



УДК 621.791:625.143.48

ДЕФЕКТЫ СОЕДИНЕНИЙ ВЫСОКОПРОЧНЫХ РЕЛЬСОВ, ВЫПОЛНЕННЫХ КОНТАКТНОЙ СТЫКОВОЙ СВАРКОЙ ОПЛАВЛЕНИЕМ

С. И. КУЧУК-ЯЦЕНКО, В. И. ШВЕЦ, А. В. ДИДКОВСКИЙ, Е. В. АНТИПИН, Л. М. КАПИТАНЧУК
ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Проведены исследования дефектов структуры соединений рельсов, полученных контактной стыковой сваркой оплавлением, которые выявлены на поверхности изломов после разрушения соединений при испытаниях на статический изгиб, а также после разрушения в условиях эксплуатации. Анализ микроструктуры и химической неоднородности поверхности изломов осуществляли на Оже-микросзонде JAMP 9500F фирмы «JEOL» (Япония). К дефектам, образующимся в результате отклонения от стандартного режима сварки, отнесены непровары и включения железомарганцовистых силикатов, которые значительно снижают показатели при механических испытаниях сварных соединений. Их наличие в сварных соединениях недопустимо. Скопления включений алюмосиликатов, так называемых матовых пятен, и оксидные пленки более сложного состава формируются в соединении на базе неоднородно распределенных неметаллических включений металла рельса. Матовые пятна при небольшой площади не влияют на показатели при механических испытаниях сварных соединений. Общая площадь их на изломе не должна превышать 15 мм². На основании проведенных исследований определены критерии оценки качества соединений высокопрочных рельсов, выполненных контактной стыковой сваркой оплавлением с использованием современных систем управления. Библиогр. 9, табл. 2, рис. 11.

Ключевые слова: контактная стыковая сварка оплавлением, рельсовые стали, статический изгиб, поверхность излома, дефекты сварных соединений, непровар, железомарганцовистые силикаты, алюмосиликаты

В последнее пятилетие в главные пути украинских и российских железных дорог производится массовая укладка высокопрочных рельсов. Соединение рельсов в основном выполняется контактной стыковой сваркой оплавлением (КССО) с использованием оборудования и технологии, разработанной ИЭС им. Е. О. Патона [1]. Контроль качества сварных рельсов выполняется непосредственно после сварки с использованием операционного и неразрушающего ультразвукового контроля. Кроме того, в соответствии с нормативными требованиями в начале каждой рабочей смены производятся испытания контрольных образцов на статический изгиб.

В ИЭС им. Е. О. Патона накоплен большой объем данных по всем видам контроля соединений высокопрочных рельсов в сочетании с исследованием изломов и данными механических испытаний. Установлено, что при одинаковой площади дефектов, выявляемых в соединениях высокопрочных рельсов конверторной плавки, показатели механических испытаний снижаются в большей степени, чем в рельсах мартеновского производства.

Цель настоящей статьи — изучение дефектов в соединениях высокопрочных рельсов конверторной плавки, полученных КССО.

Образцы для исследований отбирали на рельсосварочных предприятиях на основе результатов операционного и неразрушающего ультразвукового контроля. Дефекты структуры выявляли на поверхности изломов после испытаний сварных стыков на статический изгиб. Испытания проводили по методике, принятой на железных дорогах Украины и России [2].

Металлографические исследования микроструктуры соединений рельсов проводили на световом микроскопе «Неофот 32», а фрактографические исследования и микрорентгеноспектральный анализ поверхности излома — на Оже-микросзонде JAMP 9500F фирмы «JEOL» (Япония). Химический состав рельсовых сталей приведен в табл. 1.

Типичная микроструктура металла сварного шва рельсов, выполненного на оптимальном режиме, представляет собой сорбитообразный перлит (рис. 1). По линии соединения наблюдается полоса шириной около 200 мкм с выделениями доэвтектоидного феррита по границам первичных аустенитных зерен, размер которых по ASTM соответствует баллу 2...3. В зависимости от градиента температурного поля при сварке количество доэвтектоидного феррита может изменяться. При оптимальных жестких режимах, отличающихся высоким градиентом температурного поля,



Таблица 1. Химический состав рельсовых сталей различного производства, мас. % (ГОСТ Р 51685–2000)

Марка стали	C	Mn	Si	P	S	V	Ti	Cr	Al	Cu
М76	0,71...0,82	0,75...1,05	0,25...0,45	< 0,035	< 0,040	—	—	—	0,02	≤ 0,15
Э76Ф К76Ф				< 0,025	< 0,030	0,03...0,15	—	—	0,02	
Э76Т К76Т				< 0,030	< 0,035	—	0,007...0,025	—	0,02	
КФ	0,78...0,81	0,89...0,91	0,30...0,39	0,013...0,02	0,003...0,01	0,057...0,061	—	0,03...0,04	—	0,02...0,04

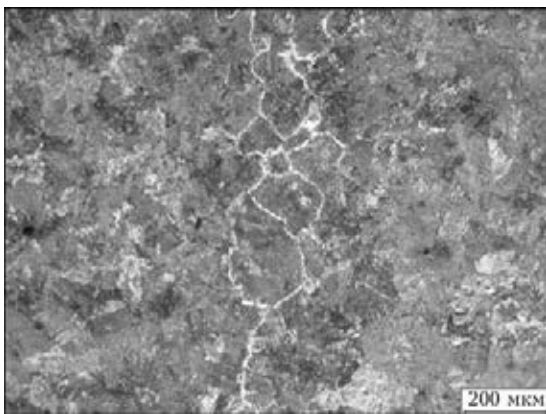


Рис. 1. Микроструктура центра шва сварного соединения рельсов

толщина ферритной оторочки минимальна, и она может прерываться. Такие соединения отличаются наиболее высокими пластическими свойствами.

Излом соединений рельсов, сваренных на оптимальном режиме, имеет кристаллическое строение. Поверхность излома в основном состоит из фасеток скола с ручьистым узором и язычками, присутствуют гребни отрыва (рис. 2).

На поверхности излома встречаются тугоплавкие включения карбонитридов титана, алюминатов кальция, оксисульфидов марганца (рис. 3). Размер этих неметаллических включений не превышает десятка микрометров. Наличие таких включений придает излому рельефность. Присутствие их не критично для прочностных характеристик соединения.

Дефекты, оказывающие значительное влияние на прочностные свойства соединений, проявля-

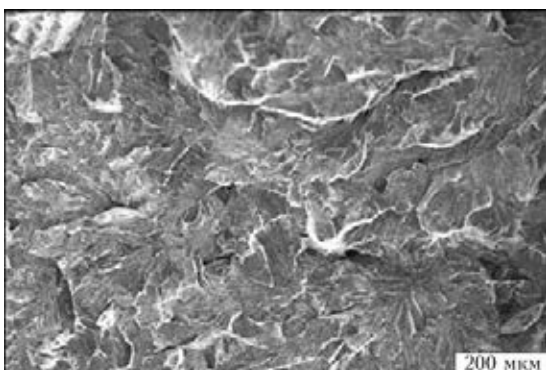


Рис. 2. Поверхность излома сварного соединения рельсов

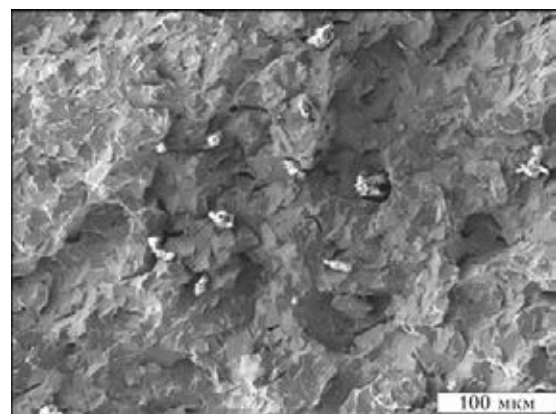


Рис. 3. Тугоплавкие неметаллические включения на поверхности излома сварного соединения рельсов

ются как нарушение однородности кристаллического строения излома.

Одним из таких дефектов является непровар. При КССО непровар формируется в условиях, когда металл торца рельса перед осадкой находится в твердом или твердожидком состоянии. На изломе он имеет вид плоского блестящего участка (рис. 4). Установлено, что микроструктура поверхности анализируемого непровара представ-

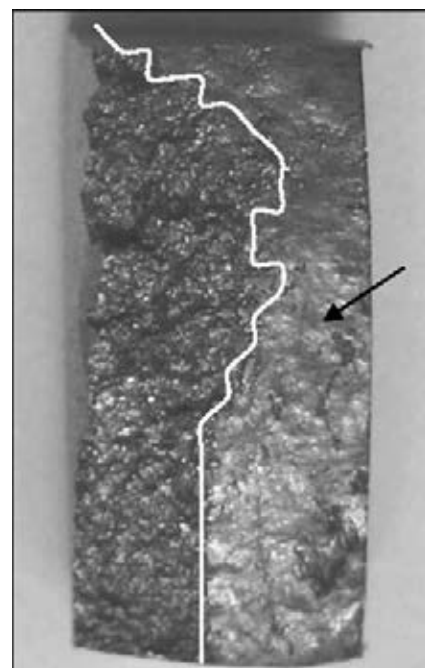
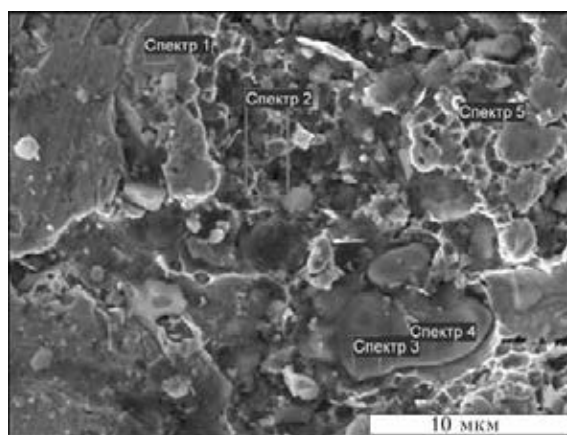


Рис. 4. Непровар на поверхности излома сварного соединения рельсов



Номер спектра	Содержание элементов, ат. %							Примечание
	C*	O	Na	Si	Ca	Mn	Fe**	
1	5,90	3,23	0,18	0,00	0,00	0,00	90,68	Матрица
2	28,77	22,60	1,61	3,20	1,24	0,74	41,83	Включения
3	3,00	53,06	0,08	0,16	0,08	4,19	39,44	»
4	5,96	68,24	0,09	18,32	0,00	0,51	6,89	»
5	7,01	53,36	0,37	0,61	0,08	0,35	38,22	»

* — распределение углерода в стали при сварке требует отдельного рассмотрения, выходящего за рамки настоящей статьи. ** — значение концентрации железа зависит от соотношения размеров анализируемого объекта и диаметра электронного зонда.

Рис. 5. Микроструктура поверхности излома и химическая неоднородность на участке непровара в сварном соединении рельсов

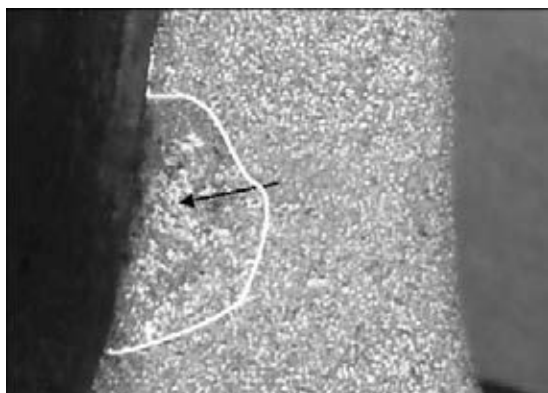


Рис. 6. Железомарганцовистые силикаты на поверхности излома сварного соединения рельсов

ляет собой плоские участки матрицы металла рельса (рис. 5, спектр № 1), разделенные структурной составляющей, состоящей из оксидов и силикатов (рис. 5, спектры № 2–5). Очевидно, эта структурная составляющая образуется из неметаллических включений основного металла и продуктов окисления оплавленного по границам металла рельса.

Наличие дефектов такого типа даже небольшой площади (1...2 мм²), выявляемых современными средствами ультразвукового контроля, в сварных соединениях недопустимо, так как они снижают показатели при статических и ударных испытаниях, провоцируют усталостные разрушения сварных стыков.

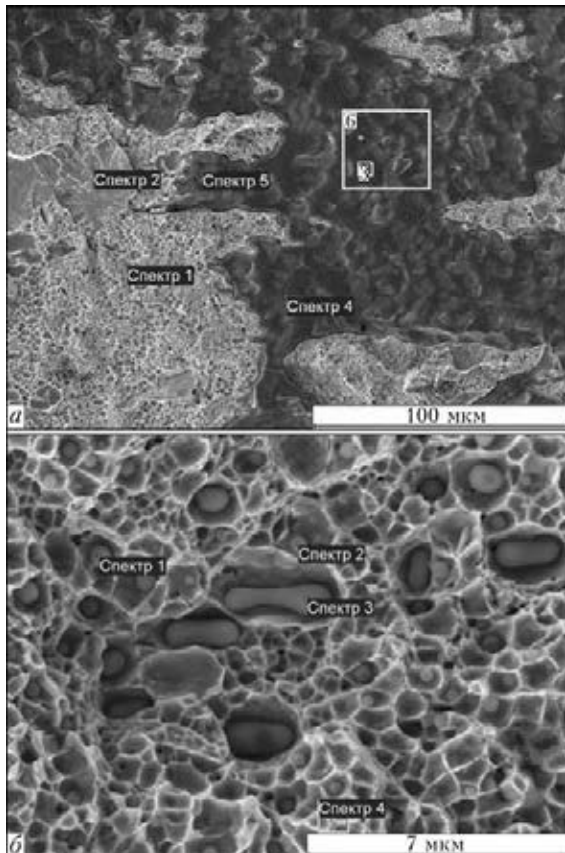
Другой тип дефектов представляет собой пятна с неразвитым рельефом, в пределах которых сочетаются блестящие и матовые места (рис. 6). Анализ микроструктуры поверхности излома показал, что блестящие места представляют собой слой железомарганцовистых силикатов (рис. 7, а). Матовые места, примыкающие к монолитному слою, являются местом скопления частиц железомарганцовистых силикатов (рис. 7, б). Разрушение происходит в результате расслоения по пленке на участке монолитного слоя и по ямочному механизму в местах скопления включений.

Железомарганцовистые силикаты образуются в процессе сварки при окислении оплавленного металла. Принято считать [3], что формирование оксидных структур в плоскости соединения определяется наличием кислорода в искровом промежутке в период оплавления, предшествующего осадке. В работе [4] показано, что главным фактором, влияющим на образование дефектов в плоскости соединения, является состояние расплава на оплавляемых торцах деталей в период, предшествующий осадке. Если расплав сохраняется, при деформации он выдавливается из стыка вместе с оксидами, образуя на его поверхности, независимо от содержания кислорода в искровом зазоре. Длительность существования слоя расплава на торцах зависит от его толщины, градиента температурного поля в приконтактной области торцов и скорости оплавления деталей [5].

Описанные дефекты наблюдаются в соединениях рельсов, сваренных с отклонениями от заданных оптимальных значений параметров сварки. Они уверенно выявляются современными средствами ультразвукового контроля даже при небольшой площади (1...2 мм²). Присутствие их в сварных соединениях недопустимо, поскольку они снижают показатели механических свойств при статических и ударных испытаниях, провоцируют усталостные разрушения сварных стыков.

Особое место занимают дефекты, которые в нормативных документах определяются как «матовые» (МП), или «серые» пятна. На поверхности излома они наблюдаются как участки темного цвета с неразвитым рельефом (рис. 8). Эти дефекты чаще всего встречаются при испытаниях сварных соединений различных металлов, выполненных КССО.

Сравнительный анализ химического состава с площади показал, что МП обогащены по сравнению с окружающей поверхностью кристаллического строения алюминием, марганцем, кремнием (рис. 9, а). При более тонких исследованиях установлено, что МП представляют собой скоп-



Номер спектра	Содержание элементов, ат. %					Примечание
	C	O	Si	Mn	Fe	
1	8,96	5,59	0,95	0,76	83,74	Скопление частиц силикатов
2	5,42	3,16	0,00	0,10	91,31	Фасетка скола
3	2,24	56,41	12,63	8,87	19,85	Монолитный слой силикатов
4	0,74	58,67	12,69	7,46	20,44	То же
5	2,43	52,69	4,70	7,40	32,78	» »
6	2,40	55,97	9,64	8,59	23,40	» »

Номер спектра	Содержание элементов, ат. %					Примечание
	C	O	Si	Mn	Fe	
1	5,99	54,25	14,49	15,53	9,74	Частицы силикатов
2	7,22	48,70	15,58	10,01	18,49	» »
3	3,20	59,61	14,73	18,37	4,09	» »
4	10,03	4,53	0,52	0,00	84,92	Матрица (без включений)

Рис. 7. Микроструктуры и результаты анализа химического состава неоднородности на участке излома с железомарганцовистыми силикатами в виде пленки (а) и включений (б)

ления частиц марганцовистых алюмосиликатов, располагающихся в металлической матрице (рис. 9, б). Частицы имеют оплавленный вид и характеризуются слабой адгезией к железу.

Следует отметить, что на изломе наблюдаются как собственно частицы алюмосиликатов, так и места расположения этих частиц, удаленные при разрушении. Матовость излому придает ямочный рельеф поверхности после разрушения по включениям.

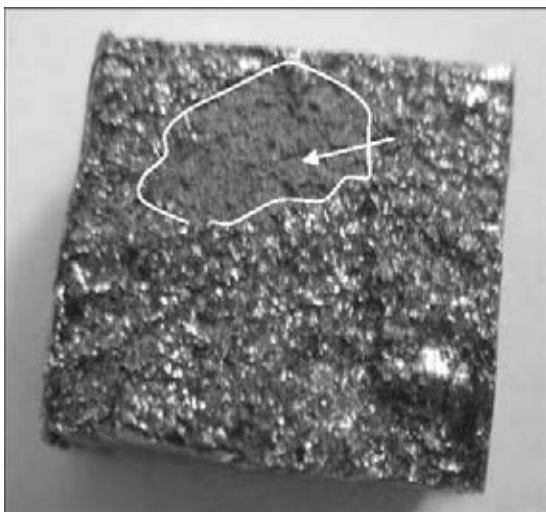
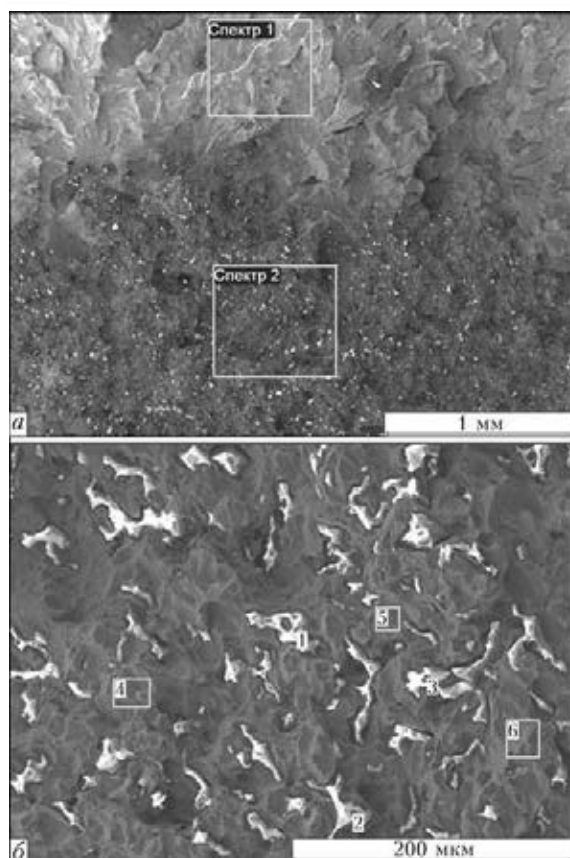


Рис. 8. Матовые пятна на поверхности излома сварного соединения рельсов

Характерной особенностью включений алюмосиликатов является незначительное количество железа в их составе (0,86...0,99 ат. %.). Это свидетельствует о том, что образование их не связано с оплавлением торцов. Они формируются в примыкающем к оплавленному металлу слое на базе включений основного металла (см. табл. 2). Обогащение марганцем происходит при переходе его из матрицы в формирующийся легкоплавкий силикат, что возможно в силу высокой диффузионной подвижности и поверхностной активности марганца в железе. Расположение алюмосиликатов в примыкающем к оплавленному металлу слое затрудняет их выдавливание в грат при осадке.

Известно, что легкоплавкие алюмосиликаты образуются при недоокислении кремния в присутствии алюминия [6]. Источником кремния может быть силикокальций, используемый в качестве раскислителя при производстве рельсов, что косвенно подтверждается присутствием кальция в составе алюмосиликатов. Алюминий попадает в сталь из ферросплавов и, возможно, ковшового шлака [7].

В ходе исследования большого количества дефектов типа МП в соединениях рельсов различного производства установлено, что они существенно отличаются от рассмотренных выше дефектов не только составом структурных составляющих, но и толщиной, не превышающей 20



Номер спектра	Содержание элементов, ат. %						Примечание
	C	O	Al	Si	Mn	Fe	
1	8,34	2,74	0,00	0,25	0,13	88,55	Фасетки скола
2	7,01	16,52	0,45	4,08	5,86	66,08	Пятно

Номер спектра	Содержание элементов, ат. %						Примечание
	C	O	Al	Si	Mn	Fe	
1	3,27	66,66	1,11	16,48	11,61	0,86	Включения
2	3,36	61,08	3,15	16,70	14,73	0,99	» »
3	2,41	68,91	1,32	16,39	6,90	0,90	» »
4	4,43	1,57	0,11	0,00	0,80	93,09	Матрица
5	5,51	0,86	0,00	0,18	0,81	90,76	» »
6	4,70	1,50	0,00	0,15	1,11	92,54	» »

Рис. 9. Микроструктуры и результаты анализа химического состава поверхности излома соединений рельсов на участке матового пятна с площади (а) и локально (б)

мкм. Небольшая толщина, с одной стороны, затрудняет их выявление при ультразвуковом контроле, а с другой — наличие таких дефектов в сварных швах рельсов не влияет существенно на показатели при натурных испытаниях на статический и ударный изгиб. Ограниченное количество МП в соединениях рельсов допустимо. Их суммарная площадь существующими нормативами ограничена до 15 мм² [2], что достаточно обосновано экспериментальными данными.

В последнее время на изломах рельсов, разрушающихся не только по соединению, но и по

основному металлу, в области головки встречались дефектные участки близкой к овалу формы темного цвета и неразвитым рельефом (рис. 10).

Установлено, что разрушение на участке овального пятна происходит по ямочному механизму (рис. 11). В пределах участка выявлены группы включений размером около 20 мкм, представляющие собой сложные оксиды, в состав которых входят алюминий, кремний, магний, кальций (рис. 11, а). Подобные по химическому составу, но более мелкие включения присутствуют в ямках (рис. 11, б). В ямках наблюдаются также

Т а б л и ц а 2. Результаты микрорентгеноспектрального анализа химического состава неметаллических включений в рельсовой стали, ат. %

Марка стали	Fe	Mn	Si	S	V	Ti
М76	39,8...80,9	0,86...10,3	0,51...1,3	0,3...5,3	Не опр.	Не опр.
К76Ф	33,5...58,5	0,01...0,5	0,9...6,1	2,4...30,1	0,006	0,1...1,2
Э76Ф	68,9...95,8	0,7...1,6	0,56...5,9	0,08...0,5	0,06...0,12	—

Окончание табл. 2

Марка стали	P	Al	Ca	Cu	O	Mg
М76	0,02	Не опр.	0,03...5,3	0,01...0,11	6,3...55,2	Не опр.
К76Ф	0,02	0,001...5,3	0,1...5,3	0,01...0,15	11,9...30,5	0,2...0,5
Э76Ф	0,01	0,29...0,31	0,55...5,2	0,15...0,18	1,86...21,8	0,4...0,7

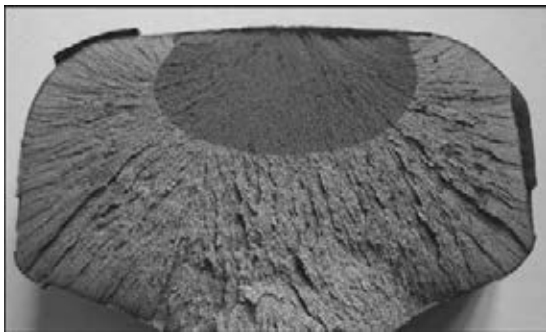


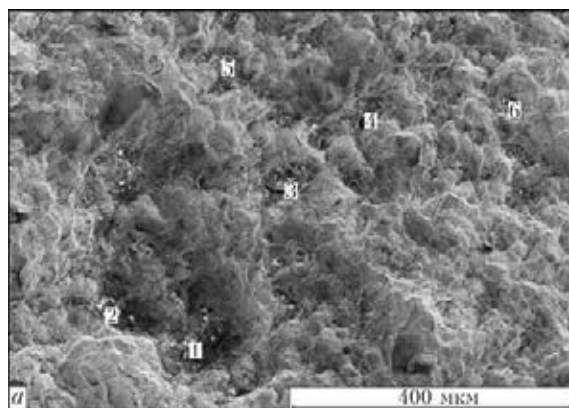
Рис. 10. Овальные пятна на изломе рельсов

По-видимому, образование овального пятна происходит на основе МП в результате взаимодействия алюмосиликатов с окисью железа, например в случае недораскисленности стали. При этом формируются более легкоплавкие оксидные системы, отличающиеся высокой жидкотекучестью [8]. В термомеханических условиях прокатки и сварки эти легкоплавкие оксиды проникают по структурным границам и формируют овальные пятна.

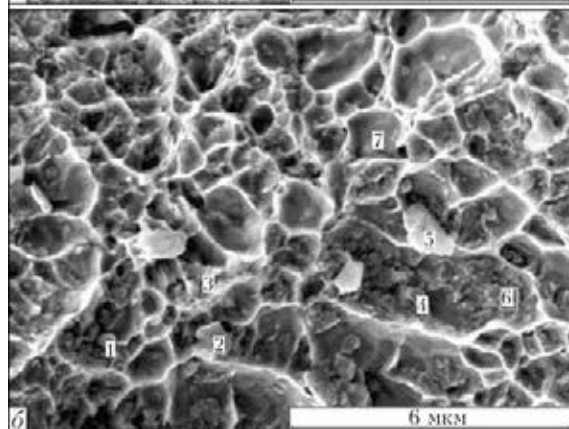
включения оксидов железа, размер которых составляет десятые доли микрометра (рис. 11, в).

Отсутствие металлического соединения на большей площади вызывает значительное снижение прочности.

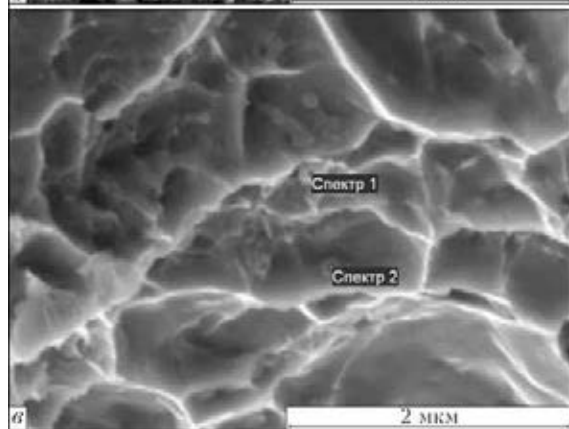
При сварке высокопрочных рельсов современного производства, как показывают результаты



Номер спектра	Содержание элементов, ат. %							
	C	O	Mg	Al	Si	S	Ca	Fe
1	34,38	7,29	—	0,68	3,60	—	4,58	45,64
2	46,57	29,02	—	1,47	4,41	1,53	—	2,40
3	24,00	23,21	—	1,49	3,27	—	0,74	47,29
4	49,32	33,95	0,23	1,87	6,48	0,30	0,79	6,03
5	55,94	27,26	0,45	2,35	6,54	—	1,18	5,57
6	26,55	53,09	0,36	1,25	2,61	2,41	10,22	1,86



Номер спектра	Содержание элементов, ат. %							
	C	O	Al	Si	S	Ca	Cr	Fe
1	16,48	3,78	0,00	1,02	—	—	0,08	78,62
2	28,58	19,54	0,00	1,03	1,46	2,14	—	46,66
3	16,05	9,34	0,67	1,48	—	—	—	72,46
4	18,36	24,75	3,20	5,00	—	—	—	48,69
5	18,83	52,32	5,01	15,22	—	—	—	4,75
6	17,46	4,58	0,31	0,57	—	—	—	77,07
7	3,52	0,17	0,00	0,40	—	—	—	95,92



Номер спектра	Содержание элементов, ат. %			
	C	O	Si	Fe
1	13,61	22,79	0,81	62,79
2	16,87	10,99	0,52	71,63

Рис. 11. Микроструктуры и результаты анализа химического состава неметаллических включений на участке овального пятна излома сварного соединения рельсов: а — скопления частиц оксидов алюминия, кремния, кальция, магния; б — частицы оксидов, располагающиеся в ямках; в — оксиды железа



большого количества контрольных партий сварных рельсов, вероятность образования МП возрастает по сравнению с аналогичными данными, полученными при сварке рельсов мартеновского производства. По-видимому, это связано с попаданием в сталь алюминия как попутного элемента, например, при введении ванадия, титана, ниобия или других технологических операций. Для устранения подобных дефектов необходимо проводить работы по усовершенствованию процессов плавки и разливки стали.

Повышенная склонность к формированию МП в высокопрочных рельсах современного производства создает затруднения при определении оптимальных технологий сварки. Для получения требуемых нормативами показателей пластических свойств соединений необходимо изыскивать возможности получения дополнительного запаса пластичности металла в ЗТВ, чтобы компенсировать негативное влияние на этот показатель МП в случае их формирования. Разработчики технологий сварки высокопрочных рельсов стремятся решить эту задачу за счет прецизионного контроля энерговыделения при сварке и применении самонастраивающихся систем управления процессом оплавления [9].

На основании проведенных исследований определены критерии оценки соединений высокопрочных рельсов, которые положены в основу разработки операционного и неразрушающего контроля качества сварных рельсов, выполненных КССО с использованием современных систем управления процессом сварки и неразрушающего контроля.

Заключение. В результате проведенной работы по исследованию дефектов сварных соединений рельсов, полученных КССО, установлено, что большинство дефектов находится в плоскости соединения. По своей структуре и влиянию на механические свойства дефекты могут быть разбиты на три группы.

Первую группу составляют непровары. Вторая группа дефектов представляет собой невыдавленные при осадке железомарганцовистые силикаты. Третья группа — скопления включений марганцовистых алюмосиликатов, так называемые матовые пятна.

Дефекты первой и второй групп значительно снижают показатели при механических испытаниях. Их наличие в сварных соединениях недопустимо. Дефекты третьей группы при общей площади до 15 мм² не оказывают значительного влияния на показатели механических свойств рельса. Дефекты первой, второй групп, а также третьей группы площадью более 15 мм² уверенно выявляются современными средствами неразрушающего ультразвукового контроля.

1. Кучук-Яценко С. И., Дидковский А. В., Швец В. И. Технология и оборудование для контактной сварки высокопрочных рельсов // Автомат. сварка. — 2008. — № 11. — С. 129–138.
2. ТУ У 27.1-31632138-1330-2010. Рейки нові зварені для залізниць. — Харківський регіональний науково-виробничий центр стандартизації, метрології та сертифікації, 2010.
3. Гуляев А. И. Технология и оборудование контактной сварки. — М.: Машиностроение, 1985. — 256 с.
4. Кучук-Яценко С. И. Контактная стыковая сварка оплавлением / Отв. ред. В. К. Лебедев. — Киев: Наук. думка, 1992. — 236 с.
5. Класифікація і каталог дефектів і пошкоджень елементів стрілочних переводів та рейок залізниць України. — Дніпропетровськ: Арт-Прес, 2000. — 148 с.
6. Виноград М. И., Громова Г. П. Включения в легированных сталях и сплавах. — М.: Машиностроение, 1971. — 216 с.
7. Годик Л. А., Козырев Н. А., Поляков В. А. Оптимизация содержания кислорода в рельсовой стали // Сталь. — 2009. — № 3. — С. 29–32.
8. Атлас шлаков: Справ. изд. / Пер. с нем. под ред. д-ра техн. наук И. С. Куликова. — М.: Металлургия, 1985. — 208 с.
9. Пат. 46820 Україна в В23К11/04, С2. Спосіб контактного стикового зварювання оплавленням / С. І. Кучук-Яценко, О. В. Дідковський, М. В. Богорський та ін.; опубл. 17.06.2002 г., Бюл. № 6.

Поступила в редакцию 26.06.2013