

## МАШИНОСТРОЕНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ

УДК 621.791.01

К.Б. Конищев<sup>1</sup>, Б.П. Конищев<sup>2</sup>

### ОЦЕНКА СОПРОТИВЛЯЕМОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ И ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ ОБРАЗОВАНИЮ ГОРЯЧИХ ТРЕЩИН ПРИ СВАРКЕ

ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Москва<sup>1</sup>Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>2</sup>

Рассматривается влияние химического состава конструкционных сталей на образование горячих трещин при сварке. Рассматривается отрицательное влияние серы, углерода, фосфора и других элементов на образование горячих трещин при сварке конструкционных сталей. Приводится сравнительная оценка сопротивляемости некоторых марок низкоуглеродистых и низколегированных конструкционных сталей по параметру Итамуре HCS, критерию UCS европейского стандарта и эквиваленту углерода  $C_{эг}$ . Показано, что наиболее достоверную оценку дает эквивалент углерода  $C_{эг}$ . Дана оценка сопротивляемости высоколегированных сталей горячим трещинам по соотношению эквивалентов хрома  $[Cr]_э$  и никеля  $[Ni]_э$ .

*Ключевые слова:* сульфидная эвтектика, ликвация серы, зональная неоднородность, температурный интервал хрупкости, сопротивляемость горячим трещинам, параметр Итамуре HCS, европейский критерий UCS, эквивалент углерода на горячие трещины  $C_{эг}$ , эквиваленты хрома и никеля.

Важным показателем хорошей свариваемости сталей является сопротивляемость этих сталей образованию горячих трещин при сварке. Горячие трещины образуются на завершающей стадии кристаллизации металла в ТИХ (температурном интервале хрупкости) при низкой пластичности металла.

Образование горячих трещин определяется следующими факторами:

1. Величиной температурного интервала хрупкости ТИХ.
2. Значением минимальной пластичности металла  $\delta_{\min}$ .
3. Темпом внутренней деформации  $\alpha_{вн}$ .

Чем больше темп внутренней деформации  $\alpha_{вн}$ , тем больше возможность образования горячих трещин. Темп внутренней деформации зависит от формы, размеров и жесткости конструкции. Наибольший темп внутренней деформации будет при сварке конструкций малой и большой жесткости. Наименьший темп внутренних деформаций будет при сварке конструкций средней жесткости. Чем больше минимальная пластичность стали  $\delta_{\min}$  в ТИХ, тем больше сопротивляемость стали образованию горячих трещин. Чем меньше величина температурного интервала хрупкости  $\Delta T_{хр}$ , тем больше сопротивляемость стали образованию горячих трещин.

Величина температурного интервала хрупкости  $\Delta T_{хр}$  и значение минимальной пластичности металла  $\delta_{\min}$  зависят от химического состава стали, от содержания вредных и полезных элементов. Наиболее вредным элементом в сталях, вызывающих горячие трещины является сера.

Сера обладает неограниченной растворимостью в жидком железе и весьма малой растворимостью в твердом. Сера образует с железом легкоплавкий сульфид железа FeS с температурой плавления  $T_{пл}=1190^{\circ}\text{C}$  и более легкоплавкую сульфидную эвтектику Fe-FeS с температурой плавления  $T_{пл}=985^{\circ}\text{C}$ .

При затвердевании металла сварочной ванны в результате избирательного процесса ее кристаллизации легкоплавкие сульфиды и сульфидная эвтектика оттягивается вглубь жидкой фазы и затвердевает при более низких температурах, сосредотачиваясь по границам столбчатых кристаллов в виде жидких прослоек, имеющих в температурном интервале хрупкости очень низкую пластичность. Наибольшее количество серы сосредотачивается в центральной части шва, в месте стыка кристаллов, образуя зональную ликвацию, где чаще образуются горячие трещины.

Вторым по вредности элементом, вызывающим горячие трещины, является углерод, расширяющим  $\Delta T_{хр}$  и снижающим  $\delta_{min}$ , менее вредными элементами являются фосфор, кремний, никель, медь.

Полезными элементами являются Mn, Ti и другие элементы, образующими тугоплавкие сульфиды и снижающими  $\Delta T_{хр}$ .

Для предупреждения горячих трещин ограничивают содержание серы в основном металле. По содержанию серы стали делятся на 4 группы: стали обыкновенного качества Ст2сп, Ст3сп, содержащие  $S \leq 0,05\%$ , качественные стали 15, 20, содержащие  $S \leq 0,04\%$ , высококачественные стали 23Г2А, содержащие  $S \leq 0,035\%$ , особокачественные стали 20Г-Ш, содержащие  $S \leq 0,02\%$ . Еще больше ограничивают серу в сварочных проволоках: Св-08  $S \leq 0,04\%$ , Св-08А  $S \leq 0,03\%$ , Св-08АА  $S \leq 0,02\%$ . Содержание серы в металле шва снижают также за счет применения сварочных флюсов и электродных покрытий, обеспечивающих рафинирование металла – перевод серы из металла в основной шлак, содержащий оксиды CaO и MgO.

Эффективным способом борьбы с горячими трещинами является применение низкоуглеродистых сварочных проволок, содержащих 0,08% углерода и ниже.

Для оценки сопротивляемости конструкционных сталей образованию горячих трещин в зависимости от их химического состава применяют расчетно-статистические методы, основанные на использовании уравнений на основе анализа экспериментальных данных. Одно из параметрических уравнений (по Итамуре) применительно к низколегированным сварным швам имеет вид [1]

$$HCS = \frac{1000C(S + P + \frac{Si}{25} + \frac{Ni}{100})}{3Mn + Cr + Mo + V}$$

Если  $HCS > 4$ , то сварные швы потенциально склонны к горячим трещинам для сталей с пределом прочности менее 700 МПа. Для сталей с пределом прочности более 700 МПа допустимое значение HCS составляет 1,6-2,0.

В табл. 1 приведены значения HCS для 20 марок конструкционных сталей, рассчитанные по этому уравнению. Все стали, приведенные в этой таблице, потенциально склонны к горячим трещинам, так как  $HCS > 4$ . Однако в марочнике сталей [2] свариваемость этих сталей оценивается как хорошая, и они считаются не склонными к горячим трещинам. Практика применения этих сталей в производстве также показывает, что они не склонны к горячим трещинам при сварке.

По европейскому стандарту EN 1011-2:2001 «Рекомендации по сварке металлических материалов» при дуговой сварке ферритных (углеродистых и низколегированных) сталей ре-

комендуется оценивать опасность образования горячих трещин в сварных швах по соотношению [1]:

$$UCS=230C+190S+75P+45Nb-12,3Si-5,4Mn-1.$$

Таблица 1

## Показатели сопротивляемости сталей образованию горячих трещин

Сталь	HCS	UCS	C <sub>гр</sub> , %
Ст2сп	8,75	39,61	0,31
Ст3сп	10,27	54,9	0,38
8	5,43	28,76	0,26
10	6,19	33,36	0,28
15	8,01	44,86	0,33
20	10,01	56,36	0,38
15Г	5,00	42,02	0,32
15Х	5,098	41,34	0,31
20Х	5,94	52,304	0,36
20Г	6,39	53,52	0,37
15ГС	4,41	28,455	0,35
16ГС	4,89	35,54	0,35
17ГС	4,53	40,285	0,36
15ХФ	4,93	41,34	0,31
18ХГТ	4,39	50,68	0,36
20ХГВ	5,2	53,52	0,37
20ХМ	4,62	18,97	0,38
20ХН	6,54	38,24	0,38
10ХСНД	6,36	57,44	0,38
15ХСНД	7,49	52,84	0,398

Значение UCS<10 соответствует высокой сопротивляемости образованию горячих трещин, а при UCS>30 – низкой сопротивляемости горячим трещинам.

В табл. 1 приведены значения UCS, рассчитанные по этому уравнению для 20 марок сталей. Для большинства сталей UCS>30, т.е. они склонны к горячим трещинам, что не соответствует практике применения этих сталей в производстве.

В работе [3] оценка сопротивляемости конструкционных сталей против образования горячих трещин производится по эквиваленту углерода:

$$C_{гр}=C+2S+P/3+(Si-0,4)/10+Ni/12+Cu/15.$$

Если C<sub>гр</sub> > 0,4%, сталь склонна к горячим трещинам, влияние Si учитываем только при Si > 0,4%.

Результаты расчета по этому уравнению в табл. 1 показывают, что все стали не склонны к горячим трещинам, что хорошо соответствует данным марочника сталей [2] и практике применения этих сталей в производстве.

Сталь Ст4сп склонна к горячим трещинам, так как для нее  $C_{gr}=0,428\%>0,4\%$ . Сталь 25 при содержании углерода  $C=0,25\%$  не склонна к горячим трещинам, так как для неё  $C_{gr}=0,377\%<0,4\%$ , а при максимальном содержании в ней углерода  $C=0,3\%$  становится склонной к горячим трещинам, так как  $C_{gr}=0,437\%>0,4\%$ . Трубные стали 16ГС, 17ГС, 10ХСНД, 15ХСНД не склонны к горячим трещинам.

Сера образует с никелем более легкоплавкие соединения, чем с железом: сульфид никеля  $Ni_3S_2$  с  $T_{пл} = 787^\circ C$  и сульфидную эвтектику  $Ni-Ni_3S_2$  с  $T_{пл} = 644^\circ C$ . Поэтому аустенитные высоконикелевые стали очень склонные к горячим трещинам.

Сопротивляемость высоколегированных сталей, образованию горячих трещин оценивается по соотношению эквивалентов хрома  $[Cr]_Э$  и никеля  $[Ni]_Э$  [1, 3].

Таблица 2

## Оценка сопротивляемости высоколегированных сталей, образованию горячих трещин

Марка стали	$Cr_Э, \%$	$Ni_Э, \%$	$Cr_Э/Ni_Э$
14X17H2	16,85	5,6	3,67
08X17H5Б3	19,6	8,45	2,4
08X17H6Т	15,9	9,5	1,81
20X13H4Г9	15,2	12,45	1,59
12X21H5Т	22,2	10,4	2,43
08X21H6M2Т	29,2	8,8	3,35
08X18Г8H2Т	22,7	9,7	2,95
03X22H6M2	27,6	7,9	3,57
37X12H8Г8MФБ	20	25,75	0,84
10X14Г14H4Т	17,7	15	1,47
08X17H13M2Т	23,4	18,4	1,21
12X18H9Т	19,9	14,6	1,44
08X18H10Т	19,9	14,4	1,42
12X18H10Т	20,9	15,6	1,41
06X18H11	18,9	13,8	1,46
12X18H12Т	20,9	16,6	1,32
20X2 3H18	24,2	25	1,05
20X25H20C2	29,5	26,75	1,19
10X11H20ТЗР	31,3	23,9	1,01
13X11H2B2MФ	17,5	4,59	3,43

Эквивалент хрома рассчитывается по зависимости [3]:

$$[Cr]_Э = Cr + 1,5Si + 2Mo + 5Ti + 2Nb + 1,5W + 2Al + V.$$

Эквивалент никеля рассчитывается по зависимости [3]:

$$[Ni]_Э = Ni + Co + 0,5Mn + 30C + 30N + 0,3Cu.$$

При соотношении  $Cr_3/Ni_3 < 1,5$  стали склонны к горячим трещинам, при  $Cr_3/Ni_3 > 1,5$  не склонны. В табл. 2 приведены значения эквивалентов хрома и никеля и их соотношение. Стали, для которых  $Cr_3/Ni_3 > 1,5$ , склонны к горячим трещинам. На рис. 1 приведена диаграмма Шеффлера.

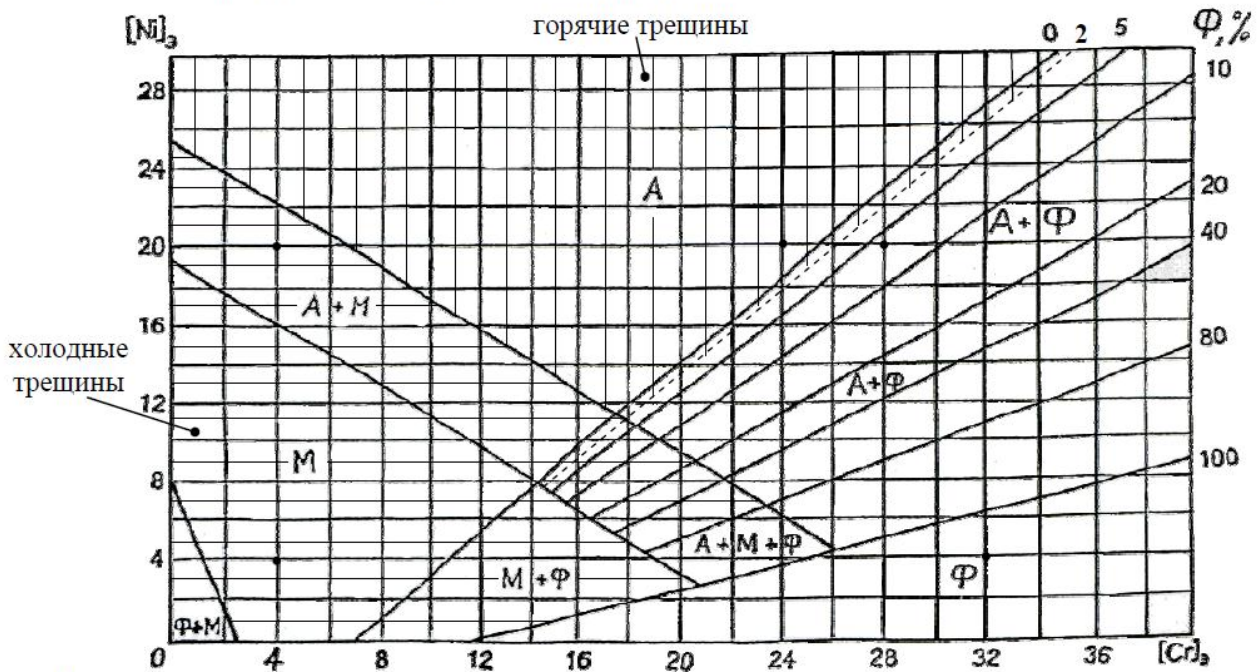


Рис. 1. Диаграмма Шеффлера:  
А – аустенит; Ф – феррит; М - мартенсит

По диаграмме Шеффлера может быть ориентировочно установлена структура стали при определенных содержаниях эквивалентов хрома и никеля. К образованию горячих трещин склонны стали, имеющие на диаграмме чисто аустенитную структуру или структуру А+Ф при содержании Ф до 2%.

Высоколегированные стали более подвержены образованию горячих трещин, чем конструкционные стали. Это объясняется более вредным влиянием серы, а также сильно развитой транскристаллитной направленной первичной микроструктурой, увеличенной литейной усадкой кристаллизующего металла, более значительной величиной темпа внутренней деформации. Эффективным способом борьбы с горячими трещинами является легирование металла шва элементами ферритизаторами и получение в шве двухфазной аустенитно-ферритной структуры с содержанием феррита 2–7%.

#### Библиографический список

1. Сварка. Резка. Контроль: справочник в 2-х т. Т. 1 / под общ. ред. Н.П. Алешина, Г.Г. Чернышова. – М.: Машиностроение, 2004. – 624 с.
2. Марочник сталей и сплавов / А.С. Зубченко, М.М. Колосков, Ю.В. Каширский [и др.]; под общей ред. А.С. Зубченко. – 2-е изд., доп. и испр. – М.: Машиностроение, 2003. – 784 с.
3. Оценка стойкости металла шва против образования горячих трещин при сварке: метод. указания к лаб. работе 11 по курсу «Теория сварочных процессов» для студентов специальностей 150701, 151701 и др. всех форм обучения / НГТУ; сост.: Б.П. Конищев. – Н. Новгород, 2012. – 12 с.

Дата поступления  
в редакцию 22.04. 2015

К.В. Konishchev<sup>1</sup>, В.Р. Konishchev<sup>2</sup>

## STRUCTURAL AND HIGH-ALLOY STEEL RESISTANCE EVALUATION FOR HOT CRACKING DURING WELDING

“Gazprom VNIIGAZ LLC”, Moscow<sup>1</sup>,  
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev<sup>2</sup>

**Purpose:** To examine the impact of chemical structural steels to hot cracking during welding. To examine the negative impact of sulfur, carbon, phosphorus and other elements on the hot cracking during welding of structural steels. To evaluate resistance to hot cracking high-alloy steels by the ratio of equivalents of chromium  $[Cr]_e$  and nickel  $[Ni]_e$ .

**Methodology:** The comparative assessment of the resilience of some brands of low-carbon and low-alloy structural steels in the parameter Itamura-HCS, UCS-european criterion standard and equivalent carbon (carbon equivalent hot crack).

**Findings:** It is shown that the most reliable estimate gives the equivalent carbon (carbon equivalent hot crack).

*Key words:* sulfide eutectic segregation of sulfur zonal heterogeneity, the temperature interval of brittleness, resistance to hot cracking parameter Itamura HCS, European criteria UCS, the equivalent carbon (carbon equivalent hot crack). Chromium and nickel equivalents.