

ВЛИЯНИЕ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ НА ФОРМИРОВАНИЕ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ

С. И. КУЧУК-ЯЦЕНКО, В. И. ШВЕЦ, А. В. ДИДКОВСКИЙ, Е. В. АНТИПИН

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail:office@paton.kiev.ua

На железных дорогах Украины с 2012 года началась укладка в пути высокопрочных рельсов производства ПАО «МК «Азовсталь» из стали марки К76Ф, а также рельсов производства РФ. Для этого в ИЭС была разработана технология контактной сварки высокопрочных рельсов различного производства, обеспечивающая требуемые по техническим условиям (ТУ) показатели прочности и пластичности сварных соединений. В процессе промышленного внедрения технологии сварки высокопрочных рельсов рельсосварочными предприятиями Украины накоплен большой объем информации о результатах комплексного применения операционного контроля с неразрушающими и разрушающими способами контроля. Было установлено, что на формирование структуры металла в зоне соединения наряду с энерговыделением оказывает существенное влияние состав и распределение неметаллических включений в основном металле свариваемых рельсов. Тип и структура дефектов в значительной степени определяются составом неметаллических включений. Это влияние проявляется в различной степени при изменении энерговыделения в процессе сварки.

Ключевые слова: контактная сварка, оплавление, железнодорожные рельсы, высокопрочные рельсы, пульсирующее оплавление, дефекты в рельсах, неметаллические включения, матовые пятна, контроль качества, бесстыковой путь

В ИЭС разработана технология контактной сварки высокопрочных рельсов различного производства, обеспечивающая требуемые по ТУ показатели прочности и пластичности сварных соединений. В основу ее положен способ сварки пульсирующим оплавлением (ПО) [1], позволяющий сваривать высокопрочные рельсы с минимальным их разупрочнением и сохранением требуемых пластических свойств. По сравнению с известными технологиями сварки рельсов разработанная технология требует в 1,5...2 раза меньше энерговыделения.

Устойчивое воспроизведение технологического процесса требует точного контроля энерговыделения, что обеспечивается системой автоматического управления процессом оплавления с использованием операционной системы контроля параметров сварочного процесса. При этом установлены предельно допустимые отклонения от заданного температурного поля, что обеспечивает оптимальные условия формирования соединений [2].

В процессе промышленного внедрения технологии сварки высокопрочных рельсов рельсосварочными предприятиями Украины накоплен большой объем информации о результатах комплексного применения операционного контроля

с неразрушающими и разрушающими способами контроля. Было установлено, что на формирование структуры металла в зоне соединения наряду с энерговыделением оказывает существенное влияние состав и распределение неметаллических включений в основном металле свариваемых рельсов. Это влияние проявляется в различной степени при изменении энерговыделения в процессе сварки.

Целью проведения исследований было изучение влияния неметаллических включений в рельсовой стали на формирование структуры сварных швов высокопрочных рельсов.

Для проведения исследований на рельсосварочных предприятиях были отобраны образцы высокопрочных рельсов различных производителей. Отбор преимущественно выполнялся из партий рельсов, при сварке которых наблюдались нестабильные показатели качества сварных швов.

Химический состав и механические свойства исследованных партий образцов приведены в табл. 1. Содержание в них легирующих элементов и примесей соответствует сертификационным документам.

Сварка образцов высокопрочных рельсов выполнялась на стационарной машине К1000, ко-

Таблица 1. Химический состав рельсовой стали (мас. %)

Марка стали	Химический состав, %								
	C	Mn	Si	V	Ti	Cr	P	Al	S
К76Ф (Украина)	0,71...0,82	0,80... 1,30	0,25...0,45	0,03...0,07	-	-	0,035	0,015	0,045
76Ф (РФ)	0,71...0,82	0,75...1,05	0,25...0,45	0,03...0,15	-	-	0,025	0,02	0,03

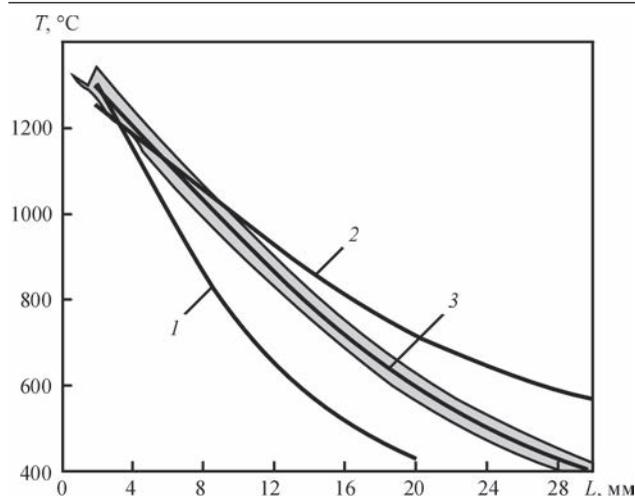


Рис. 1. Распределение температуры в ЗТВ перед осадкой при сварке рельсов Р65 способом пульсирующего оплавления на различных режимах: 1 — $t_{св} = 30 \dots 40$ с; 2 — $t_{св} = 110 \dots 120$ с; 3 — $t_{св} = 70 \dots 80$ с

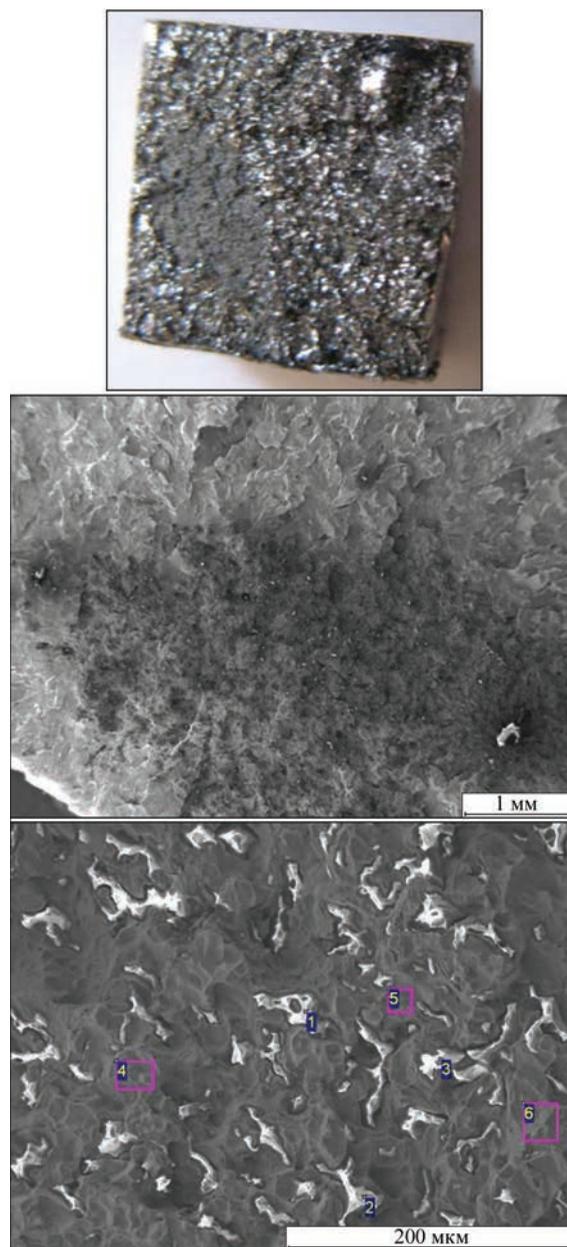
торые эксплуатируются на рельсосварочных предприятиях Украины. Программы сварки использовались такие же, как в производственных условиях. При этом установлены режимы с предельно низкими (см. рис. 1, режим 1), предельно высокими (см. рис. 1, режим 2) и оптимально (см. рис. 1, режим 3) допустимыми тепловложениями.

Сварные соединения всех партий подвергались неразрушающему ультразвуковому контролю (УЗК), а также испытывались на статический изгиб в соответствии с принятыми методиками. Часть соединений исследовалась с использованием методик металлографического анализа на оптическом микроскопе «Neophot 32» и микроскопе-микроанализаторе JAMP-9500F.

В табл. 2 приведены результаты испытаний сварных соединений рельсов марок стали КФ и 76Ф РФ на статический поперечный изгиб, а также для сравнения требования нормативных документов. По результатам испытаний можно сказать, что самые лучшие показатели мы получили при сварке на режиме 3 и в его границах, а при сварке на режимах 1 и 2 не было получено стабильных результатов (см. рис. 1).

При этом в обоих случаях регистрируются выпадения отдельных показателей прочности и пластичности. В изломах таких соединений наблюдаются дефекты, определяемые как «матовые пятна» (МП). Они выделяются на поверхности излома неразвитым рельефом и отличаются серым цветом. Суммарная площадь их регламентируется нормативными документами [3].

Как показали проведенные нами исследования, в микроструктуре МП на фоне преимущественно ямочного излома матрицы (встречаются единичные фасетки скола) присутствуют многочисленные оплавленного вида включения (рис. 2).



	C	O	F	Al	Si	Mn	Fe
1	3,27	66,66	3,49	1,11	16,48	8,12	0,86
2	1,63	61,08	2,73	2,15	16,70	14,73	0,99
3	2,41	68,91	3,16	1,32	16,39	6,90	0,90
4	4,43	1,57	0	0,11	0	0,80	93,09
5	5,51	0,86	1,88	0	0,18	0,81	90,76
6	4,70	1,50	0	0	0,15	1,11	92,54

Рис. 2. Силикатные «матовые пятна» на изломе сварных соединений и результаты анализа металла рельсов производства ПАО «МК «Азовсталь»

Согласно результатам микрорентгеноспектрального анализа основу включений составляют марганцовистые силикаты. В их состав при незначительном содержании железа могут входить такие активные элементы как алюминий, кальций, титан, магний.

Размер включений порядка 10 мкм дает основание считать, что наблюдаемое скопление сили-

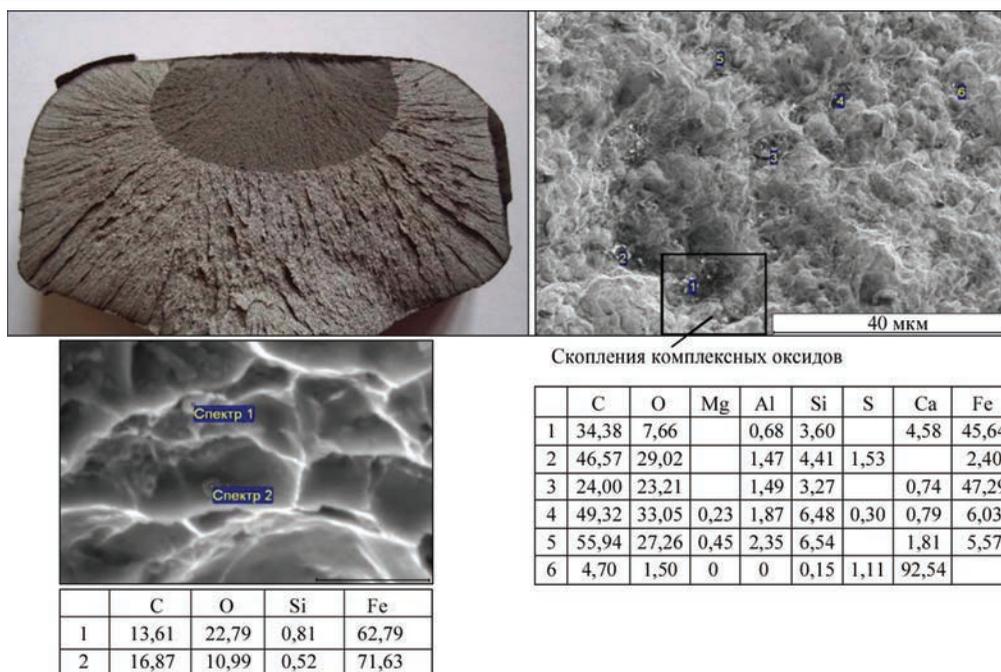


Рис. 3. Оксидные «матовые пятна» на изломе рельсов производства ПАО «МК «Азовсталь»

Таблица 2. Результаты испытаний рельсов марок стали К76Ф и 76Ф на изгиб

Номер режима	Стандарт и марка стали	Разрушающая нагрузка, кН	Стрела прогиба, мм	Примечание
	Украины			ТУ У 24.1-40075815-002:2016
	РФ	210	≥27	СТО РЖД 1.08.002-2009
1	К76Ф	<u>1750...2000</u> 1950	<u>25...35</u> 28	ПО
1	76Ф	<u>1750...2300</u> 1950	<u>12...35</u> 28	ПО
2	К76Ф	<u>1800...2000</u> 1900	<u>14...30</u> 19	ПО
2	76Ф	<u>1700...2300</u> 2000	<u>12...32</u> 21	ПО
3	К76Ф	<u>2000...2300</u> 2150	<u>35 – 45</u> 38	ПО
3	76Ф	<u>2300...2600</u> 2450	<u>30...46</u> 38	ПО

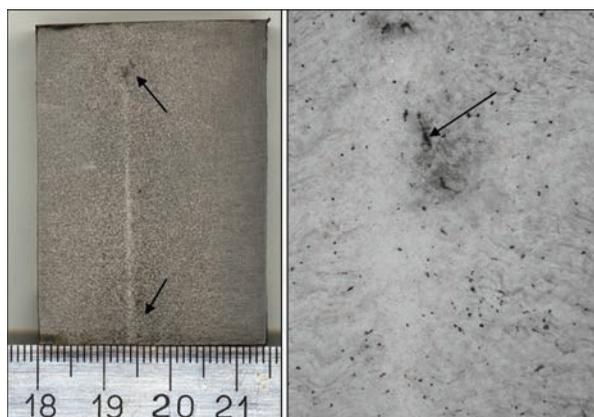


Рис. 4. Микротрещины в макроструктуре (×25) соединений образцов рельсов из стали марки 76Ф

катов образуется в результате фрагментации крупного включения при осадке.

Наряду с традиционными силикатными МП в изломах рельсов марок стали К76Ф производства

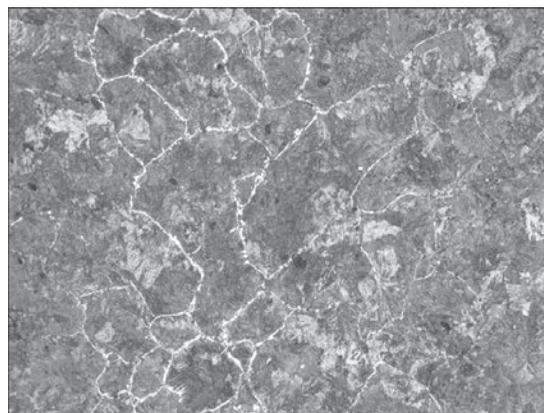


Рис. 5. Микроструктура (×100) соединения рельсов из стали марки 76Ф, сваренных на режиме 2 (см. рис. 1)

ПАО МК «Азовсталь», разрушенных при испытаниях на изгиб по основному металлу и по зоне термического влияния, наблюдались четко оконтуренные МП другой природы (рис. 3). Площадь их

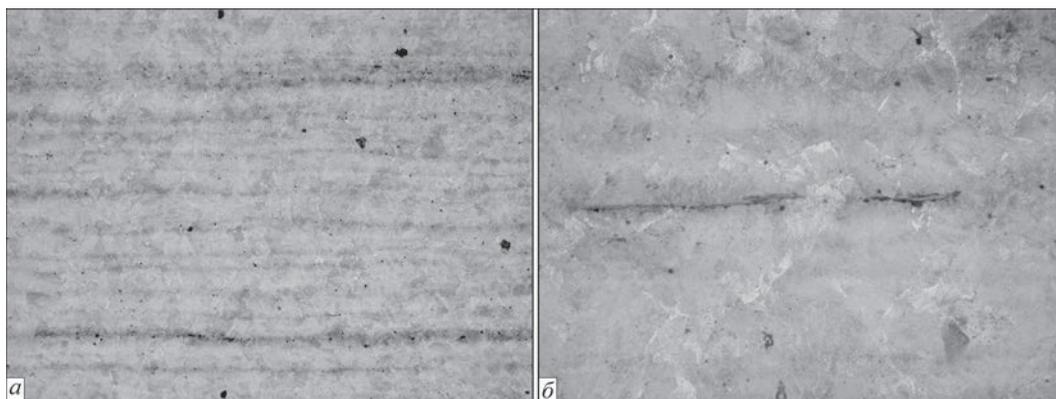


Рис. 6. Включения сульфидов в металле рельсов марки 76Ф, выявленные травлением в пикрате натрия: а — $\times 100$; б — $\times 400$

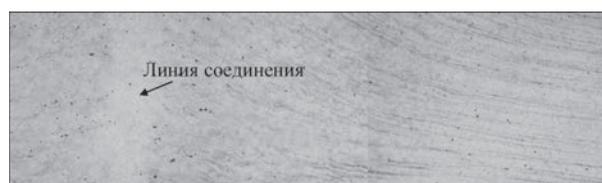


Рис. 7. Трансформация микроструктуры соединения рельсов из стали марки 76Ф

в отдельных случаях достигала десятков квадратных миллиметров.

Тонкие металлографические исследования показали, что характер излома в области пятен также ямочный. Однако в ямках присутствуют не силикаты, а оксиды железа размером менее десятых долей микрона. Необходимо отметить, что в пределах пятна наблюдались также скопления более крупных включений комплексных оксидов алюминия, кальция, кремния размером несколько микрон.

Очевидно, эти пятна являются результатом формирования в металле легкоплавких пленок, основу которых составляет оксид железа. Такие пятна на поверхности излома, в отличие от силикатных, можно классифицировать как оксидные МП. Из-за очень малой толщины пленки обнаружить их в металле рельса УЗК проблематично. Это затрудняет предварительную отбраковку рельсов.

Увеличение тепловложения при сварке приводит к снижению показателей испытаний сварных

рельсов марок стали КФ и 76Ф. Это обусловлено, прежде всего, увеличением размера зерна в средней части шва и развитием процесса выделения феррита по границам первичных аустенитных зерен по линии соединения.

В сварных образцах рельсов марки стали 76Ф, сваренных на режимах 2, УЗК была выявлена неоднородность металла, а последующий анализ макроструктуры показал, что наблюдаемая неоднородность является результатом зарождения трещин (рис. 4).

Микроструктура металла шва однородно сорбитная (рис. 5). По линии соединения наблюдается слой с ферритной оторочкой границ первичных аустенитных зерен. Ширина этого слоя около 500 мкм. Размер первичных аустенитных зерен по ASTM, соответствует 1...2 баллам. Ширина участка нормализации сварного соединения около 40 мм.

Микроструктура основного металла рельса сорбито-перлитная. В основном металле присутствуют многочисленные сульфиды (Fe, Mn) S в виде цепочек мелких глобулей и линзообразных включений, вытянутых вдоль направления проката (рис. 5, табл. 2). Встречались также обособленные, беспорядочно разбросанные более крупные неправильной формы сульфиды. Линзообразные сульфиды, как известно, обогащены железом, более пластичны и являются продуктом горячей деформации при прокатке [4].

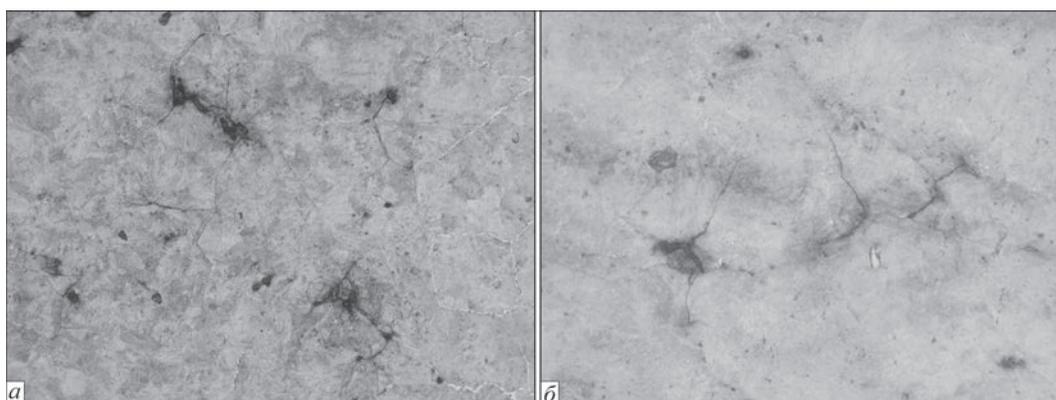


Рис. 8. Микротрещины в приконтактном слое соединения рельсов из стали марки 76Ф: а — $\times 100$; б — $\times 400$

Таблица 3. Результаты микрорентгеноспектрального анализа химического состава включений в металле рельса

Структурная составляющая	Содержание элементов, мас. %				
	Al	Si	S	Mn	Fe
Матрица	0,341	0,135	0,000	0,798	98,726
Включения в ОМ	0,530	0,361	18,511	30,872	49,726
Включения в ОМ	0,321	0,049	15,254	25,738	58,630
Включения в ОМ	0,358	0,209	16,312	27,269	55,852
Включения у линии соединения	0,729	0,430	3,751	7,657	87,433
Включения у линии соединения	0,278	0,463	3,211	6,336	89,712

В термомеханических условиях сварки включения сульфидов вытягиваются вдоль деформационных полос. В приконтактном слое активизация диффузионных процессов приводит к нарушению строчечности их расположения и коагуляции (рис. 6, 7).

Микротрещины, обнаруженные в приконтактном слое, примыкают к включениям сульфидов (рис. 8). Содержание железа в этих сульфидах значительно выше такового в линзообразных включениях основного металла: 80...85 и 50...60 мас. % соответственно, что свидетельствует об активном взаимодействии с железной матрицей.

В системе FeS–MnS существует эвтектика с температурой плавления 1164 °С. На контактной границе включений сульфидов марганца с железной матрицей при технологических нагревах возможно образование эвтектического расплава. Интенсификация этого процесса ведет к увеличению объема расплава и распространению его по структурным границам.

В литературе это явление определено как вязко-хрупкий переход при около солидусных температурах [5], который не является природным свойством стали, а определяется наличием примесных элементов металлургического происхождения, главным образом серы, фосфора, кислорода.

Растрескивание металла соединения рельсов по эвтектическим прослойкам, формирующимся в приконтактном слое, может произойти как при охлаждении, так и под нагрузкой в процессе эксплуатации. Это представляет опасность того, что соединения рельсов, прошедших контроль, могут разрушаться, будучи уложенными в путь.

Существенное влияние на развитие трещин оказывает деформация металла в приконтактном слое при осадке. Полосы проката, обогащенные включениями сульфидов (табл. 3), изгибаются и ориентируют ослабленный участок в наиболее неблагоприятном направлении относительно нагрузок, которые испытывает соединение рельсов.

Ужесточение режима нагрева приводит к пассивации процесса трансформации сульфидов и

торможению его на стадии коагуляции до распространения эвтектического расплава по межзеренным границам. Это позволило избежать растрескивания металла в соединениях, сваренных на режимах 1 и 3.

Выводы

1. Наличие в рельсовой стали неметаллических включений может существенно влиять на формирование дефектов в зоне сварки. Тип и структура дефектов в значительной степени определяются составом неметаллических включений.

2. Оксидные включения, сосредоточенные в полосах проката, выносятся в зону шва и в условиях деформации, образуя скопления, выстраиваются в наиболее неблагоприятном направлении относительно нагрузок, которые испытывает рельс.

3. Энерговложение при сварке оказывает влияние на формирование дефектов. При повышенном энерговложении в приконтактной зоне на основе сульфидов марганца формируются легкоплавкие эвтектики, распространяющиеся по границам зерен и создающие опасность образования микротрещин.

1. Кучук-Яценко С. И. Контактная стыковая сварка непрерывным оплавлением / С.И. Кучук-Яценко, В. Х. Лебедев. - Киев: Наукова думка, 1976. – 213 с.
2. Кучук-Яценко С. И. Технология и новое поколение оборудования для контактной стыковой сварки высокопрочных рельсов современного производства при строительстве и реконструкции скоростных железнодорожных магистралей / С. И. Кучук-Яценко, В. Г. Кривенко, А. В. Дидковский // Автоматическая сварка. – 2012. – № 6 – С. 32-37.
3. Рейки нові зварені для залізниць: ТУ У 27.1-40081293-002:2016. – ТУ У 27.1-40081293-002:2016. – Дніпропетровське НКТБ КГ філії НДКТИ ПАТ «Укрзалізниця».
4. Дементьев В. П. Ликвация в профиле Р65 рельсовой стали / В. П. Дементьев // Известия вузов. «Черная металлургия». – 2002. – № 10. – С. 1–9.
5. Забильский В. В. Вязко-хрупкий переход в сталях при околосолидусных температурах. Механизм охрупчивания границ зерен / В. В. Забильский, Р. М. Никонова. – ФММ, 2005, Т. 99, Вып. 3, С.1-9.

Поступила в редакцию 16.05.2016