

**СОПРОТИВЛЯЕМОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ  
ВЫСОКОПРОЧНЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ  
ОБРАЗОВАНИЮ ХОЛОДНЫХ ТРЕЩИН**

**В. Д. Позняков, д. т. н.**

*Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины*

Главные проблемы при сварке низколегированных высокопрочных сталей связаны с тем, что они склонны к образованию холодных трещин [1-5]. Известно, что необходимыми условиями для зарождения и развития холодных трещин в сварных соединениях таких сталей является наличие в зоне потенциального их образования закалочных структур, диффузионного водорода ( $[H]_{диф}$ ) и растягивающих напряжений [6].

Чаще всего влияние указанных факторов на сопротивляемость сварных соединений образованию холодных трещин оценивается по результатам косвенных исследований. Для этого изучается связь между технологическими параметрами сварки и структурой металла швов и зоны термического влияния сварных соединений, условиями насыщения наплавленного металла диффузионным водородом, способностью металла сопротивляться без разрушения постоянно действующей внешней растягивающей нагрузке. Однако насколько полно условия таких испытаний соответствуют процессам, которые происходят в сварных соединениях остается мало изученным вопросом. Между тем, развитие методов, как экспериментальных, так и расчетных, для вычисления распределения параметров указанных характеристик при сварке различных соединений конструкционных сталей, позволяет более точно подходить к выбору технологических мероприятий направленных на предупреждение рисков образования холодных трещин в сварных соединениях.

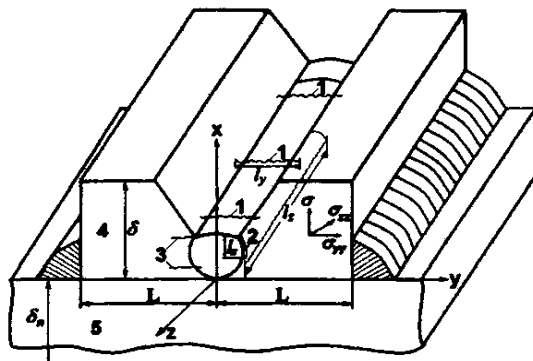
В связи с этим целью настоящей работы заключалась в том, чтобы используя современные расчетно-экспериментальные методы исследований, а также результаты испытания образцов по методу Implant, оценить влияние структуры, диффузионного водорода и остаточных напряжений на сопротивляемость сварных соединений высокопрочных конструкционных сталей образованию холодных трещин.

В основу расчетно-экспериментального метода исследований положено математическое моделирование процессов распределения температур, диффузионного водорода, микроструктурных изменений и напряженно-деформированного состояния в зоне термического влияния (ЗТВ) жестко закрепленных сварных соединений (рис. 1) и результаты экспериментальных исследований их сопротивляемости образованию холодных трещин [7, 8].

Уровень остаточных напряжений в дискретных точках сварного соединения определяли методом конечных элементов на основе соответствующих математических моделей, разработанных в ИЭС им. Е.О. Патона В.И. Махненко [9].

Вероятность зарождения трещин в сварных соединениях стали в зависимости от содержания диффузионного водорода в наплавленном металле (регу-

лировалось условиями прокатки электродов), остаточных напряжений (регулирулись изменением базы закрепления образцов) и структурного состояния металла ЗТВ (регулирулось скоростью охлаждения образцов за счет изменения исходной температуры пластин,  $T_0 = 11, 60$  и  $80$  °С) оценивалась по результатам испытания технологических проб (рисунок 1). При конкретных условиях сварки испытывали по 10 однотипных проб.



**Рис. 1.** Схема технологической пробы (4) толщиной  $\delta$  и шириной  $2L$ , закрепленной фланговыми швами к плите толщиной  $\delta_n \gg \delta$  с поперечными (1) и продольными (2, 3) трещинами в корневом шве

Испытания по методу Implant выполнялись в соответствии с методикой, изложенной в работе [2]. Использовались цилиндрические образцы-вставки диаметром 6,0 мм с надрезом в виде винтовой канавки с шагом 1,25 мм и радиусом у вершины 0,1 мм.

Условия образования холодных трещин при сварке корневого прохода шва жестко закрепленных стыковых соединений исследовали с использованием технологических проб с базой закрепления  $L = 50, 70$  и  $100$  мм стали 14ХГ2САФД толщиной  $\delta = 18$  мм. Ручная дуговая сварка проб осуществлялась электродами АНП-10 диаметром 4,0 мм на постоянном токе:  $I_{св} = 140 - 150$  А;  $U_d = 24$  В;  $V_{св} = 7,2 - 7,5$  м/ч. Химический состав основного и присадочного металла приведен в таблице 1.

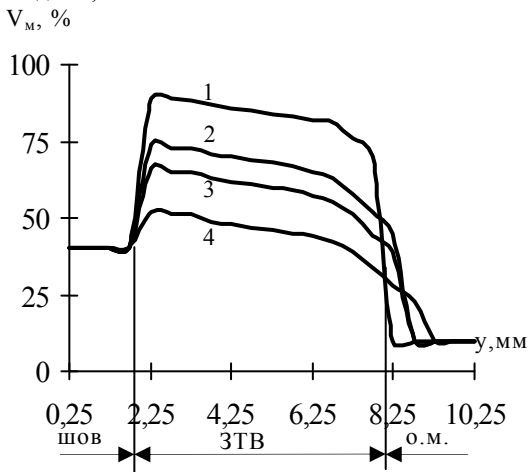
Таблица 1.

Состав основного и присадочного материала в % по массе

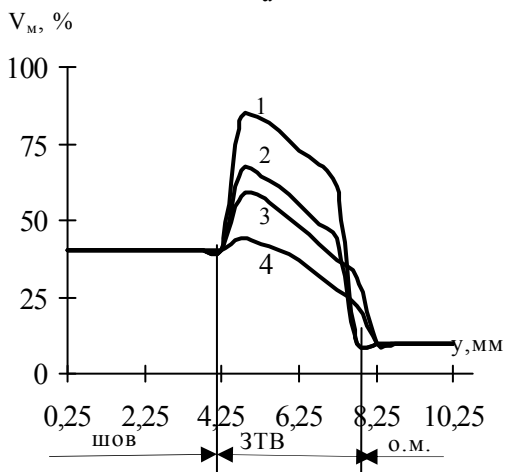
Материал	C	Si	Mn	Cr	Cu	V	Ab	P	S	P <sub>см</sub>
14ХГ2САФД	0,13	0,57	1,42	0,44	0,39	0,08	0,08	0,019	0,015	0,27
АНП-10	0,09	0,43	1,9	---	---	0,01	---	0,02	0,02	0,20

Расчетные значения, характеризующие изменение объемной доли мартенсита в сечениях сварного соединения, расположенных на высоте 0,25 и 5,0 мм от корневой поверхности шва, при различных исходных температурах металла, приведены на рисунке 2. Они свидетельствуют, что при исходной температуре металла  $T_0 = 11$  оС, скорость охлаждения сварного соединения в

интервале температур 600 – 500 оС приблизительно равна  $W6/5 \approx 25...30$  оС/с количество мартенсита в зоне потенциального образования трещины (участок перегрева металла зоны термического влияния) составляет  $\approx 90$  %, а при подогреве до 70, 90 и 120 оС, за счет уменьшения  $W6/5$  до 10 оС/с,  $V_m$  снижается соответственно до 72, 65 и 50 %.



а

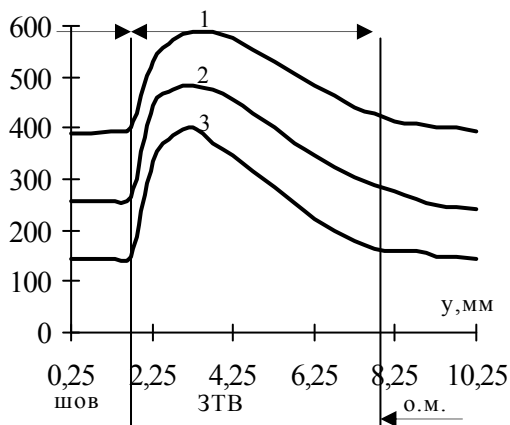


б

**Рис. 2.** Расчетные значения  $V_m$  в поперечном сечении корневого шва при  $L=50$  мм и  $T_0 = 11$  (1), 70 (2), 90 (3) и 120 оС (4): а –  $x = 0,25$  мм; б –  $x = 5,0$  мм

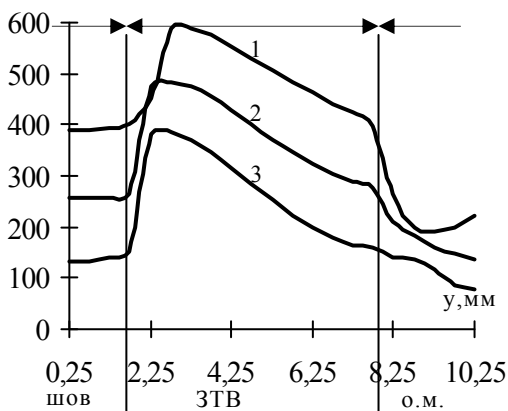
Данные о распределении продольных и поперечных напряжений в зоне образования холодных трещин рассматриваемых сварных соединений в зависимости от базы закрепления образцов, приведенные на рисунке 3, позволяют заключить следующее. С увеличением базы закрепления образцов от  $b = 50$  мм до  $b = 100$  мм уровень остаточных напряжений в сварных соединениях технологических проб изменяет в широких пределах, примерно от 400 до 120 МПа в металле шва и от 590 до 390 МПа в ЗТВ.

$\sigma_{zz}$ , МПа



а

$\sigma_{yy}$ , МПа



б

**Рис. 3.** Расчетные значения  $\sigma_{zz}$  (а) и  $\sigma_{yy}$  (б) в поперечном сечении корневого шва при  $T_0 = 11$  °С,  $x = 0,25$  мм и  $L=50$  мм (1), 70 (2) и 100 мм (3)

Результаты испытания технологических проб стали 14ХГ2САФД, представленные в таблице 2, свидетельствуют о том, что продольные холодные трещины при сварке корневого шва технологических проб с базой закрепления  $L = 50$  мм и при  $T_0 = 11$  °С, будут образовываться с вероятностью  $P \sim 1,0$  в том случае, когда содержание диффузионного водорода в наплавленном металле находится на уровне 7,0 мл/100г и выше. Уменьшение  $[H]_{диф}$  до  $\sim 5,5$  мл/100г снижает вероятность образования трещин до  $P \sim 0,7$ , а при  $[H]_{диф}$  до  $P = 0$ . С увеличением базы закрепления сварных соединений вероятность образования трещин в рассматриваемых пробах также уменьшается при  $L = 70$  мм до  $P = 0,5$ , а при  $L = 100$  мм до  $P = 0$ .

Таблица 2

Результаты испытания технологических проб стали 14ХГ2САФД толщиной 18 мм, выполненных РДС электродами АНП-10

Содержание диффузионного водорода в наплавленном металле, мл/100 г	$T_0, ^\circ C$	База закрепления (L), мм									Вероятность образования трещин (P)		
		50			70			100					
		Количество образцов с трещинами, длина которых соответствует длине образцов, шт	Количество частично разрушенных образцов, шт	Количество образцов без трещин, шт									
4,0	11	0	0	0	0	0	0	10	10	10	0	0	0
5,5		3	0	0	4 <sup>1</sup>	0	0	3	10	10	0,7	0	0
7,0		10	0	0	0	0	0	0	10	10	1	0	0
8,6	60	10	4	0	0	2 <sup>2</sup>	0	0	4	10	1	0,6	0
8,6		5	0	0	1 <sup>3</sup>	0	0	4	10	10	0,6	0	0
8,6		80	0	0	0	0	0	0	10	10	10	0	0

Примечания протяженность трещин по отношению к длине образца составляла: 1 - 80%, 55% 40% и 35%; 2 - 30% и 70%; 3 - 60 %.

Обобщенные данные относительно влияния содержания диффузионного водорода в наплавленном металле и уровня остаточных напряжений  $\sigma_{vv}$  на сопротивляемость стыковых соединений технологических проб стали 14ХГ2САФД при  $V_m \sim 0,9$ , приведены на рисунке 4, кривая 1.

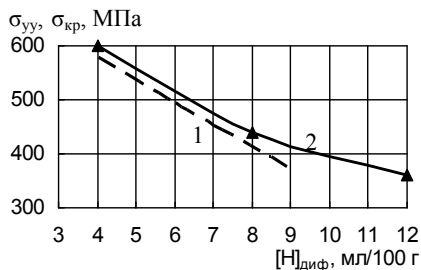


Рис. 4. Сопротивляемость металла ЗТВ сварных соединений стали 14ХГ2САФД образованию холодных трещин, полученные по результатам испытания технологических проб (1) и образцов по методу Implant (2) при  $V_m \sim 0,9$

На этом же рисунке для сравнения представлены результаты испытания образцов Implant (кривая 2), сварка которых выполнялась на тех же режимах, что и корневой шов технологической пробы.

Таким образом, исследования, выполненные применительно к дуговой сварке корневого шва жестко закрепленных сварных соединений стали 14ХГ2САФД толщиной 18 мм, показали, что при режиме сварки  $I_{св} = 140-150$  А,  $U_d = 24$  В и  $V_{св} = 7,2 - 7,5$  м/ч, изменение начальной температуры металла от  $T_0 = 11$  до  $120$  °С, содержания водорода от 4,0 до 8,6 мл/100г и базы закрепления образцов от  $L = 50$  мм до  $L = 100$  мм вероятность образования в них продольных холодных трещин меняется в широких пределах, однако имеется определенная закономерность, связанная с влиянием на этот процесс остаточных сварочных напряжений. Аналогичные закономерности были выявлены и при испытании образцов по методу Implant.

Принимая во внимание, что результаты испытаний жестких технологических проб и образцов, исследованных по методу Implant, показали хорошую сопоставимость данных, дальнейшие исследования, цель которых заключалась в сопоставлении склонности к образованию холодных трещин ряда отечественных высокопрочных сталей с разным химическим составом и показателями статической прочности, выполняли по методу Implant.

Химический состав исследованных сталей и их механические свойства приведены в таблице 3.

Таблица 3

*Химический состав исследуемых сталей*

Сталь	Массовая доля элементов, %												С <sub>экв</sub> , %
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	V	Nb	Al	S	P	
10ХСНД	0,09	0,98	0,70	0,77	0,8	---	0,37	---	---	---	0,018	0,020	0,46
09Г2СЮч	0,01	0,36	1,90	---	---	---	0,39	---	---	0,06	0,010	0,015	0,44
06Г2Б	0,08	0,27	1,50	---	---	0,19	0,23	---	0,05	0,04	0,006	0,011	0,37
14Г2ГМР	0,15	0,28	1,10	1,30	---	0,43	0,20	---	0,02	0,05	0,023	0,024	0,63
12ГН2МФАЮ	0,15	0,41	1,14	0,38	1,56	0,22	0,19	0,07	---	0,06	0,032	0,014	0,50
14ХГН2МДАФБ	0,14	0,25	1,30	1,15	1,94	0,24	0,42	0,14	0,04	0,05	0,008	0,014	0,70
2ГН3МФАЮДР	0,13	0,23	1,36	---	3,08	0,33	0,40	0,05	---	0,02	0,004	0,020	0,48

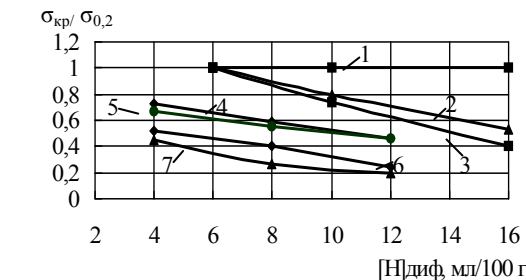
Учитывая то, что прочностные показатели у исследуемых сталей существенно отличаются между собой, в качестве критерия, который бы позволил более корректно сравнить их склонность к образованию холодных трещин, была принята относительная величина  $\sigma_{кр}/\sigma_{0,2}$ . Показатель  $\sigma_{кр}$  определялся по результатам испытания образцов по методу Implant, а значения  $\sigma_{0,2}$  (условный предел текучести металла ЗТВ) были получены на основании испытания на статическое растяжение образцах тип II по ГОСТ 6996, изготовленных из заготовок металла, обработанных по заданному термическому циклу сварки на установке МСР-75 [6]. Результаты этих исследований приведены в таблице 4.

Они свидетельствуют, что стали различного химического состава по-разному реагируют на воздействие термического цикла. Наименьшей склонностью к закалке обладают низколегированные стали марок 06Г2Б, 09Г2СЮч и 10ХСНД. При малых скоростях охлаждения ( $W_{6/5} \leq 10$  °С/с) в металле ЗТВ таких сталей может наблюдаться незначительное разупрочнение. Что касается легированных высокопрочных сталей, то для них характерно увеличение прочностных показателей в ЗТВ даже при малых скоростях охлаждения. В особенности это касается сталей, которые содержат хром (10ХСНД, 14ХГ2ГМР и 14ХГН2МДАФБ), который, как известно, повышает прокаливаемость сталей.

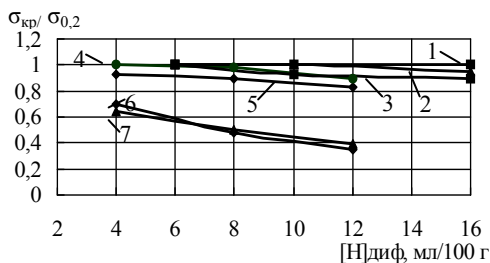
Механические свойства имитированного металла ЗТВ исследуемых сталей.

Сталь	Скорость охлаждения в интервале температур 600 – 500 °С, °С/с											
	сталь			5			10			25		
	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_B$	$\delta_5$	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_B$	$\delta_5$	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_B$	$\delta_5$	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_B$	$\delta_5$
	МПа		%	МПа		%	МПа		%	МПа		%
06Г2Б	465	530	30	440	620	28	445	640	28	490	645	26
09Г2СЮч	460	590	31	420	630	30	430	640	28	470	650	26
10ХСНД	470	610	31	480	720	26	510	740	24	560	790	22
12ГН2МФАЮ	625	720	20	780	890	18	810	950	16	890	1050	16
14Х2ГМР	680	780	18	900	1040	17	1000	1180	16	1050	1180	14
14ХГН2МДАФБ	860	920	17	1100	1150	12	1050	1300	12	1100	1350	12
12ГН3МФАЮДР	821	887	19	800	960	16	920	1050	14	1050	1210	13

Зависимости, характеризующие склонность высокопрочных сталей различного класса прочности образованию холодных трещин, приведенные на рисунке 5, свидетельствуют, что наиболее высокой сопротивляемостью замедленному разрушению обладают сварные соединения стали 06Г2Б. Даже при предельных концентрациях водорода металл ЗТВ такой стали не проявляет склонности к образованию холодных трещин. Столь высокая стойкость данной стали к образованию холодных трещин может объясняться весьма низкими значениями  $C_{э\text{кв}} \approx 0,37\%$ .



а)



б)

Рис. 5. Склонность

сталей: 06Г2Б (1), 09Г2СЮч (2), 10ХСНД (3), 12ГН2МФАЮ (4), 12ГН3МФАЮДР (5), 14Х2ГМР (6), 14ХГН2МДАФБ (7)

к образованию холодных трещин в зависимости от насыщенности швов водородом и условий охлаждения сварных соединений: а –  $W6/5 = 25\text{ }^\circ\text{C/с}$ ; б –  $W6/5 = 10\text{ }^\circ\text{C/с}$

Высокой сопротивляемостью образованию холодных трещин обладают и низколегированные стали 09Г2СЮч и 10ХСНД ( $C_{э\text{кв}} \approx 0,44$  и  $0,46\%$  соответственно). Однако в отличие от стали 06Г2Б, они более чув-

ствительны к охрупчиванию водородом и требуют либо жестких ограничений по насыщенности швов  $[H]_{\text{диф}}$ , либо замедления скорости охлаждения сварных соединений за счет использования предварительного подогрева.

При ограниченном содержании диффузионного водорода и замедленном охлаждении металл ЗТВ сварных соединений высокопрочных сталей типа 12ГН2МФАЮ и 12ГН3МФАЮДР имеет сопротивляемость образованию холодных трещин, сопоставимую с низколегированными сталями 09Г2СЮч и 10ХСНД. Но поскольку углеродистый эквивалент у них выше ( $C_{\text{эkv}} \approx 0,50 \%$ ), то увеличение интенсивности охлаждения металла приводит к возрастанию в нем доли мартенситной составляющей и существенному повышению его склонности к образованию холодных трещин.

Дополнительное легирование высокопрочных сталей, например, таких как 14Х2ГМР и 14ХГН2МДАФБ, хромом способствует повышению в них  $C_{\text{эkv}}$  до 0,70 %, что отрицательно сказывается на замедленном разрушении металла ЗТВ. В связи с этим при их сварке требуется одновременно снижать уровень насыщенности швов диффузионным водородом и замедлять скорость охлаждения сварных соединений.

Таким образом, результаты выполненных исследований позволили установить следующее.

1. Вероятность образования продольных холодных трещин в жестко закрепленных сварных соединениях высокопрочных сталей меняется в широких пределах, однако имеется определенная закономерность, связанная с влиянием на этот процесс остаточных сварочных напряжений.
2. Риск образования холодных трещин в сварных соединениях высокопрочных сталей будет сведен к минимуму при ограничении скорости их охлаждения  $W_{6/5}$  до 10 °С/с, содержания диффузионного водорода в наплавленном металле до 4 мл/100 г, уровня остаточных напряжений для сталей с углеродным эквивалентом  $C_{\text{эkv}} = 0,35-0,45 \%$ , до 0,9  $\sigma_{0,2}$ , а при  $C_{\text{эkv}} = 0,45-0,55 \%$  и  $C_{\text{эkv}} = 0,60-0,70 \%$  до 0,7 $\sigma_{0,2}$  и 0,5 $\sigma_{0,2}$  соответственно.
3. Повышение скорости охлаждения сварных соединений  $W_{6/5}$  до 25 °С/с, а содержания водорода в наплавленном металле до 16 мл/100 г, вызывает необходимость снижения допустимых остаточных напряжений в 1,7...1,9 раза при  $C_{\text{эkv}} = 0,35...0,55 \%$  и в 2,5 раза при  $C_{\text{эkv}} = 0,60...0,70 \%$ .

### Список использованных источников.

1. Макара А.М. Исследование природы холодных околошовных трещин при сварке закаляющихся сталей // Автомат. сварка.-1960.-N2.-С.9-33.
2. Макаров Э.Л. Холодные трещины при сварке легированных сталей. - М.: Машиностроение, 1981.-247 с.
3. Мусияченко В.Ф. Свариваемость и технология сварки высокопрочных сталей. - Киев.: Наукова думка, 1983.-68 с.
4. Гривняк И. Свариваемость стали. – М.: Машиностроение. 1984. –215 с.
5. Походня И.К., Швачко В.И. Физическая природа обусловленных водородом холодных трещин в сварных соединениях конструкционных сталей // Автомат. сварка – 1997. - №5. – С. 3-10.
6. Welding handbook: Materials and applications. – Miami, USA, 1998. – V.4, pt.2. – 620 p.
7. Махненко В.И. Компьютерное моделирование сварочных процессов /В.И. Махненко Сучасне матеріалознавство ХХІ сторіччя. - К.: Наукова думка, 1998. - 108-124 с.
8. Calculation of structural transformations in the welding processes / P. Sayffarth, O.G. Kasatkin. - Doc. IIW-IX-1228-82.
9. Махненко В.И. Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций. - К.: Наукова думка, 2006. – 617 с.