



СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТАЛИ С390 (S355 J2)

В. Д. ПОЗНЯКОВ, д-р техн. наук, С. Л. ЖДАНОВ, канд. техн. наук, А. А. МАКСИМЕНКО, инж.
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Изучено влияние термических циклов сварки на изменение структуры и механических свойств металла ЗТВ сварных соединений стали С390 (S355 J2). Установлен диапазон допускаемых скоростей охлаждения металла ЗТВ в температурном интервале 600...500 °С и выбраны сварочные материалы, обеспечивающие свойства сварных соединений на уровне требований к основному металлу, а также высокую их сопротивляемость образованию холодных трещин.

Ключевые слова: дуговая сварка, высокопрочная сталь, строительные металлоконструкции, термический цикл сварки, структура, механические свойства, скорость охлаждения, холодные трещины, диффузионный водород

В последние годы в Украине для изготовления строительных сварных металлоконструкций все более широкое применение находит высокопрочная сталь С390 (S355 J2) с пределом текучести более 390 МПа. Отечественными металлургическими комбинатами освоен выпуск проката из этой стали в листах толщиной 16...100 мм. В соответствии с EN 10025-2:2004 она может поставляться как в нормализованном состоянии, так и после контролируемой прокатки. Сталь имеет следующий химический состав, мас. %: 0,14...0,17 С; 1,42...1,45 Мп; 0,18...0,25 Si; 0,06...0,09 Cr; 0,22...0,24 Ni; ≤ 0,06 Cu; 0,003...0,005 S; 0,013...0,019 P. Механические свойства этой стали характеризуются следующими показателями: $\sigma_T = 370...420$ МПа; $\sigma_B = 530...570$ МПа; $\delta_5 = 28...32$ %; $\psi = 52...68$ %, $KCV_{-20} = 110...210$ Дж/см².

В отечественной литературе сведений о формировании структуры и свойствах сварных соединений стали С390 в условиях дуговой сварки не имеется, что и явилось предметом исследований, изложенных в настоящей статье.

Было изучено влияние термических циклов сварки (ТЦС) на структуру и механические свойства металла ЗТВ сварных соединений стали С390, выполнена оценка их сопротивляемости образованию холодных трещин в зависимости от жесткости закрепления и содержания диффузионного водорода в наплавленном металле, определены механические свойства соединений, выполненных ручной дуговой и механизированной сваркой в защитном газе.

Для оценки влияния ТЦС на изменение микроструктуры и ударной вязкости металла ЗТВ сварных соединений использовали метод валиковых проб. Наплавку валиков на пластины разме-

ром 600×400×20 мм осуществляли автоматической сваркой под флюсом АН-60 проволокой Св-10НМА на режимах, обеспечивающих погонную энергию сварки $Q_{CB} = 16...54$ кДж/см. При этом скорость охлаждения металла ЗТВ в температурном интервале 600...500 °С ($w_{6/5}$) изменяли от 3 до 50 °С/с. Образцы для анализа структуры, измерения твердости и испытаний на ударный изгиб металла ЗТВ с острым (V-образным) надрезом вырезали в поперечном направлении по отношению к оси наплавки. Согласно ГОСТ 13585–68 надрезы располагали таким образом, что их вершины находились на границе сплавления в участке перегрева металла ЗТВ и на расстоянии 1,5 мм от границы сплавления (участок неполной перекристаллизации).

Данные о влиянии ТЦС на прочность и пластичность металла ЗТВ стали С390 были получены по результатам механических испытаний на статическое растяжение стандартных образцов (тип II по ГОСТ 6996–66). Они изготавливались из модельных образцов размерами 150×13×13 мм, которые в соответствии с ТЦС подвергали нагреву до температуры 1250 °С (скорость нагрева 150 °С/с), а затем охлаждали с разными скоростями. Условия остывания модельных образцов были подобраны таким образом, чтобы в температурном интервале 600...500 °С обеспечить скорость их охлаждения в диапазоне от 20 до 3 °С/с.

В ходе металлографических исследований установлено, что в исходном состоянии сталь характеризуется тонкодисперсной строчечной ферритно-перлитной структурой, в которой по всему объему аустенитного зерна равномерно распределены выделения структурно-свободного феррита (рис. 1, а). Анализ образцов, изготовленных из валиковых проб, показал, что в зависимости от скорости охлаждения сварных соединений стали S355 J2 структура и твердость металла ЗТВ может существенно изменяться. Основными составляющими структуры металла на участке перегрева металла ЗТВ соединений, которые охлажда-

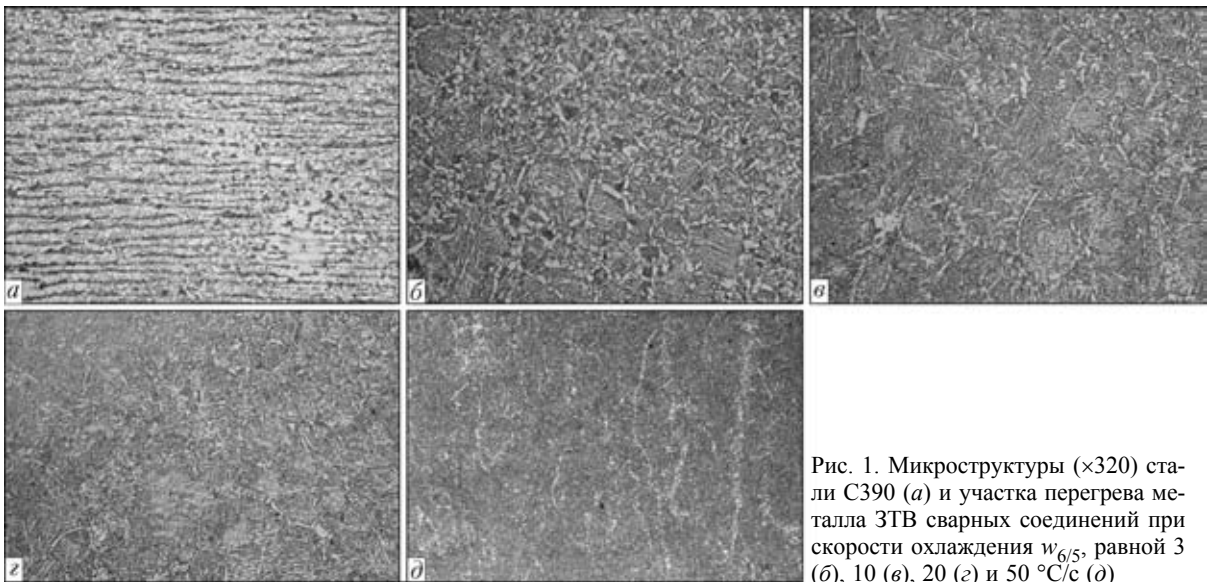


Рис. 1. Микроструктуры ($\times 320$) стали С390 (а) и участка перегрева металла ЗТВ сварных соединений при скорости охлаждения $w_{6/5}$, равной 3 (б), 10 (в), 20 (г) и 50 $^{\circ}\text{C}/\text{с}$ (д)

дались со скоростью $w_{6/5} = 3 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$, являются доэвтектоидный (по границам зерен) и неравноосный (внутри зерен) феррит, а также небольшое количество бейнита пластинчатой и глобулярной морфологии (рис. 1, б). По мере увеличения скорости охлаждения сварных соединений от 3 до 50 $^{\circ}\text{C}/\text{с}$ количество доэвтектоидного и неравноосного феррита в структуре уменьшается, а доля бейнита и дисперсность всех структурных составляющих увеличивается. Это обуславливает повышение твердости металла ЗТВ от $HV 150$ до $HV 220$ (рис. 2).

Как показали результаты испытаний образцов на статический разрыв, структурные изменения в металле ЗТВ, произошедшие под воздействием термических циклов сварки, оказывают влияние на его прочность и пластичность (рис. 3). При увеличении скорости охлаждения $w_{6/5}$ от 3 до 20 $^{\circ}\text{C}/\text{с}$ предел текучести металла на участке перегрева ЗТВ повышается по сравнению с исходным состоянием от 410 до 550 МПа, а предел прочности от 555 до 725 МПа. В то же время показатели его пластичности (относительное удлинение и относительное сужение) снижаются соответственно от 30 до 24 и от 75 до 62 %.

Под воздействием ТЦС изменяются и показатели ударной вязкости металла ЗТВ (рис. 4).

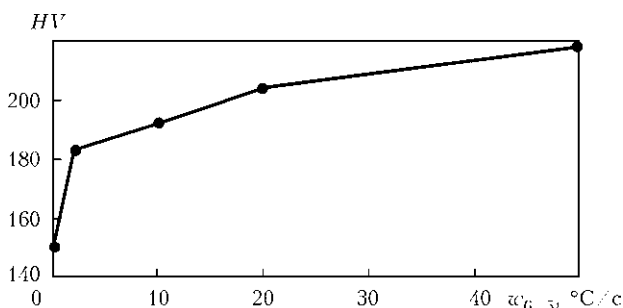


Рис. 2. Зависимость твердости металла ЗТВ от скорости охлаждения сварных соединений

Резкое их снижение наблюдается на участке перегрева металла ЗТВ при температуре испытаний $-40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (независимо от погонной энергии сварки), а при температуре испытаний 20 и $-20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ в том случае, когда скорость охлаждения $w_{6/5}$ находится ниже 20 $^{\circ}\text{C}/\text{с}$. Однако несмотря на это, ударная вязкость металла ЗТВ сварных соединений стали С390 остается на уровне требований, предъявляемых к основному металлу ($KCV_{-20} \geq 34 \text{ Дж}/\text{см}^2$).

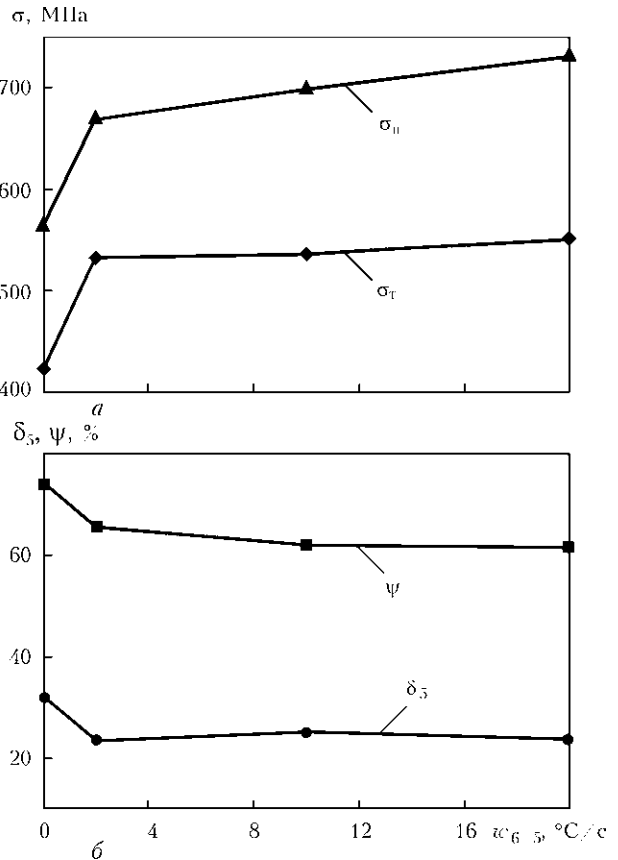


Рис. 3. Зависимость показателей прочности (а) и пластичности (б) на участке перегрева металла ЗТВ от скорости охлаждения модельных образцов

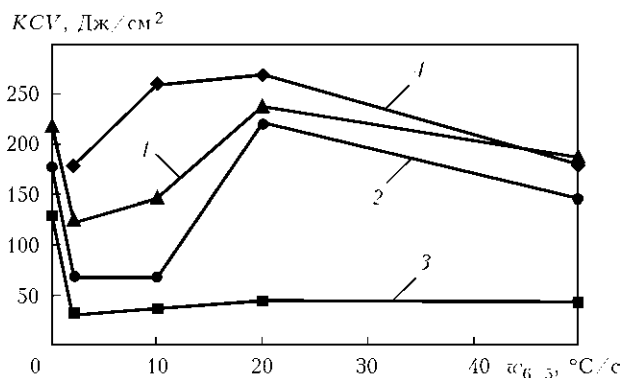


Рис. 4. Влияние скорости охлаждения на ударную вязкость участка перегрева (1–3) и неполной перекристаллизации (4) металла ЗТВ при температуре испытаний 20 (1), –20 (2, 4) и –40 °C (3)

С увеличением скорости охлаждения до 20 °C/с показатели хладостойкости металла ЗТВ на данном участке сварных соединений возрастают и приближаются к значениям ударной вязкости, полученным при испытании образцов, изготовленных из основного металла (рис. 4, $w_{6/5} = 0$ °C/с).

Ударная вязкость металла ЗТВ на участке неполной перекристаллизации независимо от погонной энергии сварки сохраняется на уровне основного металла, а в диапазоне скоростей охлаждения 10...20 °C/с даже выше этих значений (рис. 4, кривая 4).

Склонность стали С390 к замедленному разрушению в зависимости от содержания диффузионного водорода в наплавленном металле оценивали по методу Имплант [1]. Сопротивляемость образованию холодных трещин сварных соединений изучали по результатам испытания жесткозакрепленных на массивной плите стыковых соединений шириной 100 и 200 мм [2], а также технологических проб «жесткий тавр» [3]. Содержание диффузионного водорода $[H]_{диф}$ в наплавленном металле определяли методом карандашных проб с использованием в качестве запирающей жидкости смеси глицерина с дистиллированной водой.

При испытании по методу Имплант использовали образцы-вставки диаметром 6 мм, изготовленные из стали С390 толщиной 100 мм и вырезанные вдоль оси Z, с концентратором напряжений в виде винтового надреза. Сварку образцов, установленных в отверстиях закрепленной в испытательной установке базовой пластины толщиной 20 мм, выполняли электродами УОНИ-13/55 на режиме $I_{св} = 160$ А, $U_{д} = 25$ В, $v_{св} = 9,5$ м/ч. Скорость охлаждения металла ЗТВ варьировали путем изменения исходной температуры базовой пластины (использовали предварительный подогрев), а также регулированием погонной энергии сварки. Концентрацию диффузионного водорода в наплавленном металле изменяли с помощью электродов с различной влажностью покрытия.

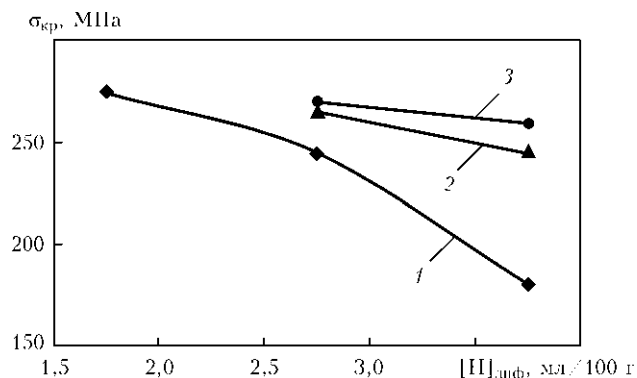


Рис. 5. Влияние диффузионного водорода в наплавленном металле и предварительного подогрева на стойкость стали С390 к замедленному разрушению: 1 — $T_{п.п} = 20$; 2 — 60; 3 — 90 °C

Нагружение образцов начинали при достижении после сварки температуры 150...100 °C. За показатель сопротивляемости сварных соединений образованию холодных трещин принимали критическое напряжение $\sigma_{кр}$, при котором образец не разрушался на протяжении 24 ч.

Технологические пробы из стали С390 толщиной 20 мм выполняли ручной дуговой сваркой электродами УОНИ-13/55 диаметром 4 мм, а также механизированной сваркой в CO_2 проволокой сплошного сечения Св-08Г2С и порошковой проволокой Megafil 821R диаметром 1,2 мм. Сварку осуществляли на режимах, обеспечивающих погонную энергию 11,0...12,5 (ручная дуговая сварка) и 14...17 кДж/см (механизированная сварка). Температуру предварительного подогрева проб $T_{п.п}$ варьировали от 20 до 90 °C, а содержание диффузионного водорода в наплавленном металле — от 1,0 до 5,3 мл/100 г.

По результатам испытаний образцов Имплант (рис. 5) установлено, что при малых концентрациях диффузионного водорода ($[H]_{диф} = 1,7$ мл/100 г) сталь С390 имеет низкую склонность к замедленному разрушению даже при сварке без предварительного подогрева ($\sigma_{кр} \approx 275$ МПа $\approx 0,7\sigma_T$ стали). Увеличение количества диффузионного водорода в наплавленном металле до 3,8 мл/100 г при аналогичных условиях сварки повышает вероятность образования холодных трещин в металле ЗТВ сварных соединений из данной стали ($\sigma_{кр}$ образцов не превышают 180 МПа $\approx 0,45\sigma_T$ стали). Уменьшить риск образования трещин в образцах при данной концентрации водорода возможно за счет предварительного их подогрева до температуры 90 °C (рис. 5, кривая 3).

Данные, полученные по результатам испытаний образцов Имплант, хорошо согласуются с результатами исследований технологических проб. Испытания последних показали, что в том случае, когда содержание диффузионного водорода в наплавленном металле не превышает 3 мл/100 г образование холодных трещин в технологических



Таблица 1. Результаты испытаний технологических проб

Тип соединения	Способ сварки	Сварочный материал	$Q_{св}$, кДж/см	$T_{п.п.}$, °C	$[H]_{диф}$, мл/100 г	Наличие трещин
Жесткий тавр	МАГ	Св-08Г2С	14,0	20	1,0	Нет
		Megafil 821R	17,0	20	3,0	»
	ММА	УОНИ-13/55	12,5	20	3,0	»
				20	5,3	Есть (100 %)
				60	5,3	Нет
Жесткозакрепленное стыковое соединение, $b = 100$ мм	МАГ	Св-08Г2С	15,0	20	1,0	»
		Megafil 821R	15,8	20	3,0	»
	ММА	УОНИ-13/55	14,0	20	3,0	»
				20	5,3	Есть (100 %)
				60	5,3	Нет
Жесткозакрепленное стыковое соединение, $b = 200$ мм		УОНИ-13/55	11,0	20	5,3	»

пробах сводится к минимуму даже при сварке без предварительного подогрева, если она выполняется при температуре окружающей среды выше 10 °C (табл. 1).

С увеличением содержания диффузионного водорода в наплавленном металле до 5,3 мл/100 г сварные соединения стали С390 становятся склонны к образованию холодных трещин. При сварке без предварительного подогрева трещины в технологических пробах «жесткий тавр» визуально наблюдались на поверхности швов через 2,5, а в жесткозакрепленных стыковых соединениях шириной 100 мм — через 4 ч после формирования соединений. Установлено, что при данной насыщенности швов диффузионным водородом повысить стойкость сварных соединений к образованию холодных трещин можно за счет их предварительного подогрева до температуры 60 °C. При таких условиях сварки трещины отсутствовали как в тавровых, так и в жесткозакрепленных стыковых соединениях.

Снизить риск образования холодных трещин в сварных соединениях стали С390 можно за счет уменьшения жесткости их закрепления, что подтверждают результаты испытания стыковых соединений шириной 100 и 200 мм. Они показали,

что, увеличив базу закрепления b , т. е. ширину соединений, и снизив тем самым в них уровень остаточных напряжений с 350 до 230 МПа, исключить образование холодных трещин в технологических пробах удалось даже в том случае, когда содержание $[H]_{диф}$ в наплавленном металле составляло 5,3 мл/100 г, а сварку осуществляли без предварительного подогрева.

С учетом выбранных условий сварки были выполнены стыковые соединения стали С390 толщиной 16 и 20 мм с V-образной разделкой и толщиной 50 мм с X-образной разделкой кромок (С17 и С25 по ГОСТ 14771–76). Сварку соединений проводили без предварительного подогрева традиционно применяющимися для этого класса сталей электродами УОНИ-13/55 диаметром 4 мм и проволокой Св-08Г2С диаметром 1,2 мм в CO_2 и смеси газов (80 % Ar + 20 % CO_2), а также порошковой проволокой марки Megafil 821R диаметром 1,2 мм в CO_2 . Режимы сварки обеспечивали значения погонной энергии, указанные в табл. 2. Там же приведены результаты механических испытаний образцов из металла швов на статическое растяжение, из сварных соединений — на статический разрыв и загиб, а также на ударный изгиб. Круглый и острый надрез на об-

Таблица 2. Механические свойства металла швов и сварных соединений стали С390

Способ сварки	Условие сварки	$Q_{св}$, кДж/см	Металл шва						
			σ_r , МПа	σ_b , МПа	δ_5 , %	ψ , %	KCV , Дж/см ² , при t , °C		
							20	-40	-20
МАГ	Св-08Г2С, Ar + CO_2 , $\delta = 16$ мм	14	—	—	—	—	240	90	—
	Св-08Г2С, Ar + CO_2 , $\delta = 50$ мм	14	—	—	—	—	—	60	—
ММА	УОНИ-13/55, $\delta = 20$ мм	11	497	596	29	75	166	44	30
МАГ	Св-08Г2С, CO_2 , $\delta = 20$ мм	15	522	601	27,3	71	105	39	24
	Megafil 821R, CO_2 , $\delta = 20$ мм	16	491	605	27,1	62,6	135	61	35



Окончание табл. 2

Способ сварки	Условие сварки	Сварное соединение						
		σ_b , МПа	$\alpha_{заг}$, град	KCU		KCV		
				Дж/см ² , при t, °C				
				20	-40	20	-20	-40
МАГ	Св-08Г2С, Аг + CO ₂ , $\delta = 16$ мм	543	81	205	197	208	197	—
	Св-08Г2С, Аг + CO ₂ , $\delta = 50$ мм	569	65	—	101	—	70	—
ММА	УОНИ-13/55, $\delta = 20$ мм	—	—	—	—	106	—	70
МАГ	Св-08Г2С, CO ₂ , $\delta = 20$ мм	—	—	—	—	248	—	166
	Megafil 821R, CO ₂ , $\delta = 20$ мм	—	—	—	—	219	—	140

разцы для ударных испытаний наносили по оси шва и по линии сплавления, а сами испытания проводили при температурах от 20 до -40 °C.

Результаты механических испытаний свидетельствуют, что показатели прочности и пластичности металла швов сварных соединений стали С390, выполненные указанными материалами, сопоставимы с аналогичными характеристиками основного металла и отвечают предъявляемым к ним требованиям. Ударная вязкость металла шва таких соединений также находится на высоком уровне и удовлетворяет требованиям не только отечественных стандартов ($KCU_{-40} \geq 29$ Дж/см²), но и евроном ($KV_{-20} \geq 27$ Дж или $KCV_{-20} \geq 34$ Дж/см²).

Выводы

1. В исходном состоянии сталь С390 характеризуется тонкодисперсной строчечной ферритно-перлитной структурой, что обеспечивает ей высокую пластичность и ударную вязкость.

2. Под воздействием ТЦС на участке перегрева металла ЗТВ формируется ферритно-бейнитная структура. По мере повышения скорости охлаждения $w_{6/5}$ от 3 до 50 °C/с количество феррита в структуре уменьшается, а доля бейнита и дисперсность всех структурных составляющих увеличивается.

Influence of thermal cycles of welding on the change of structure and mechanical properties of HAZ metal of welded joints on С390 (S355 J2) steel was studied. The range of admissible rates of HAZ metal cooling in the temperature range of 600...500 °C was established, and welding consumables were selected which ensure welded joint properties on the level of requirements to base metal, as well as their high resistance to cold cracking.

3. Прочностные показатели металла ЗТВ сварных соединений стали С390 по отношению к основному металлу повышаются, а пластичность и ударная вязкость снижаются, но остаются на уровне требований, предъявляемых к прокату. Наиболее заметное уменьшение показателей ударной вязкости наблюдается при $w_{6/5} < 20$ °C/с.

4. Сварные соединения стали С390 отличаются высокой сопротивляемостью образованию холодных трещин при условии, если содержание диффузионного водорода в наплавленном металле не превышает 3 мл/100 г.

5. Требуемые механические свойства сварных соединений стали С390 достигаются с использованием традиционно применяемых для сварки сталей этого класса прочности материалов: электродов УОНИ-13/55 и проволоки Св-08Г2С.

1. Гривняк И. Свариваемость сталей: Пер. со слов. Л. С. Гончаренко / Под ред. Э. Л. Макарова. — М.: Машиностроение, 1984. — 216 с.
2. Риск образования холодных трещин при сварке конструкционных высокопрочных сталей / В. И. Махненко, В. Д. Позняков, Е. А. Великоиваненко и др. // Автомат. сварка. — 2009. — № 12. — С. 5–10.
3. Позняков В. Д. Механические свойства металла швов и сопротивляемость образованию холодных трещин тавровых соединений стали 13ХГМРБ // Там же. — 2008. — № 2. — С. 20–25.

Поступила в редакцию 18.04.2012