITY OF HIGH-CARBON STEEL OF ELECTROSLAG REMELTING IN FLASH-BUTT WELDING

G.O. Polishko, L.B. Medovar, G.P. Stovpchenko, Ye.V. Antipin, O.V. Didkovskiy and A.Yu. Tunik

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

The paper presents the results of a examination of structure and properties of the samples produced by laboratory melt of rail metal (in lightly deformed and cast state) obtained by electroslag remelting after flash-butt welding of rails. The examinations showed that microstructure of weld metal and heat-affected zone in both cases differs by homogeneous dense structure. Fracture of the samples took place mainly in the heat-affected zone. Strength of welded joints from metal in cast state is lower, than lightly deformed one, which is apparently caused by coarse grain, size of which can be refined using heat treatment. Rail steel of electroslag remelting in cast and lightly deformed state has a level of mechanical properties made to non-thermostrengthened rails K76 on GOST R 51045 and DSTU 4344 that reveals the perspectives of application of electroslag remelting for manufacture of rails, including rail tongue, applied in cast steel. 25 Ref., 3 Tabl., 7 Fig.

Keywords: flash-butt welding, rail steel, electroslag remelting, lightly deformed and cast metal, welded joint, metallographic examinations, mechanical properties

Поступила в редакцию 13.12.2018