



УДК 621.791.669.15.018

РИСК ОБРАЗОВАНИЯ КАРБИДОВ И σ -ФАЗЫ ПРИ СВАРКЕ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ ХРОМОНИКЕЛЕВЫХ СТАЛЕЙ

Академик НАН Украины **В. И. МАХНЕНКО**, **С. С. КОЗЛИТИНА**, **Л. И. ДЗЮБАК**, инженеры (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины), **В. П. КРАВЕЦ**, инж. (Ривненская АЭС)

Рассмотрена возможность прогнозирования расчетным путем риска образования σ -фазы в металле ЗТВ хромоникелевых сталей при содержании углерода порядка 0,08% и выше. Показано, что использование температурно-временных диаграмм состояния стали соответствующего состава в сочетании с температурными циклами точек в металле ЗТВ позволяет прогнозировать степень сенсибилизации соответствующего участка ЗТВ при различных режимах сварки.

Ключевые слова: дуговая сварка, хромоникелевые стали, сварные соединения, сенсибилизация, σ -фаза, межкристаллитные трещины, коррозия под напряжением, температурно-временная диаграмма

Проблема образования третьих фаз при сварке аустенитных хромоникелевых сталей с повышенным содержанием углерода является одной из фундаментальных. Для ее решения разработаны соответствующие рекомендации, вошедшие во многие справочники [1 и др.]. Характерно, что указанные третьи фазы (кроме исходных аустенита и феррита) появляются после первичной кристаллизации при некоторой выдержке в определенном температурном интервале (рис. 1). При однопроходной сварке они не создают серьезных проблем для металла околошовной зоны. Однако при многопроходной сварке наложение кривых термических циклов для конкретных точек околошовной зоны на соответствующие температурно-временные диаграммы (*c*-кривые) для стали определенного состава (рис. 2) показывает, что в околошовной зоне происходит накопление условий для образования карбидов хрома по границам зерен (за счет диффузии углерода, контролируемого *c*-кривой на рис. 2, а), либо накопление σ -фазы за счет распада δ -феррита и образования сложных интерметаллидов (рис. 2, б), контролируемое также диффузионными процессами. В работе [2] для описания *c*-образных кривых, связанных с образованием σ -фазы, использован метод Аврами [2, 3] при коэффициентах, определяемых в зависимости от температуры и степени образования новой фазы при данной температуре в случае очень длительной выдержки по времени. Большой разброс значений соответствующих коэффициентов для описания *c*-образных температурно-временных кривых, типа приведенных на рис. 2, затрудняет использование данного метода.

В настоящей работе предлагается подход, базирующийся на численном интегрировании накопления эффекта присутствия новой фазы в конкретной точке околошовной зоны с заданным термическим циклом $T(t')$ на основе данных соответствующей *c*-образной кривой, для которой в любой точке $T_{\min} < T < T_{\max}$ можно вычислить производную $\partial T / \partial \tau$, пропорционально которой развивается указанный процесс накопления [4].

При образовании химического соединения (карбидов хрома) (рис. 2, а) интегрирование для

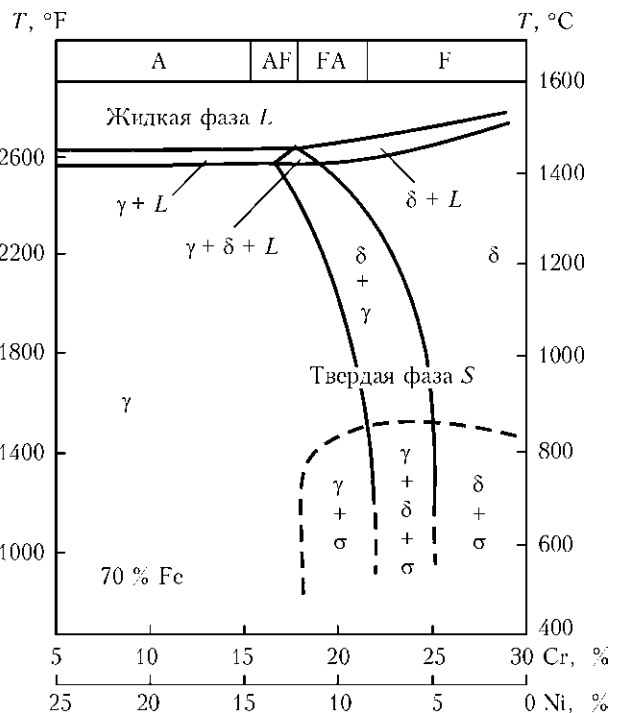


Рис. 1. Диаграмма фазового состояния системы Fe–Cr–Ni при 70 % Fe [1]: А — аустенитная кристаллизация; АF — преимущественно аустенитная кристаллизация; FА — преимущественно ферритная кристаллизация; F — ферритная кристаллизация

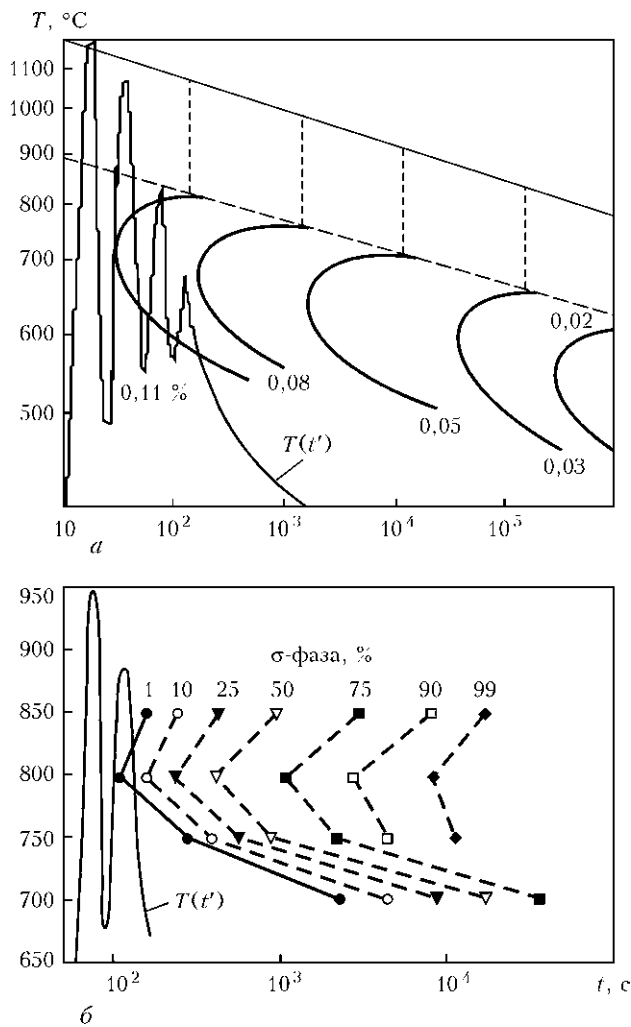


Рис. 2. Температурно-временные диаграммы образования карбидов в стали типа 18Cr9Ni в зависимости от содержания углерода [1] (а) и σ -фазы в стали DSS (22,4 Cr; 4,88 Ni; 3,13 Mo; 0,14 Mn; 0,67 Si; 0,18 N; 0,023 C) [2] (б)

сплава с конкретным содержанием углерода при $\partial T/\partial \tau \approx T/\tau$ дает

$$v_{\text{карб}} = \int_{\tau(T_{\text{max}})}^{\tau(T_{\text{min}})} \bar{v}_{\text{карб}} \frac{dt'}{\tau(T)} \approx v_{\text{карб}} \chi, \quad (1)$$

где $\chi = \int_{\tau(T_{\text{max}})}^{\tau(T_{\text{min}})} \frac{dt'}{\tau(T)}$ — степень сенсбилизации в

данной точке ЗТВ с термическим циклом $T(t')$; $v_{\text{карб}}$ — содержание карбидов, соответствующие данной c -образной кривой на рис. 2, а.

В случае σ -фазы, когда интенсивность накопления зависит как от температуры, так и степени уже накопленной σ -фазы (рис. 2, б), интегрирование ведется по каждой c -образной кривой, соответствующей накопленной σ -фазе (рис. 2, б), т. е.

Значения $\tau(T)$ в зависимости от температуры для содержания углерода 0,11 и 0,08 %

$T, ^\circ\text{C}$	$C = 0,11 \%$	$C = 0,08 \%$
540	754,6	—
550	635,5	—
560	546,3	1000,0
570	419,8	894,1
580	300,8	793,5
590	233,9	719,4
600	122,3	629,4
610	85,5	555,3
620	79,6	502,4
630	73,6	444,1
640	67,7	401,8
650	62,5	364,7
660	58,0	338,7
670	53,6	327,6
680	48,3	306,5
690	46,1	327,6
700	44,6	343,5
710	43,1	375,3
720	45,4	417,6
730	47,6	470,6
740	50,6	613,5
750	55,0	931,2
760	58,0	1158,8
770	64,7	—
780	71,4	—
790	85,5	—
800	94,5	—

$$v_{\sigma} = \sum_{j=1} \bar{v}_{\sigma j} \int_{\tau(T_{\text{max}})}^{\tau(T_{\text{min}})} \frac{dt'}{\tau_j(T)}, \quad (2)$$

где $\bar{v}_{\sigma j}$ — цена j -й c -образной кривой на рис. 2, б.

Рассмотрим два конкретных примера. В конце октября 1997 г. в период проведения среднего планового ремонта на энергоблоке № 3 Чернобыльской АЭС был проведен 100%-й контроль 1451 стыкового соединения трубопровода Ду 300 первого контура многократной принудительной циркуляции. Из них 208 стыков имели дефекты, которые квалифицировались как трещины межкристаллитной коррозии под напряжением. Трубопроводы Ду 300 сечением 325×16 мм эксплуатировались с апреля 1981 г., материал труб — сталь 08X18H10T, стыки заварены проволокой марки 04X19H11M3, обеспечивающей низкое со-



держание углерода в металле шва (на уровне менее 0,06 %).

Межкристаллитные трещины были обнаружены в металле ЗТВ (рис. 3) вблизи внутренней поверхности. На рис. 4 приведен термический цикл, связанный со сваркой за шесть проходов (с учетом корневого прохода), согласно данным [5]. Использовали оцифрованную *c*-образную кривую из таблицы. Степень сенсibilизации по данным рис. 4 в зависимости от прохода следующая: корневой — 0,0085; 1 — 0,0529; 2 — 0,0536; 3 — 0,0306; 4, 5 — 0. Из этих данных видно, что $\chi_{\Sigma} \approx 0,15$, т. е. имеет место достаточно заметная степень сенсibilизации участков металла ЗТВ на внутренней поверхности трубы, что с учетом дополнительных факторов (напряженное состояние в металле ЗТВ на внутренней поверхности и наличие коррозионной среды — вода первого контура при температуре около 280 °С) способствовало зарождению и развитию повреждений — трещин межкристаллитной коррозии под напряжением. В ряде работ, например [5], показано, что вязкость разрушения металла ЗТВ стали 08X18H10T в районе рассматриваемых стыков Ду 300 находится на уровне 65 МПа·м^{1/2}, т. е. значительно ниже таковой за пределами ЗТВ, где нет сенсibilизации.

Рассмотрим еще один пример. В 2009 г. на блоке № 2 Ривненской АЭС в трубопроводе первого контура на отводе 90 Ду 273×20 в зоне сварного стыка присоединения к тройнику Ду 250 (рис. 5) возникла течь. Материал трубопровода — сталь 08X18H10T.

Методами неразрушающего контроля установлено, что имеет место трещинообразный сквозной дефект длиной около 150 мм на внутренней поверхности вдоль ЗТВ кольцевого шва с выходом на наружную поверхность в виде значительно меньшей длины окружной трещины (около 10 мм). Начало трещины на внутренней поверхности и конец на наружной имеют различные осевые координаты, отличающиеся на 20...30 мм, т. е. трещина развивалась не перпендикулярно оси трубы, а в плоскости под углом около 45° к этой оси. Если считать, что обнаруженный дефект — это трещина межкристаллитной коррозии под напряжением, то местом ее зарождения является сенсibilизированный участок ЗТВ на внутренней поверхности (рис. 6, а) в результате многопроходного (6–7 проходов) воздействия термических циклов, по типу приведенных на рис. 4. Трещина развивалась в течение длительного периода времени (блок введен в эксплуатацию в 1981 г.) под действием осевых напряжений σ_{xx} от внутреннего давления в трубе

$$\sigma_{xx}(P) = P \frac{R/\delta}{(2 + \delta/R)} \quad (3)$$

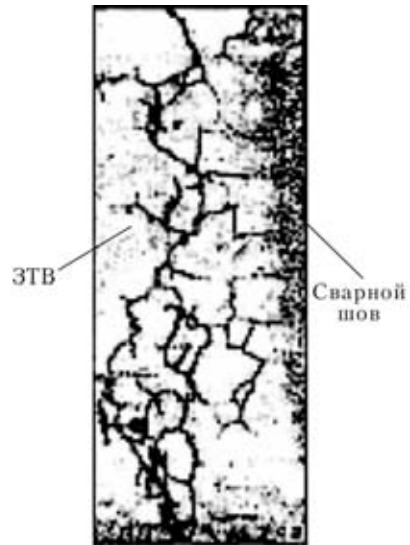


Рис. 3. Микроструктура (уменьш. 3/4) кольцевых эксплуатационных трещин в околошовной зоне сварного соединения Ду 300

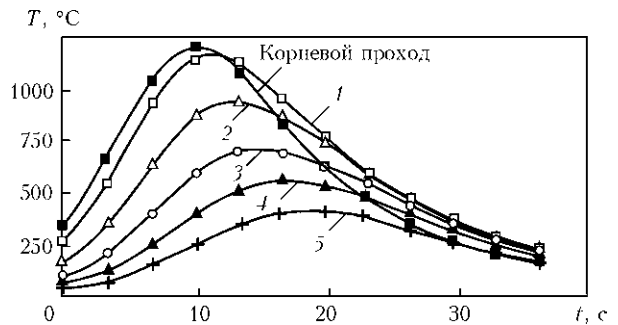


Рис. 4. Температурные циклы на внутренней поверхности при корневом проходе и последующих слоях (1–5)

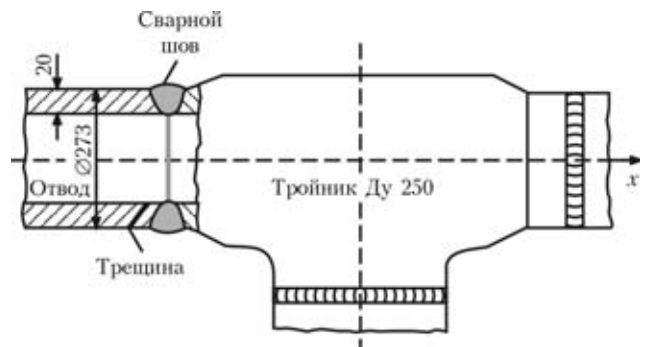


Рис. 5. Схема трещины в сварном соединении отвода с тройником

и остаточных сварочных напряжений [6]

$$\sigma_{xx}^{св} \approx -\sigma_0 \left[\cos \frac{\pi x}{2x_1} \right] \frac{2z}{\delta} \text{ при } 0 < x < x_1, -\delta/2 < z < \delta/2, \quad (4)$$

$$\sigma_{xx}^{св} \approx -\sigma_2 \left[\sin \frac{\pi(x-x_1)}{2(x_2-x_1)} \right] \frac{2z}{\delta} \text{ при } x_1 \leq x < x_2, -\delta/2 < z < \delta/2,$$

где R — внутренний радиус трубы.

Приближенные зависимости (4), описывающие результаты численных исследований для кольце-

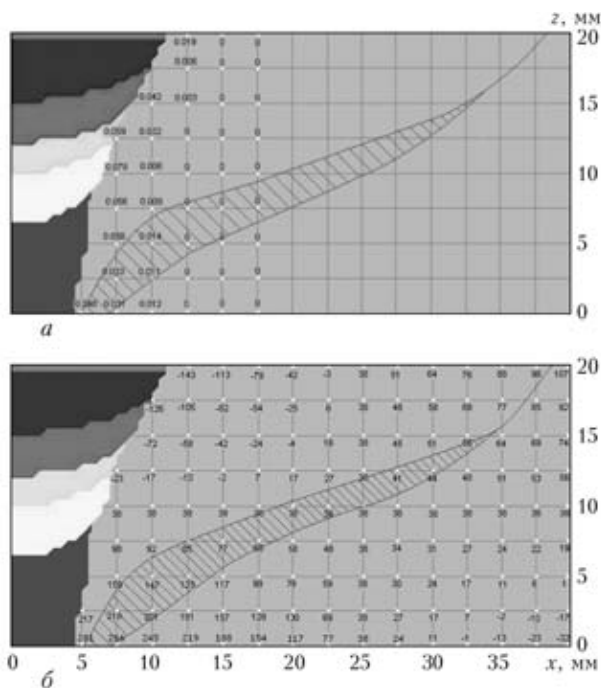


Рис. 6. Вероятная траектория трещины межкристаллитной коррозии под напряжением и расчетные значения χ_{Σ} при шестипроходной сварке стыкового шва ($\delta = 20$ мм, сталь 08X18H10T) (а) и поперечных напряжений σ_{zz} [МПа] (б)

вых сварных стыков труб из аустенитной стали, построены по данным работы [6]. Параметры распределения σ_0 , σ_2 , y_1 , y_2 в зависимости от $\sqrt{R\delta}$, q_{II}/δ и σ_T приведены в работе [6], т. е. для

$$R = \frac{243}{2} - 20 = 116,5 \text{ мм}, \sqrt{R\delta} = 48,3 \text{ мм},$$

$$q_{II} \approx 8372 \text{ Дж/см}^2, \sigma_T = 300 \text{ МПа}$$

получим

$$\sigma_0 = 270 \text{ МПа}, \sigma_2 = -75 \text{ МПа}, y_1 \approx 30 \text{ мм}, y_2 = 75 \text{ мм}.$$

Соответствующие результаты расчета суммы $\sigma_{xx}(P) + \sigma_{xx}^{CB} = \sigma_{xx}$ в различных точках (z, x) в стенке трубы в зоне сварного соединения приведены на рис. 6, б. Из этих данных видно, что траектория обнаруженного трещинообразного дефекта является результатом компромиссов между высокими значениями χ_{Σ} сенсибилизации материала в ЗТВ

и растягивающих напряжений σ_{xx} , что позволяет считать механизмом образования и развития обнаруженного дефекта межкристаллитную коррозию под напряжением.

Установка герметичной муфты в зоне указанного сквозного дефекта, при которой давление в зоне дефекта, одинаковое на внутренней поверхности трубы и на наружной (между стенками трубы и муфты), обеспечивала резкое снижение риска спонтанного роста дефекта, что позволило ввести в эксплуатацию 2-й блок Ривненской АЭС в разгар зимней кампании 2009 г. до предстоящего среднего ремонта в 2010 г.

Выводы

1. При сварке аустенитных сталей с содержанием углерода 0,08 % и более достаточно реальным является получение в околошовной зоне высокой степени сенсибилизации металла, связанной с чувствительностью к межкристаллитной коррозии под напряжением, а также охрупчиванием металла в ЗТВ.

2. Использование температурно-временных диаграмм образования карбидов и σ -фазы для аустенитных сталей соответствующего состава позволяет прогнозировать степень сенсибилизации металла по конкретному термическому циклу, что создает дополнительные возможности для управления структурой и свойствами в металле ЗТВ.

1. *Welding handbook. Materials and applications.* — Miami: AWS, 1998. — Pt 2. — 621 p.
2. *Eler J. W., Palmer T. A., Specht E. D.* Synchrotron based observations of sigma phase formation and dissolution in DSS / Ed. H. Cerjak // *Mathematical modelling of weld phenomena.* — 2006. — P. 297–315.
3. *Hell E. O., Alqie S. H.* The sigma phase // *Metallurgical Reviews.* — 1966. — 11. — P. 61–68.
4. *Металлургия и технология сварки титана и его сплавов /* Под ред. В. Н. Замкова. — Киев: Наук. думка, 1986. — 240 с.
5. *Коррозионно-механическая прочность сварных трубопроводов реакторов РБМК из аустенитных сталей /* А. С. Зубченко, И. Л. Харина, А. С. Рунов, В. О. Маханов // *Автомат. сварка.* — 2000. — № 10/11. — С. 48–56.
6. *Махненко В. И.* Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций. — Киев: Наук. думка, 2006. — 618 с.

The possibility is considered of using calculation methods to predict the risk of formation of the σ -phase in the HAZ metal of chrome-nickel steels at a carbon content of about 0.08 % or higher. It is shown that the use of temperature-time constitutional diagrams for steel of a corresponding composition, combined with temperature cycles at points in the HAZ metal, allows predicting the degree of sensitization of the corresponding HAZ region under different welding conditions.

Поступила в редакцию 14.04.2010