

## СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ ПРИ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ СВАРКЕ

**В. Д. ПОЗНЯКОВ**, д-р техн. наук, **В. М. КИРЬЯКОВ**, **А. А. ГАЙВОРОНСКИЙ**, кандидаты техн. наук,  
**А. В. КЛАПАТЮК**, **О. С. ШИШКЕВИЧ**, инженеры (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Приведены результаты исследований влияния термомеханических циклов сварки на структурные изменения, прочностные и пластические свойства металла ЗТВ сварных соединений рельсовой стали с содержанием углерода 0,72 %. Исследовано влияние температуры предварительного подогрева и погонной энергии сварки на сопротивляемость замедленному разрушению металла ЗТВ и образование холодных трещин в соединениях.

*Ключевые слова:* дуговая сварка, железнодорожные рельсы, сварные соединения, зона термического влияния, замедленное разрушение, холодные трещины

При изготовлении железнодорожных рельсов используют высокоуглеродистую кремниво-марганцовистую сталь с содержанием углерода 0,71...0,82 % и марганца 0,75...1,05 %. Введение в таких количествах марганца в рельсовую сталь в сравнении с углеродистой сталью резко снижает критическую скорость закалки и значительно повышает глубину ее термообработки. Поэтому сварка данного типа сталей связана со значительными трудностями, которые состоят в выработке мер по предупреждению возникновения кристаллизационных (горячих) и замедленных (холодных) трещин в металле шва и околошовном металле ЗТВ [1, 2].

Возникновение горячих трещин в металле шва происходит в результате увеличения содержания углерода при перемешивании его с основным металлом в процессе дуговой сварки. Повысить стойкость металла шва против горячих трещин можно за счет применения электродных материалов с пониженным содержанием углерода, сварки на режимах, обеспечивающих минимальное проплавление основного металла, а также при увеличении коэффициента наплавки [1]. При механизированных способах сварки лучших результатов достигают использованием проволок малого диаметра на прямой полярности и пониженных погонных энергиях.

Наибольшие трудности при сварке высокоуглеродистых сталей возникают вследствие образования холодных трещин в соединениях. Их образование обусловлено склонностью высокоуглеродистых сталей к закалке и соответственно определяется особенностями структурных превращений в металле ЗТВ под влиянием термомеханического цикла сварки. Особенно трудно предупредить возникновение холодных трещин, ког-

да соединение нельзя подвергнуть специальной термообработке сразу после сварки.

По основному показателю свариваемости стали, стойкости сварных соединений против образования холодных трещин высокоуглеродистая рельсовая сталь достаточно близка к высокопрочным среднелегированным сталям, содержание углерода в которых составляет 0,30...0,40 %. Значение показателей углеродного эквивалента для этих сталей приблизительно одинаково ( $C_{\text{ЭКВ}} = 0,80...1,0$  %) [2]. Поэтому для предупреждения образования холодных трещин в сварных соединениях рельсовой стали могут быть применены аналогичные технологические решения, как и при сварке среднелегированных сталей.

При исследованиях свариваемости среднелегированных сталей установлены наиболее эффективные способы предупреждения возникновения холодных трещин в металле ЗТВ соединений [2, 3]. К ним относятся регулирование термического цикла сварки и временных сварочных напряжений, применение сварочных проволок с низкой температурой плавления, снижение содержания диффузионного водорода в металле шва, применение дополнительных технологических приемов, таких, как предварительная наплавка кромок разделки соединения, специальная техника сварки и др.

Наиболее простым и доступным способом является регулирование термического цикла путем применения предварительного и сопутствующего подогревов соединения наряду с оптимальным выбором режимов сварки. Во многих случаях сварка среднелегированных углеродистых сталей при таком подходе позволяет практически полностью устранить опасность образования холодных трещин в соединении. Идеальным термическим циклом сварки считается такой, при котором не происходит перегрева металла в околошовном участке ЗТВ в результате его быстрого нагрева и охлаждения при температурах выше темпера-

**Таблица 1. Скорость охлаждения в металле ЗТВ при механизированной сварке соединений рельсовой стали**

$Q_{св}$ , кДж/см	$T_{п.п}$ , °C	$w_{6/5}$ *, °C/c
8,6	20	20...25
27,5	20	11...13
8,6	100	13...15
8,6	150	10...12
8,6	200	4,5...6,0
8,6	250	3,0...4,2

\* Приведена скорость охлаждения после первого прохода.

туры  $A_{c_1}$ . Замедленное охлаждение ниже температуры  $A_{c_1}$  способствует развитию в околошовном участке перлитного и промежуточного превращений переохлажденного аустенита. При этом существенно уменьшается количество закалочных структур и сопротивляемость металла ЗТВ соединений замедленному разрушению повышается.

Что касается исследований свариваемости рельсовой стали, то такие данные ограничены. В основном они касаются проблемы повышения качества рельсов при их изготовлении, а также сварных соединений, выполненных контактным способом сварки [4–6].

Целью данной работы было изучение влияния термодформационного цикла сварки (ТДЦ) на формирование структуры, изменение прочностных и пластических свойств металла, сопротив-

ляемости металла ЗТВ замедленному разрушению и стойкости сварных соединений высокоуглеродистой рельсовой стали образованию холодных трещин.

На первом этапе исследований использовали метод имитации ТДЦ на базе установки МСР-75 с применением электронных программируемых устройств [7]. Структурные превращения в металле под действием ТДЦ исследовали методом термического дифференциального анализа. Использовали образцы размером 120×12×12 мм из рельсовой стали с содержанием углерода 0,72 %, которые нагревали электрическим током (максимальная температура нагрева 1320 °C, скорость нагрева 220...250 °C/c, скорость охлаждения в интервале температур 600...500 °C составляла 3...22 °C/c). Исследуемый диапазон скоростей охлаждения наиболее характерен для стыковых соединений рельсовой стали размером 300×150×15 мм, выполненных механизированной сваркой в среде защитного газа проволокой Св-08Г2С диаметром 1,2 мм (табл. 1).

На рис. 1 приведена диаграмма превращения переохлажденного аустенита рельсовой стали, а на рис. 2 — характерные участки микроструктуры имитируемого металла ЗТВ. Видно, что превращение переохлажденного аустенита при скоростях охлаждения 10...22 °C/c происходит преимущественно в мартенситной области (рис. 2, а, б). Температура начала мартенситного превращения 220 °C. Твердость закаленного металла составляет HRC 60...65. Уменьшение скорости охлаждения в этом интервале не приводит к существенным изменениям в структуре. Дальнейшее замедление охлаждения ( $w_{6/5} \leq 10$  °C/c) способствует уменьшению твердости металла, что связано с кинетикой распада аустенита. При скорости охлаждения 3...5 °C/c закалочные структуры отсутствуют, превращение в металле ЗТВ происходит преимущественно в перлитной области, а твердость металла понижается до HRC 35...40 (рис. 2, в).

Таким образом, в металле ЗТВ рельсовой стали с содержанием углерода 0,72 % образование закалочных структур происходит при скоростях охлаждения выше 5 °C/c. Избежать условий закалки металла ЗТВ при сварке можно при применении предварительного подогрева соединений до 200 °C (табл.1). Учитывая, что содержание углерода в рельсовой стали может быть более высоким (до 0,82 %) и мартенситное превращение может протекать при более низких скоростях охлаждения ( $w_{6/5} \leq 5$  °C/c), температура предварительного подогрева  $T_{п.п}$  при сварке рельсов должна быть не менее 250...300 °C.

Прочностные и пластические свойства металла ЗТВ рельсовой стали оценивали стандартными методами. Для этого из имитационных заготовок изготавливали специальные образцы для испытаний

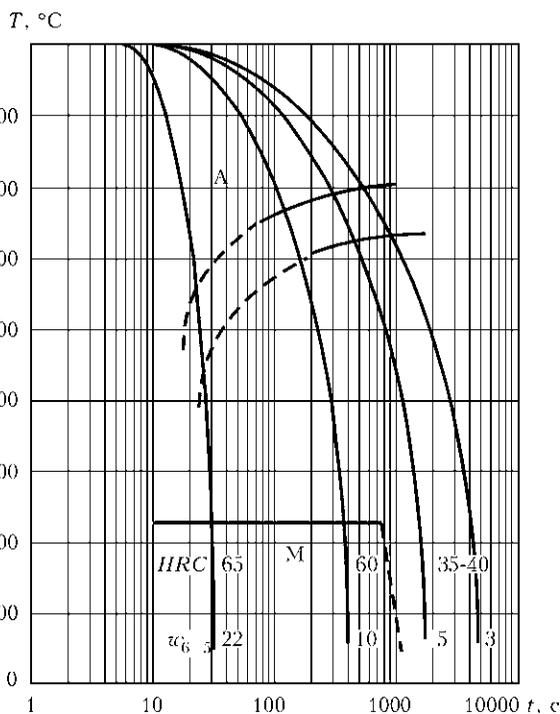


Рис. 1. Превращение переохлажденного аустенита в металле ЗТВ рельсовой стали с содержанием углерода 0,72 % ( $T_{max} = 1320$  °C;  $t_{нагр} = 6$  с)

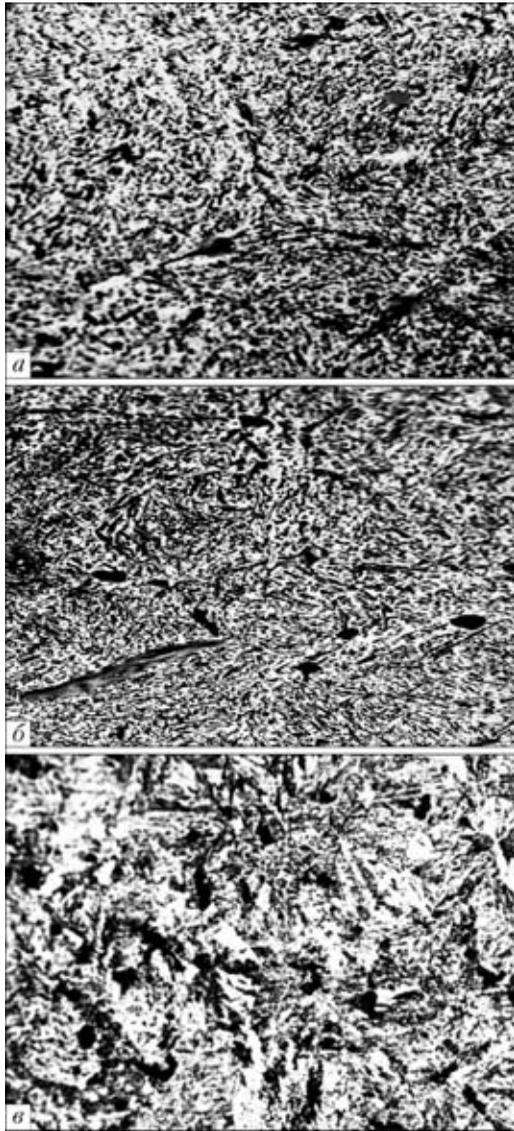


Рис. 2. Микроструктуры (X300) металла ЗТВ рельсовой стали: а —  $w_{6/5} = 22$ ; б — 10; в — 3 °C/c

металла на статическое растяжение (по ГОСТ 1497–84) и ударный изгиб (по ГОСТ 9454–78). Обобщенные результаты испытаний приведены в табл. 2.

Как видно, при больших скоростях охлаждения, когда превращение переохлажденного аустенита идет преимущественно в мартенситной области, в металле ЗТВ соединений формируется структура закаленного металла с повышенными свойствами прочности и низкой пластичностью. Такой металл имеет низкую деформационную способность, а соответственно и повышенную склонность к замедленному разрушению. Улучшить пластические свойства металла ЗТВ можно путем замедления охлаждения сварных соединений. При уменьшении скорости охлаждения  $w_{6/5} \leq 5$  °C/c показатели пластичности металла повышаются в 1,5...2 раза.

Очевидно, что вследствие низкой пластичности металла ЗТВ рельсовой стали релаксация на-

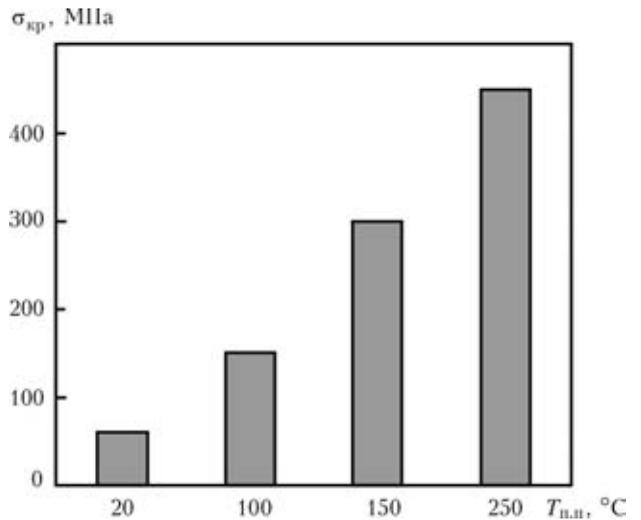


Рис. 3. Влияние температуры предварительного подогрева на сопротивляемость замедленному разрушению сварных соединений рельсовой стали при сварке проволокой Св-08Г2С ( $Q_{св} = 8,6$  кДж/см)

ряжений в соединении будет затруднена. Поэтому при сварке рельсов без применения предварительного подогрева избежать образования холодных трещин в соединениях практически невозможно. При низких скоростях охлаждения ( $w_{6/5} \leq 5$  °C/c) превращение аустенита идет с формированием более пластичных структур, но и с достаточно высоким уровнем прочности. Такой металл более способен к микропластическим деформациям, и сопротивляемость замедленному разрушению соединений должна быть сравнительно более высокая.

Количественную оценку сопротивляемости однопроходных сварных соединений рельсовой стали замедленному разрушению выполняли по методу «Имплант» [2]. В ходе экспериментов использовали цилиндрические образцы-вставки диаметром 6,0 мм без винтового надреза. На рис. 3 и 4 представлены результаты исследований сопротивляемости однослойных сварных соединений рельсовой стали замедленному разрушению.

Из приведенных данных видно, что при обычных условиях сварки проволокой Св-08Г2С на погонной энергии  $Q_{св} = 8,6$  кДж/см без применения предварительного подогрева ( $T_{п.п.} = 20$  °C) металл ЗТВ соединений имеет очень низкий уровень сопротивляемости замедленному разрушению. Критические напряжения разрушения  $\sigma_{кр} = 60$  МПа,

Т а б л и ц а 2. Механические свойства металла ЗТВ рельсовой стали с содержанием углерода 0,72 %

$w_{6/5}, ^\circ\text{C/c}$	$\sigma_r, \text{МПа}$	$\sigma_b, \text{МПа}$	$\delta_5, \%$	$\psi, \%$	$KCU_{+20}, \text{Дж/см}^2$
5	830	1120	7,7	21,4	6,7
10	880	1250	5,0	12,6	6,2
22	920	1280	4,7	12,6	5,8

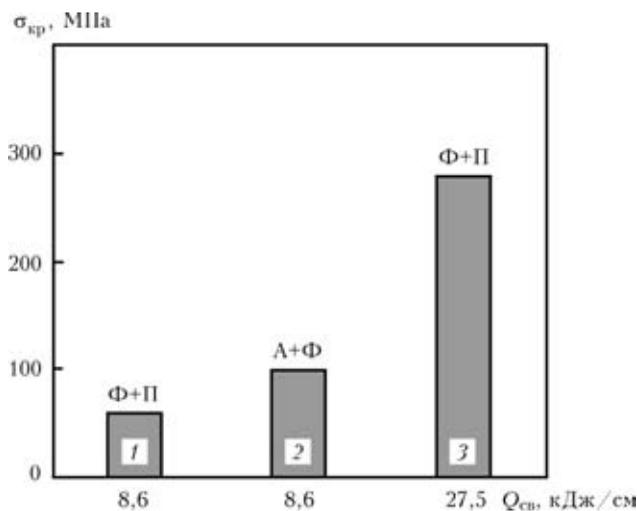


Рис. 4. Влияние погонной энергии сварки и типа металла шва на сопротивляемость замедленному разрушению сварных соединений рельсовой стали:  $T_{п.п} = 20$  (1, 2) и  $250$  °С (3)

что составляет всего  $0,07\sigma_T$ . Предварительный подогрев до  $250$  °С способствует повышению сопротивляемости металла ЗТВ замедленному разрушению более чем в 7 раз ( $\sigma_{кр} = 0,55\sigma_T$ ). При предварительном подогреве до  $300$  °С замедленного разрушения образцов «Имплант» не наблюдалось.

Увеличение погонной энергии сварки до  $27,5$  кДж/см ( $T_{п.п} = 20$  °С) также способствует повышению сопротивляемости соединений замедленному разрушению. При этом уровень  $\sigma_{кр}$  составляет  $280$  МПа. Сварка на данной погонной энергии положительно влияет на изменение структуры металла ЗТВ, что сравнимо со сваркой на погонной энергии  $8,6$  кДж/см при предварительном подогреве до  $150$  °С. При обоих вариантах сварки скорость охлаждения в соединениях (см. табл. 1) и сформированная структура металла околошовного участка ЗТВ приблизительно одинаковы. Поэтому однослойные сварные соединения разрушаются приблизительно при одном уровне нагружения.

Применение предварительного подогрева при сварке замедляет охлаждение. При этом в металле ЗТВ соединений рельсовой стали формируются более пластичные структуры. Это, как известно, способствует развитию локальных микропластических деформаций в закаленном металле ЗТВ, в результате чего процессы релаксации напряжений протекают более интенсивно и сопротивляемость сварных соединений замедленному разрушению существенно повышается [8, 9].

При сварке проволокой Св-08Х20Н9Г7Т (А+Ф) на погонной энергии  $8,6$  кДж/см без предварительного подогрева ( $T_{п.п} = 20$  °С) критические напряжения разрушения составляют всего  $100$  МПа. Это немного выше, чем при аналогичных условиях сварки ферритно-перлитной проволокой Св-08Г2С (Ф+П), но существенно ниже

уровня  $\sigma_{кр}$ , который обеспечивается применением предварительного подогрева металла до температуры  $250$  °С.

Известно, что при сварке высокопрочных легированных сталей с содержанием углерода до  $0,40$  % аустенитно-ферритный металл шва положительно влияет на формирование структуры металла ЗТВ. С применением данных материалов можно значительно повысить сопротивляемость соединений замедленному разрушению [2, 3]. Однако при использовании таких швов при сварке высокоуглеродистой рельсовой стали, вследствие формирования в металле ЗТВ малопластичных структур при высоких скоростях охлаждения, существенного повышения сопротивляемости соединений замедленному разрушению не происходит.

Последующие исследования были направлены на изучение влияния технологических факторов на особенности образования холодных трещин в многослойных сварных соединениях рельсовой стали.

Стойкость соединений высокопрочной рельсовой стали против образования холодных трещин исследовали при сварке технологических проб «жесткая обварка». Технологические пробы представляют собой стыковые соединения, которые по контуру предварительно привариваются к массивной основе. Для оценки стойкости соединений против образования продольных холодных трещин использовали стыковые соединения размером  $300 \times 100 \times 45$  мм, а на поперечные трещины —  $300 \times 300 \times 15$  мм. Концентраторами напряжений в пробах служат соответствующие конструктивные непровары в продольном или поперечном направлениях. Многослойную сварку таких проб выполняли проволокой типа Св-08Г2С диаметром  $1,2$  мм в среде защитного газа. Для фиксации момента образования и процесса развития холодных трещин при сварке контрольного стыка технологических проб применяли метод акустической эмиссии. После завершения сварки пробы выдерживали при комнатной температуре до трех суток. В дальнейшем контрольный стык отделяли от основы и из него вырезали шлифы для визуального контроля на наличие холодных трещин в соединении.

В табл. 3 представлены обобщенные результаты исследований при сварке технологических проб, а на рис. 5 — макрошлифы из контрольных соединений. Как видно, сварные соединения рельсовой стали при обычных условиях механизированной сварки без применения предварительного подогрева имеют низкую стойкость против образования как продольных, так и поперечных холодных трещин. Существенно повысить стойкость сварных соединений рельсовой стали против образования холодных трещин возможно при

**Таблица 3. Характеристики холодных трещин в соединениях рельсовой стали при сварке технологических проб «жесткая обварка»**

№ п/п	Условия сварки	Продольные	Поперечные
1	$Q_{св} = 8,6$ кДж/см, $T_{п.п} = 20$ °С	Трещина вдоль линии сплавления, 100 % по высоте соединения При сварке трещина выходила на поверхность соединения после наложения каждого слоя	Трещина проходит через шов в ЗТВ и дальше в основной металл на глубину до 10 мм. При сварке трещина выходила на поверхность шва после наложения каждого слоя
2	$Q_{св} = 27,5$ кДж/см, $T_{п.п} = 20$ °С	Трещина вдоль линии сплавления, 50 % по высоте соединения При сварке трещины на поверхности соединения не было	Развитие трещины в шов на глубину до 30 %. Трещина на поверхность шва вышла после сварки второго слоя
3	$Q_{св} = 8,6$ кДж/см, $T_{п.п} = 250$ °С	Трещин нет	Трещин нет

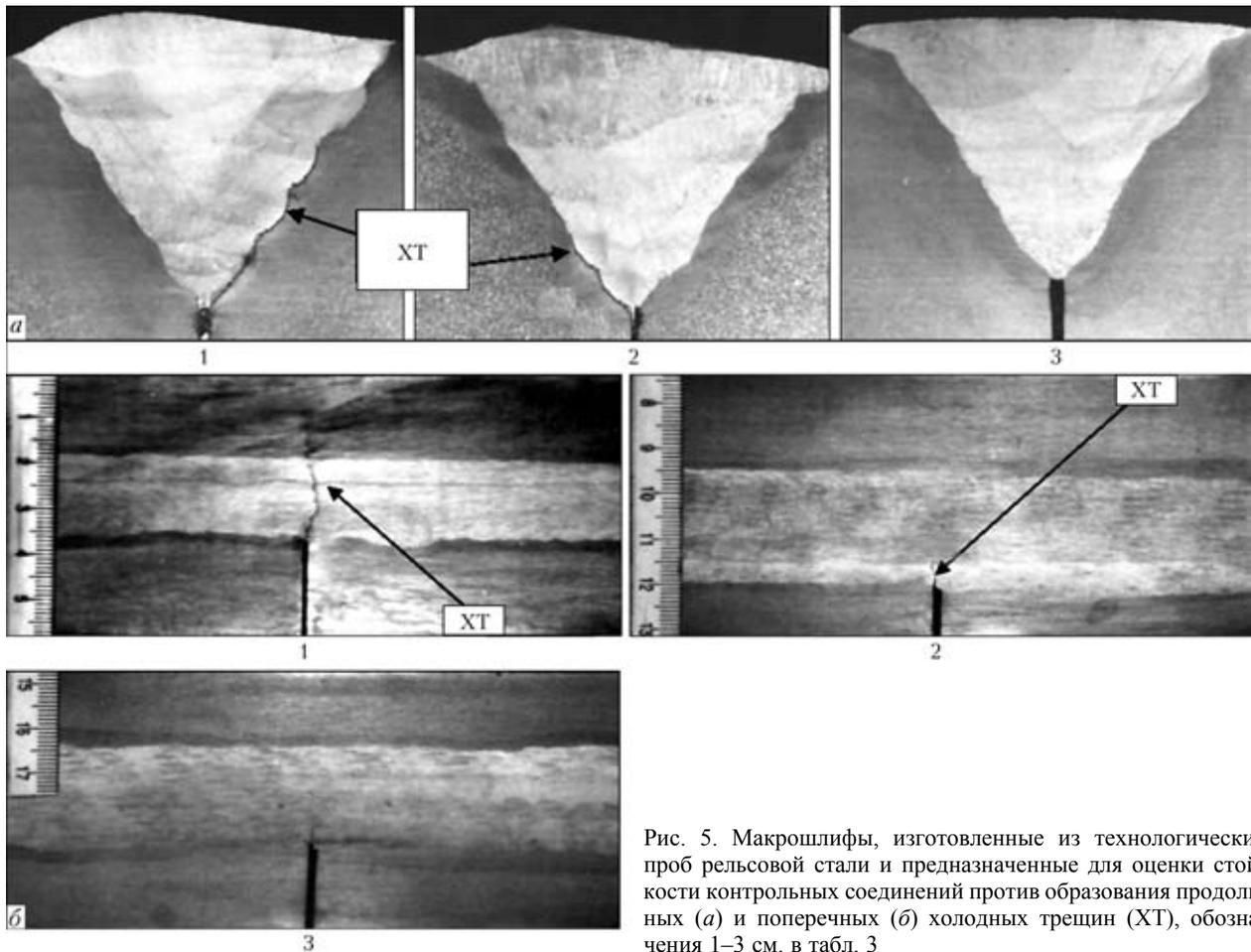


Рис. 5. Макрошлифы, изготовленные из технологических проб рельсовой стали и предназначенные для оценки стойкости контрольных соединений против образования продольных (а) и поперечных (б) холодных трещин (ХТ), обозначения 1–3 см. в табл. 3

применении предварительного подогрева и увеличении погонной энергии сварки.

Результаты проведенных исследований по влиянию ТДЦ сварки на структуру и свойства сварных соединений являются базовыми для разработки надежной технологии электродуговой сварки железнодорожных рельсов. Главным технологическим требованием при электродуговой сварке высокопрочной рельсовой стали является применение предварительного подогрева соединений до температур не ниже 250 °С.

## Выводы

1. Выполнен комплекс исследований по установлению влияния ТДЦ на формирование структуры и механические свойства рельсовой стали с содержанием углерода 0,72 %. Установлено, что при скоростях охлаждения  $w_{6/5} > 5$  °С/с в металле образуется мартенситная структура. Закаленный металл с такой структурой имеет повышенные показатели прочности ( $\sigma_B \geq 1250$  МПа) и низкую пластичность ( $\delta_5 = 5,0$  %,  $\psi = 12,6$  %). Повысить пластические свойства металла (в 1,7 раза) можно

при замедлении охлаждения ( $\omega_{6/5} \leq 5 \text{ }^\circ\text{C/с}$ ). При этом существенно повышается сопротивляемость металла замедленному разрушению ( $\sigma_{кр}$  повышаются от 60 до 450 МПа).

2. При электродуговой сварке рельсовой стали наиболее опасным участком соединений, с точки зрения зарождения холодных трещин, является металл ЗТВ. Без применения предварительного подогрева до температуры  $250 \text{ }^\circ\text{C}$  исключить образование холодных трещин в соединениях невозможно. Увеличение погонной энергии сварки способствует только замедлению процессов развития холодных трещин в сварных соединениях, но не предотвращает их зарождения.

1. *Технология* электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Под ред. акад. Б. Е. Патона. — М.: Машиностроение, 1974. — 768 с.
2. *Макаров Э. Л.* Холодные трещины при сварке легированных сталей. — М.: Машиностроение, 1981. — 247 с.

3. *Макара А. М., Мосендз Н. А.* Сварка высокопрочных сталей. — Киев: Техніка, 1971. — 139 с.
4. *Сергиенко Ю. В., Сагиров И. В.* Прогнозирование возникновения закалочных структур при сварке рельсовых сталей // Сб. докл. по материалам науч. семинара «Современные достижения в области сварки, наплавки и родственных технологий». — Мариуполь, нояб. 2000 г. — Мариуполь: Призов. гос. ун-т, 2000. — С. 9–12.
5. *Исследование структуры и металлургического качества рельсовых сталей разных производителей* / К. В. Григорович, А. С. Трушников, А. М. Арсенкин и др. // *Металлы*. — 2006. — № 5. — С. 1–16.
6. *Генкин И. З.* Сварка и термическая обработка стыков железнодорожных рельс // *Свароч. пр-во*. — 2004. — № 9. — С. 31–36.
7. *Саржевский В. А., Сазонов В. Я.* Установка для имитации термических циклов сварки на базе машины МСР-75 // *Автомат. сварка*. — 1981. — № 5. — С. 69–70.
8. *О двух путях релаксации остаточных микронапряжений в мартенсите стали* / Л. Е. Алексеева, В. И. Саррак, С. О. Суворова, Г. А. Филиппов // *Металлофизика*. — 1975. — Вып. 61. — С. 79–84.
9. *Саррак В. И., Филиппов Г. А.* Задержанное разрушение стали после закалки // *Физ.-хим. механика материалов*. — 1976. — № 12. — С. 44–54.

The paper gives the results of investigation of the influence of thermodeformational cycles of weld on structural changes, strength and ductility properties of HAZ metal of welded joints of rail steel with carbon content of 0.72 %. Influence of preheating temperature and value of welding heat input on delayed cracking resistance of HAZ metal and cold crack formation in the joints was studied

Поступила в редакцию 23.02.2010

*В каталоге продукции ГП «ОКTB ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ» приведено описание и технические характеристики специализированного сварочного оборудования:*

- ✓ оборудование для сварки корпусов баллонов
- ✓ установка для приварки труб к трубным доскам
- ✓ электродуговой заклепочник
- ✓ оборудование для наплавки корпусов арматуры трубопроводов
- ✓ оборудование для восстановления ж/д колесных пар
- ✓ оборудование для приварки шпилек
- ✓ разработка по НК для АЭС
- ✓ установки для НК труб диаметром 508... 1420 мм
- ✓ установки для НК ж/д колес
- ✓ дуговые автоматы, полуавтоматы, трактора и др.

*В архиве ОКTB хранится более 20 тыс. конструкторских проектов, по которым изготовлены и внедрены в производство десятки тысяч единиц сварочной техники.*



**Каталог можно заказать по тел. (38044) 287-65-24, факс: 289-17-36 или через редакцию журнала «Автоматическая сварка».**