



## МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛА ШВОВ И СОПРОТИВЛЯЕМОСТЬ ОБРАЗОВАНИЮ ХОЛОДНЫХ ТРЕЩИН ТАВРОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТАЛИ 13ХГМРБ

В. Д. ПОЗНЯКОВ, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Выполнена оценка влияния состава наплавленного металла на механические свойства однопроходных угловых швов тавровых соединений высокопрочной легированной стали 13ХГМРБ и сопротивляемости их замедленному разрушению в зависимости от концентрации водорода, погонной энергии сварки и состава защитной среды. Показано, что наиболее высокая сопротивляемость таким соединениям образованию холодных трещин наблюдается при сварке в углекислом газе, выполненной низколегированной проволокой Св-08Г2С диаметром 1,6...2,0 мм с предварительным подогревом до 60 °С и ограниченном (до 3,5 мл/100 г) содержании диффузионного водорода в швах.

*Ключевые слова:* дуговая сварка, защитные газы, высокопрочная сталь, тавровые соединения, механические свойства, холодные трещины, скорость охлаждения, предварительный подогрев, диффузионный водород

В конструкциях, изготовляемых из листовых высокопрочных легированных сталей ( $\sigma_{0,2} = 590...690$  МПа) толщиной до 20 мм, значительную часть (около 70 %) сварных соединений составляют тавровые с угловыми швами. В большинстве случаев они должны иметь механические свойства на уровне основного металла. Распространенными и опасными дефектами таких соединений являются холодные трещины в металле шва (МШ) и зоне термического влияния (ЗТВ) [1].

Обычно рекомендации по выбору сварочных материалов, параметров режимов сварки и температуры предварительного подогрева для выполнения угловых швов основаны на результатах испытаний стыковых соединений. Однако известно, что условия формирования структуры, а также механические свойства металла угловых и стыковых швов в ряде случаев существенно отличаются. Прежде всего это связано с тем, что отвод тепла в тавровых соединениях в отличие от стыковых происходит не в двух, а в трех направлениях, соответственно скорость охлаждения таких соединений при подобных режимах сварки будет увеличиваться [2].

Настоящая работа посвящена оценке механических свойств и сопротивляемости замедленно-

му разрушению тавровых соединений высокопрочной стали с однопроходными угловыми швами, выполненными различными по легированию сварочными проволоками.

Исследования проводили на листовом прокате стали 13ХГМРБ толщиной 12 и 20 мм следующего химического состава, мас. %: 0,128...0,132 С; 0,20...0,22 Si; 0,87...0,91 Mn; 1,4...1,5 Cr; 0,12...0,14 Ni; 0,42...0,45 Mo; S ≤ 0,022, P ≤ 0,020; 0,0011...0,0015 В. В состоянии поставки (после закалки и последующего отпуска) сталь имеет такие механические свойства:  $\sigma_{0,2} \geq 588$  МПа;  $\sigma_B \geq 686$  МПа;  $\delta_5 \geq 14$  %;  $KCU^{70} \geq 29$  Дж/см<sup>2</sup>. В качестве базовых сварочных материалов применяли проволоки сплошного сечения диаметром 1,6 мм марок Св-08Г2С, Св-10ХГ2СМА и Св-08ХН2Г2СМЮ (табл. 1). В отдельных случаях при исследовании использовали проволоки диаметром 1,2 и 2,0 мм.

Механические свойства и ударную вязкость металла исследуемых швов оценивали по результатам испытаний стандартных образцов, изготовленных из тавровых и специальных стыковых соединений, представленных на рис. 1 [1]. Конструкция этих соединений позволяет имитировать условия сварки угловых швов. Для этого кромки соединяемых пластин формировали под углом 45° до получения размера фаски, равного катетам исследуемых швов ( $k = 8$  мм). Из угловых швов тавровых соединений изготовляли цилиндрические образцы диаметром

Таблица 1. Химический состав (мас. %) сварочных проволок

Марка проволоки	С	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Al	S	P
Св-08Г2С	0,080	0,79	1,71	—	—	—	—	0,022	0,025
Св-10ХГ2СМА	0,084	0,73	1,95	0,95	—	0,49	—	0,021	0,023
Св-08ХН2Г2СМЮ	0,078	0,58	1,66	0,87	2,3	0,47	0,086	0,024	0,022

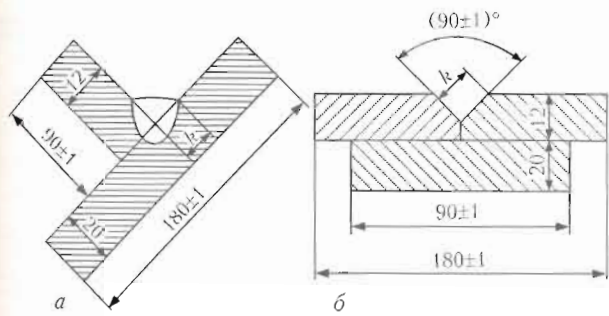


Рис. 1. Схема тавровых (а) и стыковых с подкладкой (б) соединений стали 13ХГМРБ

3 мм (тип I по ГОСТ 6996-66), а из стыковых — образцы размером 10X5X55 мм (тип VII). Механизированную сварку указанных образцов выполняли в углекислом газе на следующем режиме:  $I_{св} = 290...300$  А,  $U_{д} = 32...34$  В,  $v_{св} = 13...14$  м/ч. Химический состав МШ приведен в табл. 2.

В результате активного перемешивания расплавленных электродного и основного металлов швы, выполненные проволокой Св-08Г2С, дополнительно легируются такими элементами, как хром и молибден. За счет этого показатели их прочности возрастают от  $\sigma_{0,2} = 375...405$  МПа и  $\sigma_{в} = 500...532$  МПа (значения, характерные для наплавленного металла) до  $\sigma_{0,2} = 634...693$  МПа,  $\sigma_{в} = 781...802$  МПа (уровень стали 13ХГМРБ), а пластичность снижается от  $\delta_5 = 24,2...26,3$  до  $16,3...16,7$  %. Значения ударной вязкости металла таких швов ( $KCU^{-70} = 33...46$  Дж/см<sup>2</sup>) вполне удовлетворяют требованиям, предъявляемым к основному металлу и сопоставимы с хладостойкостью сварных швов, выполненных сваркой с использованием проволоки Св-10ХГ2СМА ( $KCU^{-70} = 30...41$  Дж/см<sup>2</sup>) и Св-08ХН2Г2СМЮ ( $KCU^{-70} = 44...49$  Дж/см<sup>2</sup>). Учитывая данный факт, проволока Св-08Г2С может быть рекомендована для сварки высокопрочных легированных сталей с  $\sigma_{0,2} \leq 620$  МПа при выполнении однопроходных угловых швов с катетом до 8 мм. Поскольку прочностные показатели таких швов ниже, чем у выполненных сварочными проволоками Св-10ХГ2СМА и Св-08ХН2Г2СМЮ (соответственно  $\sigma_{0,2} = 748...776$  МПа,  $\sigma_{в} = 852...870$  МПа и  $\sigma_{0,2} = 890...910$  МПа,  $\sigma_{в} = 1000...1020$  МПа), можно предположить, что они будут отличаться более высокой сопротивляемостью образованию холодных трещин.

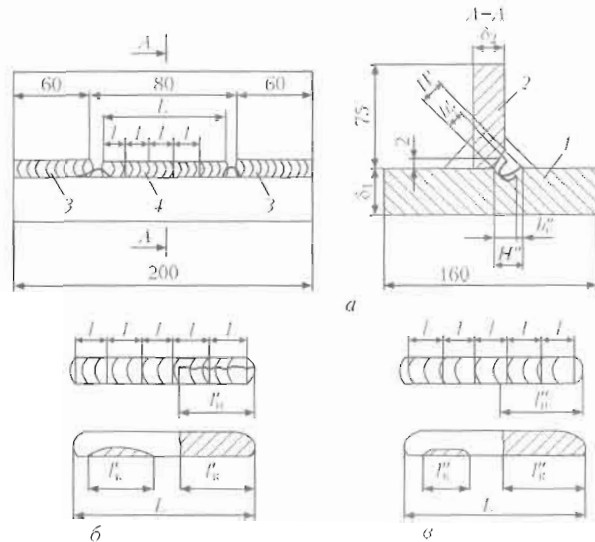


Рис. 2. Схема таврового образца для оценки сопротивляемости угловых швов образованию холодных трещин (а) и схемы для определения протяженности трещины в тавровом образце на поверхности (МЦ<sub>н</sub>), в сечении (МЦ<sub>с</sub>) и корне шва (МЦ<sub>к</sub>) (б), а также на поверхности (ЗТВ<sub>н</sub>), сечении (ЗТВ<sub>с</sub>) и корне (ЗТВ<sub>к</sub>) ЗТВ полки (в) (остальные обозначения см. в тексте)

Сопротивляемость соединений с угловыми швами образованию холодных трещин оценивали по результатам испытания специальных технологических проб из стали 13ХГМРБ, прототипом для создания которых служила проба Теккен, при этом использовали жесткозакрепленные тавровые образцы с полкой 1 толщиной  $\delta_1 = 20$  мм и стенкой 2 с  $\delta_2 = 12$  мм (рис. 2, а). Конструктивные размеры пробы выбирали таким образом, чтобы имитировать наиболее неблагоприятные условия выполнения однопроходных угловых швов: значительную разнотолщинность стенки и полки ( $\delta_2/\delta_1 = 0,6$ ). Пробы собирали и с двух сторон соединяли связующими швами 3 с катетом 15...16 мм таким образом, чтобы в месте нахождения испытываемого шва 4 между стенкой и полкой оставался зазор шириной 2 мм. Испытуемый шов длиной 75...76 мм выполняли на заданном режиме механизированной сваркой в защитном газе. В начале и конце этого шва оставляли недоваренными до связующих швов участки длиной 2...3 мм. Скорость охлаждения проб регулировали путем изменения температуры их предварительного подогрева. Термический цикл нагрева и охлаждения образцов фиксировали в центральной их части (со стороны полки) на участке ЗТВ, нагретом до 1150...1250 °С. Температуру изме-

Таблица 2. Химический состав (мас. %) МШ сварных соединений стали 13ХГМРБ

Марка проволоки	С	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Al	S	P
Св-08Г2С	0,092	0,42	1,30	0,58	—	0,18	—	0,023	0,022
Св-10ХГ2СМА	0,090	0,57	1,25	0,84	—	0,34	—	0,021	0,023
Св-08ХН2Г2СМЮ	0,094	0,38	1,49	1,13	1,97	0,41	0,018	0,023	0,024



ряли хромель-алюмелевыми термопарами диаметром 0,5 мм, при этом вели запись данных на осциллографе Н 117/1.

Трещины в сварных соединениях выявляли двумя путями — регистрацией сигналов акустической эмиссии [3] после остывания образцов до температуры ниже 100 °С и исследованием поверхности макро- и микрошлифов, вырезанных из конт-

рольного участка сварных соединений в поперечном по отношению к оси шва направлении через 10 сут после окончания сварки.

Как показали исследования, наиболее часто трещины появлялись в тавровых сварных соединениях со стороны полки и развивались либо по шву, либо по околошовной зоне (ОШЗ). Поэтому при их анализе отдельно фиксировали наличие трещин в МШ и ЗТВ. При этом регистрировали их протяженность в процентном отношении к общей длине контрольного шва в его корневой части (МШ<sub>к</sub>, ЗТВ<sub>к</sub>), среднем сечении (МШ<sub>с</sub>, ЗТВ<sub>с</sub>) и на поверхности (МШ<sub>п</sub>, ЗТВ<sub>п</sub>) (рис. 2, б, в):

$$\begin{aligned} \text{МШ}_к &= \frac{\sum l'_к}{L} \cdot 100\%; \text{МШ}_с = \frac{\sum h'_с}{H'} \cdot 100\%; \text{МШ}_п = \frac{\sum l''_п}{L} \cdot 100\%, \\ \text{ЗТВ}_к &= \frac{\sum l''_к}{L} \cdot 100\%; \text{ЗТВ}_с = \frac{\sum h''_с}{H''} \cdot 100\%; \text{ЗТВ}_п = \frac{\sum l''_п}{L} \cdot 100\%, \end{aligned}$$

где  $L$  — длина испытуемого шва, мм;  $\sum l'_п$ ,  $\sum l'_к$  — сумма длины трещин соответственно на поверхности МШ и в корне шва, мм;  $\sum h'_с$  — сумма длины трещин в сечении шва, мм;  $\sum l''_п$ ,  $\sum l''_к$  — сумма длины трещин соответственно на поверхности и в корне ЗТВ, мм;  $\sum h''_с$  — сумма длины трещин в сечении ЗТВ полки, мм;  $H'$  — высота шва, мм;  $H''$  — катет шва на полке, мм;  $h'_с$ ,  $h''_с$  — протяженность трещины по высоте соответственно шва и ЗТВ.

В литературе имеется достаточно много информации об отрицательном влиянии водорода на сопротивляемость образованию холодных трещин сварных соединений из высокопрочных сталей [4–10]. Однако авторы работы [11] получили данные о том, что диффузионный водород оказывает второстепенное влияние на интенсивность растрескивания угловых соединений низколегированных сталей повышенной прочности. В связи с этим представлялось целесообразным изучить, в какой мере водородный фактор влияет на процесс трещинообразования тавровых соединений исследуемой высокопрочной стали.

Таблица 3. Режимы получения угловых соединений с  $k = 8$  мм

Защитный газ	Диаметр проволоки, мм	$I_{св}$ , А	$U_{д}$ , В	$v_{св}$ , м/ч	$Q_{св}$ , кДж/см
CO <sub>2</sub>	1,2	180...190	26...28	9,0	15,2
	1,6	280...300	30...32	14,6	17,7
	2,0	330...350	32...34	16,0	18,3
78 % Ar + 22 % CO <sub>2</sub>	1,6	280...300	28...30	14,6	17,5

Изменение концентрации водорода в наплавленном металле регулировали путем специальной подготовки углекислого газа. Минимальная концентрация диффузионного водорода в металле исследуемых швов составляла 3,1 мл/100 г (анализ его содержания проведен хроматографическим методом [12]) и была достигнута путем выдержки на протяжении 48 ч баллонов с углекислым газом в перевернутом вентилем вниз положении с последующим стравливанием увлажненного газа. Стабильную более высокую концентрацию водорода в МШ ( $[H]_{диф} = 18$  мл/100 г) обеспечивали путем пропускания углекислого газа через емкость с водой.

Для оценки влияния химического состава МШ, насыщенного водородом, на сопротивляемость тавровых соединений стали 13ХГМРБ образованию холодных трещин использовали сварочные проволоки марок Св-08Г2С, Св-10ХГ2СМА и Св-08ХН2Г2СМЮ диаметром 1,6 мм. Сварку образцов осуществляли в углекислом газе на режимах, приведенных в табл. 3.

Как показали исследования, во всех образцах, сваренных без предварительного подогрева, наблюдались холодные трещины (рис. 3). В технологических пробах, сваренных без предварительного подогрева проволоками Св-08ХН2Г2СМЮ и Св-10ХГ2СМА, при  $[H]_{диф} = 18$  мл/100 г сигналы акустической эмиссии, свидетельствующие о зарождении трещин, регистрировали при температуре сварного соединения около 100 °С, т. е. непосредственно после установки датчиков на образцы. Через 25...30 мин после окончания сварки трещины появились на поверхности швов. В пробах, сварку которых осуществляли при аналогичных условиях, но с использованием проволоки Св-08Г2С, первые сигналы акустической эмиссии фиксировались несколько позже — через 20...22 мин после окончания сварки. Развитие образовавшейся трещины было менее интенсивным. В течение длительного времени она распространялась в сварном соединении и лишь по истечении 20 ч была обнаружена на поверхности образца. Чтобы при такой концентрации диффузионного водорода в наплавленном металле исключить появление трещин в образцах, потребовалось их предварительно подогреть до температуры 120 °С в случае использования проволок Св-08Г2С и Св-

ий с  $k = 8 \text{ мм}$

$Q_{св}$ , кДж/см	$Q_{св}$ , кДж/см
15,2	
17,7	
18,3	
17,5	

в наплав-  
специальной  
льная кон-  
металле ис-  
0 г (анализ  
афическим  
м выдержк  
глекислым  
положении  
енного га-  
трацию во-  
еспечивали  
через ем-

става МШ,  
ивляемость  
образова-  
сварочные  
СМА и Св-  
рку образ-

режимах,  
образцах,  
рева, наб-

В техно-  
варитель-  
12Г2СМЮ  
100 г сиг-  
ствующие  
при тем-  
00 °С, т. е.  
ков на об-  
ия сварки  
ов. В про-  
аналогич-  
проволоки  
й эмиссии  
— через  
витие об-  
нсивным.  
спростра-  
по исте-  
ности об-  
ффузион-  
сключить  
залось их  
ры 120 °С  
2С и Св-

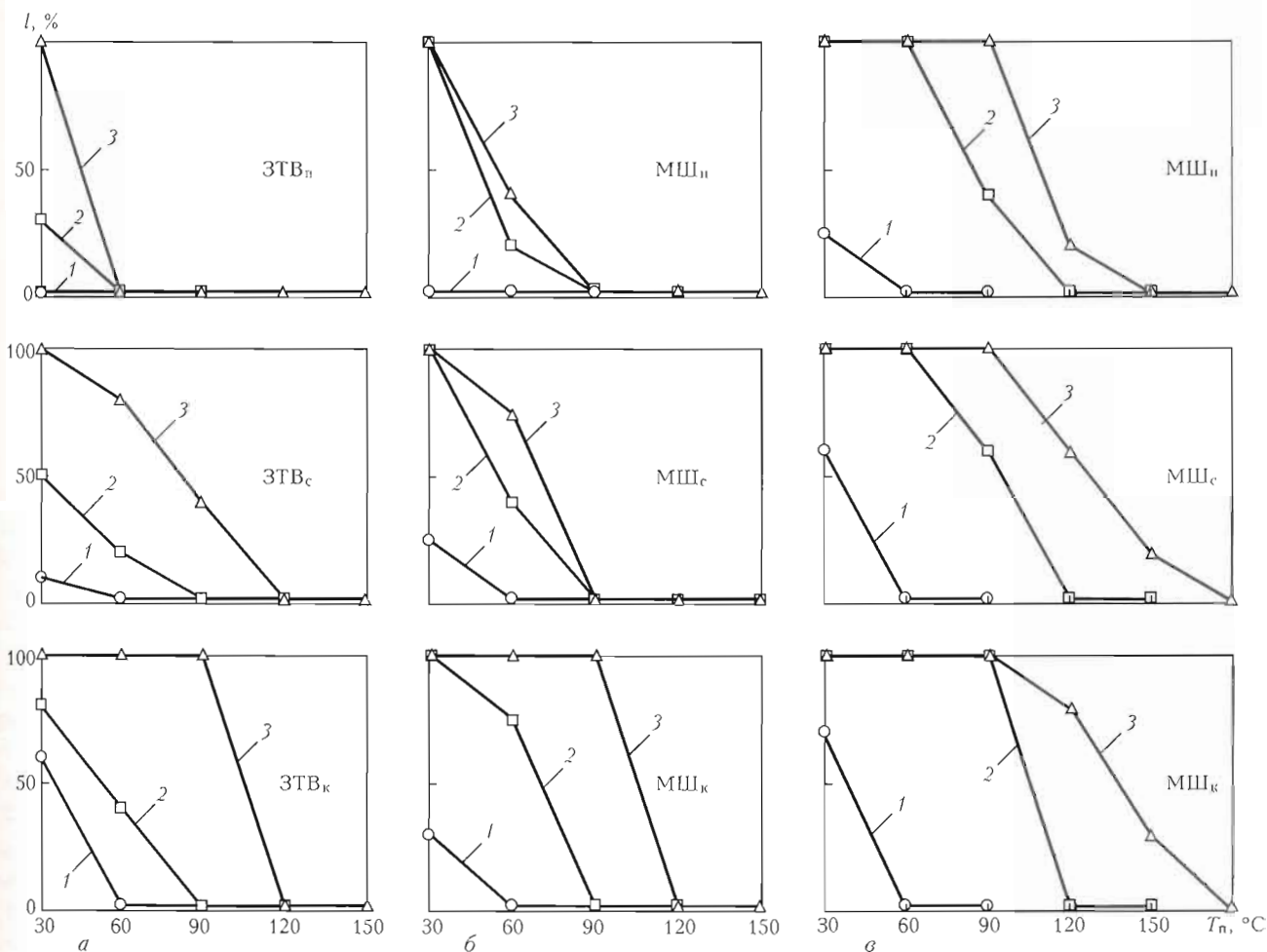


Рис. 3. Зависимость протяженности трещины  $l$  от температуры предварительного подогрева  $T_n$  тавровых образцов, сваренных в углекислом газе проволоками Св-08Г2С (а), Св-10ХГ2СМА (б) и Св-08ХН2Г2СМЮ (в), при разной концентрации диффузионного водорода в наплавленном металле: 1 —  $[H]_{диф} = 3$ ; 2 — 10; 3 — 18 мл/100 г

10ХГ2СМА и до 180 °С при сварке проволокой Св-08ХН2Г2СМЮ.

Снижение содержания диффузионного водорода в металле угловых швов до 3,1 мл/100 г позволило существенно повысить сопротивляемость тавровых соединений стали 13ХГМРБ образованию холодных трещин. При этом первые сигналы акустической эмиссии во всех случаях фиксировались только после полного охлаждения образцов. Трещины в образцах, как правило, распространялись на протяжении нескольких суток и на поверхность шва выходили только при сварке проволокой Св-08ХН2Г2СМЮ. Полностью исключить их образование можно лишь при предварительном подогреве проб до 60 °С.

Анализ полученных результатов показал, что при возрастании концентрации водорода от 3,1 до 18 мл/100 г в МШ, выполненном в углекислом газе проволоками Св-08Г2С и Св-10ХГ2СМА, критическая температура подогрева, при которой в корне шва отсутствуют трещины, повышается в среднем на 60 °С, а при использовании проволоки Св-08ХН2Г2СМЮ при тех же условиях — на 120 °С. Следовательно, с повышением степени

легирования металла углового шва и скорости охлаждения тавровых соединений высокопрочной стали отрицательное влияние водорода усиливается. Обращает на себя внимание тот факт, что при использовании легированных проволок марок Св-08ХН2Г2СМЮ и Св-10ХГ2СМА, т. е. в тех случаях, когда прочность МШ существенно выше прочности основного металла, трещины зарождались и развивались исключительно по шву. В случае, если при сварке проволокой Св-08Г2С эти показатели в МШ и основном металле сопоставимы, трещины образовывались в ЗТВ. Очевидно, это связано с особенностями формирования напряженно-деформированного состояния в таких соединениях и разной подвижностью водорода в МШ [13].

С учетом установленной зависимости влияния водорода на сопротивляемость тавровых соединений стали 13ХГМРБ образованию холодных трещин при дальнейших исследованиях, целью которых являлась оценка воздействия на этот процесс погонной энергии сварки  $Q_{св}$  и защитной среды, уровень концентрации  $[H]_{диф}$  в наплавленном металле ограничивали до 3,0...3,5 мл/100 г.

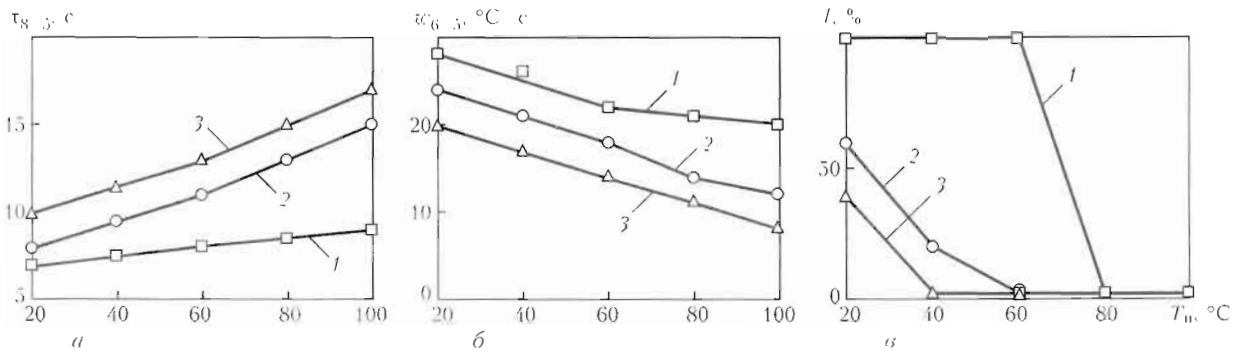


Рис. 4. Влияние предварительного подогрева на продолжительность охлаждения от 800 до 500 °С (а), скорость охлаждения от 600 до 500 °С (б) и протяженность трещин в корне шва (в) технологических проб, сваренных с использованием проволоки Св-08Г2С диаметром 1,2 (1), 1,6 (2) и 2,0 мм (3) в углекислом газе

В качестве базового сварочного материала при выполнении таких работ была принята проволока марки Св-08Г2С, поскольку она, на наш взгляд, наиболее приемлема для сварки однопроходных угловых швов с катетом до 8 мм.

При сварке соединений с угловыми швами используют проволоки диаметром 1,2, 1,6 и 2,0 мм. В зависимости от этого  $Q_{\text{св}}$  может изменяться от 15,2 до 18,3 кДж/см. Обычно диаметр проволоки выбирают в зависимости от газовой защиты, толщины свариваемого металла и других условий. В данном случае диаметр сварочной проволоки выбирали с учетом необходимости изменения погонной энергии сварки, которая влияет на сопротивляемость тавровых соединений образованию холодных трещин. Катет шва в процессе таких исследований практически не изменялся. Однако с повышением  $Q_{\text{св}}$  увеличивалась глубина проплавления основного металла и изменялись условия охлаждения ЗТВ сварных соединений.

При сварке тавровых соединений в углекислом газе сварочной проволокой диаметром 1,2 мм ( $Q_{\text{св}} = 15,2$  кДж/см) ЗТВ соединений образцов охлаждается достаточно интенсивно. Даже при подогреве до 100 °С время охлаждения металла, нагретого выше точки  $A_{\text{с3}}$ , в интервале температур от 800 до 500 °С ( $\tau_{8/5}$ ) увеличивается незначительно (от 7 до 9 с), а скорость охлаждения в интервале температур от 600 до 500 °С ( $w_{6/5}$ )

уменьшается с 28 до 20 °С/с (рис. 4, а, б). Казалось бы, незначительное повышение погонной энергии сварки при использовании проволоки диаметром 2,0 мм позволяет существенно замедлить процесс охлаждения сварных соединений. При этом даже при сварке без подогрева значения  $\tau_{8/5}$  увеличиваются до 10 с, а при нагреве образцов до температуры 100 °С — еще на 7 с. По-видимому, отмеченные закономерности в изменении условий охлаждения сварных соединений, выполненных проволоками различного диаметра, связаны не только с повышением погонной энергии сварки при использовании проволоки диаметром 2,0 мм, но и с увеличением плотности тока. Как видно из рис. 4, б, замедление скорости охлаждения, наблюдаемое при сварке проволоками большего диаметра, способствует существенному повышению сопротивляемости сварных соединений образованию холодных трещин. Даже незначительный подогрев до 40 и 60 °С позволяет полностью исключить образование трещин в образцах. Достичь такого же результата при использовании проволоки диаметром 1,2 мм удастся лишь при их подогреве до 100 °С. Поэтому угловые швы с  $k = 6...8$  мм целесообразно выполнять с использованием проволок диаметром 1,6...2,0 мм. При этом погонная энергия сварки возрастает до 17,7...18,3 кДж/см, замедляется охлаждение ЗТВ

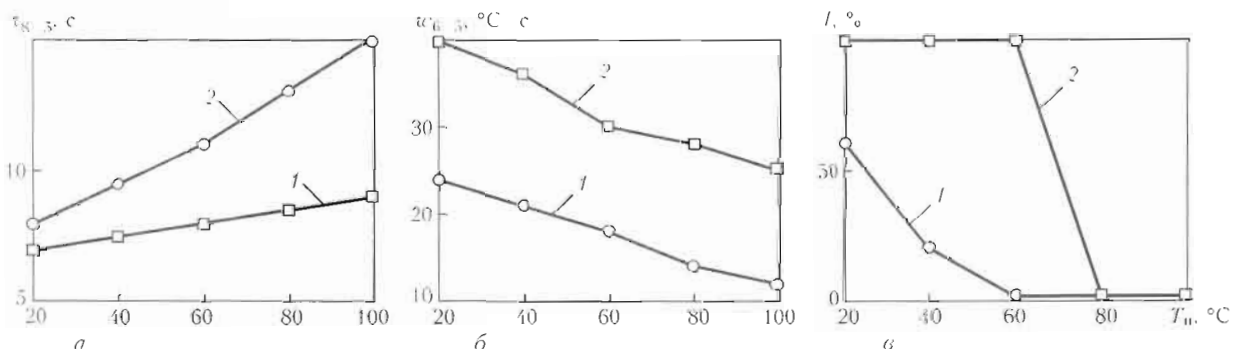


Рис. 5. Влияние предварительного подогрева на продолжительность охлаждения от 800 до 500 °С (а), скорость охлаждения от 600 до 500 °С (б) и протяженность трещин в корне шва (в) технологических проб, сваренных с использованием проволоки Св-08Г2С в углекислом газе (1) и смеси газов на основе аргона (2)

и, как следствие, повышается ее сопротивляемость образованию холодных трещин.

При оценке влияния на процесс трещинообразования тавровых соединений высокопрочной стали защитного газа сварку образцов осуществляли проволокой Sv-08Г2С диаметром 1,6 мм в углекислом газе и смеси газов на основе аргона (78 % Ar + 22 % CO<sub>2</sub>). Результаты исследований свидетельствуют о том, что при выбранных условиях сварки для предупреждения образования холодных трещин в соединениях, выполненных в смеси газов, потребовалось на 30...40 °С повысить температуру предварительного подогрева образцов по сравнению со сваркой в углекислом газе (рис. 5, а). Это связано с различиями в скоростях охлаждения металла ОШЗ тавровых соединений, полученных в углекислом газе и смеси (рис. 5, б, в). Несмотря на то, что при выполнении данных исследований режимы сварки использовали достаточно близкие (погонная энергия  $Q_{св} = 17,5...17,7$  кДж/см), интенсивность охлаждения образцов, сваренных в смеси газов, была выше. Известно, что сварка в углекислом газе характеризуется более интенсивным нагревом и расплавлением металла, чем в смеси газов на основе аргона [14]. Это обстоятельство, вероятно, и определило различия в скорости охлаждения и сопротивляемости образованию трещин тавровых соединений, выполненных в углекислом газе и смеси 78 % Ar + 22 % CO<sub>2</sub>. Поэтому при изменении состава защитной среды температуру предварительного подогрева соединений следует выбирать по результатам испытаний специальных технологических проб.

В целом результаты выполненных исследований свидетельствуют о том, что при сварке однопроходных угловых швов с катетом до 8 мм необходимо обеспечивать минимальную концентрацию водорода ( $[H]_{диф} \leq 3,5$  мл/100 г) в МШ и выбирать такие условия охлаждения соединений, при которых максимальная скорость охлаждения

ЗТВ не превышает допустимого значения для конкретных марок высокопрочных сталей.

Таким образом становится очевидным, что на сопротивляемость тавровых соединений высокопрочной стали 13ХГМРБ оказывают влияние состав наплавленного металла, концентрация в нем диффузионного водорода и температура предварительного подогрева.

1. Денис А. Е., Иващенко Г. А. Повышение прочности сварных конструкций. — Киев: Наук. думка, 1985. — 256 с.
2. Миходуй Л. И., Позняков В. Д., Юценко К. А. Сопротивляемость замедленному разрушению сварных соединений стали 12ХН2МФДРА // Автомат. сварка. — 2000. — № 11. — С. 5–10.
3. Мусияченко В. Ф., Жданов С. Л. Применение акустического эмиссионного метода при исследовании процесса образования холодных трещин в сварном соединении высокопрочной стали // Диагностика и прогнозирование разрушения сварных конструкций. — 1987. — Вып. 5. — С. 73–77.
4. Касаткин О. Г. Особенности водородного охрупчивания высокопрочных сталей при сварке (Обзор) // Автомат. сварка. — 1994. — № 1. — С. 3–7.
5. Мусияченко В. Ф. Свариваемость и технология сварки высокопрочных сталей. — Киев: Наук. думка, 1983. — 68 с.
6. Макаров Э. Л. Холодные трещины при сварке легированных сталей. — М.: Машиностроение, 1981. — 248 с.
7. Гривьяк И. Свариваемость сталей. — М.: Машиностроение, 1984. — 216 с.
8. Походня И. К., Швачко В. И. Физическая природа обусловленных водородом холодных трещин в сварных соединениях конструкционных сталей // Автомат. сварка. — 1997. — № 5. — С. 3–10.
9. Hart P. H. M. Resistance to hydrogen cracking in steel weld metals // Welding J. — 1986. — № 1. — P. 14–22.
10. Cold cracking in weldments of steel S 690 QT / B. Alexandrov, K. Theis, M. Streitenberger et al. — В. 1., [2004]. — 16 p. — (Intern. Inst. Of Welding; Doc. IX-2115-04).
11. Nishimura I., Chiba N. Cracking in welded corner joints // Metal Construction. — 1984. — № 1. — P. 30–34.
12. Походня И. К., Пальцевич А. П. Хроматографический метод определения количества диффузионного водорода в сварных швах // Автомат. сварка. — 1980. — № 1. — С. 37–39.
13. Миходуй Л. И., Позняков В. Д., Жданов С. Л. Замедленное разрушение тавровых соединений высокопрочных сталей // Там же. — 1998. — № 10. — С. 14–19.
14. Потатьевский А. Г. Сварка в защитных газах плавящимся электродом. — М.: Машиностроение, 1974. — 240 с.

Effect of composition of the deposited metal on mechanical properties of one-pass fillet welds in T-joints on high-strength alloyed steel 13KhGMRB, and resistance of these joints to delayed fracture depending upon the hydrogen concentration, welding heat input and shielding atmosphere composition have been evaluated. It is shown that the highest resistance of such joints to cold cracking is observed in CO<sub>2</sub> welding using 1.6...2.0 mm diameter low-alloy wire Sv-08G2S, with preheating to 60 °C and diffusible hydrogen content of the welds limited to 3.5 ml/100 g.

Поступила в редакцию 07.06.2007