

УДК 621.791.75

# КИНЕТИКА ОБРАЗОВАНИЯ КАРБИДНЫХ ФАЗ ТИТАНА И НИОБИЯ В СВАРНОМ ШВЕ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

© 2013 Е.А. Кривоносова, Е.А. Синкина

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Поступила в редакцию 07.03.2013

Проведен анализ процессов структурообразования в металле сварных швов высоколегированной стали типа 08Х18Н10Т, полученных при ручной дуговой сварке электродами с различным типом покрытий – рутиловым (ОК61. 30) и основным (ЦЛ - 11). Решается задача подавления межкристаллитной коррозии путем инициирования связывания углерода в карбиды с титаном и ниобием, поступающими в сварной шов из покрытия.

**Ключевые слова:** сварной шов, высоколегированные аустенитные стали, межкристаллитная коррозия, карбидообразование

Высоколегированные аустенитные стали наиболее часто используют как коррозионностойкие. Основным требованием, которое предъявляется к сварным соединениям, является стойкость к различным видам коррозии. Межкристаллитная коррозия в металле шва возникает, как известно, в результате выделения из аустенита под действием термического цикла сварки карбидов хрома, приводящих к обеднению хромом приграничных объемов зерен. Основными причинами этого являются повышенное содержание в металле шва углерода и отсутствие или недостаточное содержание более сильных карбидообразователей (титана, молибдена, ниобия и др.). В металловедческой практике применяют следующие способы борьбы с межкристаллитной коррозией: снижение содержания углерода в стали до предела его растворимости (менее 0,03%); создание стали двухфазной аустенитно-ферритной структуры; введение в сталь элементов – стабилизаторов (Nb, Ti, V и др.), образующих карбиды более стойкие, чем карбиды хрома и связывающие избыточный углерод в металле; термическая обработка при 850°C и выше (стабилизация и аустенизация).

Установлено, что для получения сварных швов, удовлетворяющих поставленным требованиям, во многих случаях следует прибегать к комплексному легированию теми элементами, которые не содержатся в основном металле, и в то же время препятствовать обогащению шва примесями, имеющимися в свариваемой стали.

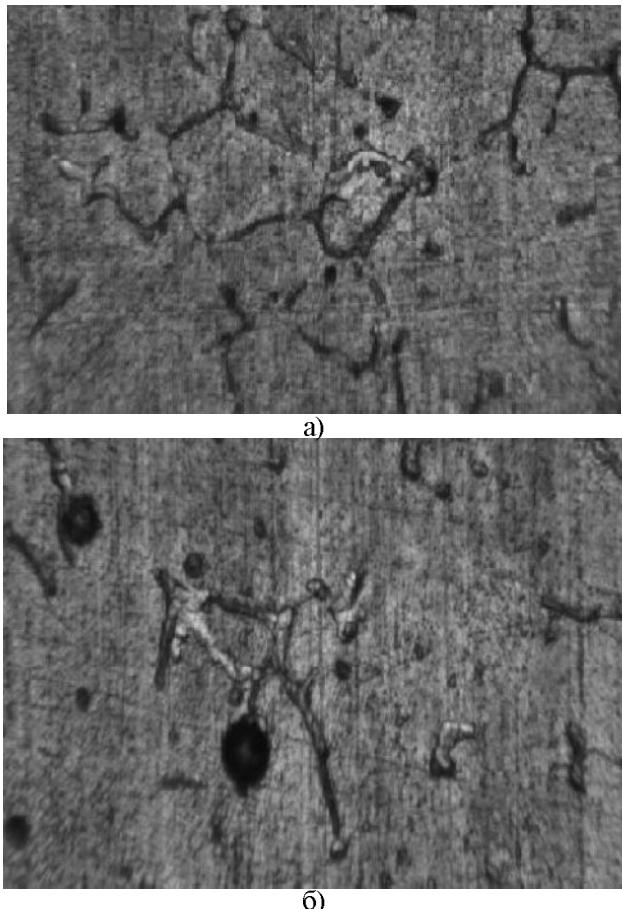
Кривоносова Екатерина Александровна, доктор технических наук, профессор кафедры «Сварочное производство и технология конструкционных материалов». E-mail: katerinakkkkk@mail.ru  
Синкина Елена Александровна, аспирантка. E-mail: svarka@pstu.ru

При сварке появляется еще одна дополнительная возможность подавления межкристаллитной коррозии – введение сильных карбидообразователей (Nb, Ti, V и др.) через электродное покрытие [1, 7-11]. Кроме того, не менее важным фактором, повышающим качество металла сварного шва, является возможность модификации структуры дисперсными частицами вторичных карбидных и нитридных фаз, которые образуются в результате окислительно-восстановительных реакций между компонентами электродного покрытия, газовой фазой и металлом как это показано в работах [5 ,6, 12, 15, 19, 20].

В работе исследуются процессы структурообразования в металле сварных швов высоколегированной стали 08Х18Н10Т, полученных при ручной дуговой сварке электродами с различным типом покрытий – рутиловым (ОК61. 30) и основным (ЦЛ - 11), и решается задача подавления МКК путем инициирования связывания углерода в карбиды Ti и Nb, поступающими в сварной шов из покрытия.

При исследовании структур швов, выполненных электродами обоих типов, было обнаружено, что структура не гомогенна, присутствуют светлые области δ-феррита, что подтверждено методами теплового окисления и теплового травления. На рис. 1. представлена структура металла сварных швов при увеличении ~x900 с иммерсионным маслом. В теле ферритного зерна образование любых карбидов затруднено вследствие недостатка углерода, однако прилегающие к ферритным прослойкам области аустенитного зерна склонны к межкристаллитной коррозии по обычному механизму. Тело зерна и граница зерна

являются структурно-напряженной коррозионной парой, то есть являются катодом и анодом соответственно. Форма  $\delta$ -феррита в сварных швах, выполненных электродами ЦЛ-11 и ОК61.30 различна, что говорит о разной скорости кристаллизации швов, следовательно, легирование  $\delta$ -феррита в этих швах различно. Исследования показали, что коррозионное разрушение швов, выполненных электродом ОК61.30, проходит преимущественно по межфазным границам, так как содержание Cr в них меньше.



**Рис. 1.** Структура сварных швов стали 08Х18Н10Т, выполненных электродами: а – ЦЛ-11, б – ОК61.30, при увеличении  $\sim x900$  с иммерсионным маслом

Химический анализ показал, что при сварке стали 08Х18Н10Т рутиловыми (ОК 61.30) электродами наплавленный металл имеет следующий состав: 0,03%С, 0,8%Mn, 0,8%Si, 0,009%Ti, 19%Cr, 10%Ni. При сварке основными (ЦЛ-11) электродами: 0,08%С, 1,3%Si, 2%Mn, 20%Cr, 10%Ni, 1,1%Nb. Участие титана и ниобийсодержащих компонентов электродного покрытия в структурообразовании металла шва изучали с помощью моделирования процессов дополнительного карбиообразования. При построении математической модели кинетики роста частиц TiC в сварном шве использовалось приближение Вагнера-Киркалди, данный подход для условий выделения фаз при

сварке низколегированной стали наиболее полно рассмотрен в работах [1-4]. На границе с включением устанавливается равновесная концентрация титана  $U_p$ . Начальная концентрация титана в металле шва (матрице) –  $U_0$ , концентрация во включении –  $U_b$ . Положение межфазной границы включение-матрица в начальный момент –  $X_0 = 0$ . Задача заключалась в нахождении для условий сварки распределения концентрации растворенного вещества (Ti) в диффузионной области с учетом особенностей охлаждения сварного шва –  $U(x, \tau, T)$ , где  $x$  – текущая координата,  $\tau$  – время,  $T$  – температура. Начальную температуру карбиообразования в твердой фазе устанавливали по приведенной математической модели, считая за температуру начала процесса ту, при которой равновесная концентрация титана на межфазной границе станет ниже концентрации Ti в матричном растворе. Иначе говоря, условием карбиообразования является соблюдение неравенства

$$U_p(T) < U(x, \tau, T).$$

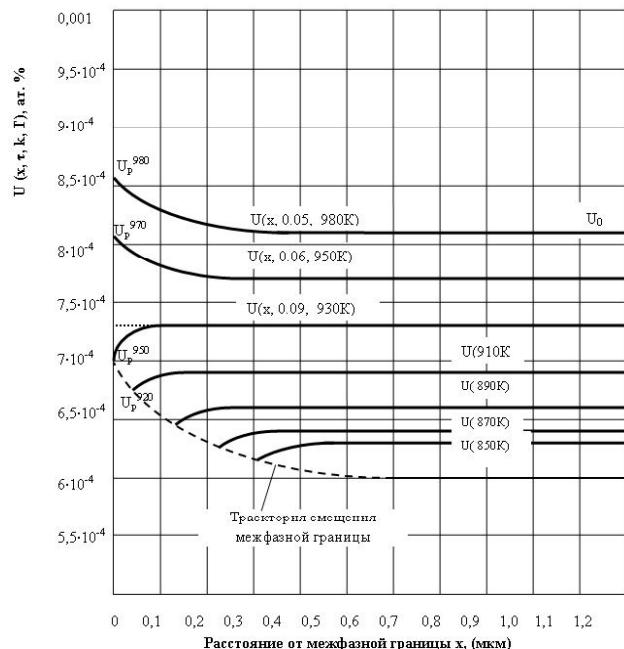
Расчет вели шаговым методом, условно считая процесс охлаждения дискретным. Значения  $U_0$  для каждого последующего шага задавались конечными значениями  $U(x)$  на предыдущем шаге. Шаг по температуре был выбран равным 20 К. Время нахождения металла шва в выбранном температурном интервале определяли по термическому циклу сварки (ТЦС), рассчитанному по формуле, полученной с использованием метода функций Грина для бесконечной пластины с нулевыми граничными условиями второго рода и нормально-кругового источника:

$$T = \frac{0,85 \cdot q}{4c \cdot \gamma \cdot (\sqrt{\pi} \cdot a)^3} \cdot \int_{t_0}^t \frac{1}{(\sqrt{\tau})^3} \exp \left[ -\frac{(x + V \cdot \tau)^2 + (y)^2}{4 \cdot \tau \cdot a} \right] \cdot \sum_{N=-\infty}^{\infty} \exp \left[ -\frac{(z + 2 \cdot N \cdot L)^2}{4 \cdot \tau \cdot a} \right] d\tau$$

$$\text{где } q \text{ – мощность дуги, } a \text{ – коэффициент температуропроводности, } c, \gamma \text{ – теплоемкость и плотность стали, } V \text{ – скорость сварки, } L \text{ – толщина листа, } t_0 \text{ зависит от коэффициента сосредоточенности дуги, } N \text{ – шаги суммирования, } x, y, z \text{ – координаты.}$$

На рис. 2 представлена совмещенная картина концентрационной ситуации вблизи растворящей частицы карбида титана для сварных швов стали 08Х18Н10Т, выполненных электродами с рутиловым покрытием (ОК 61.30). По модели рассчитаны два варианта концентрационной ситуации вблизи частицы TiC для сварных швов электродов с рутиловым покрытием (рис. 2) и с основным покрытием. Как видно из рис.

2, в интервале температур выше 930 К равновесная концентрация Ti больше фактической, т.е. карбидообразования TiC нет. Образование TiC начинается при температурах ниже 930 К, когда равновесная концентрация Ti на границе карбид-матрица становится меньше его концентрации в сварном шве. Для швов электродов с основным покрытием карбидообразование TiC согласно расчетным данным начинается при температуре 750 К. Реально при этих температурах диффузионные процессы, как Ti, так и C настолько заторможены, что эти данные можно использовать только ориентировочно.



**Рис. 2.** Распределение концентрации титана в диффузионной области у границы растущей частицы карбида титана для интервала температур 980-850 К для электродов с рутиловым покрытием (ОК 61. 30):

$U_0$  – начальная концентрация титана (в матрице);  $U_p^T$  – равновесная концентрация титана для температуры  $T$ ;  $U(x, t, k, T)$  – распределение концентрации титана по глубине диффузионной зоны  $x$  для времени  $t$  (с), константы  $k$  и температуры  $T$

Таким образом, в сварных швах стали 08Х18Н10Т, выполненных электродами с рутиловым покрытием, карбидообразование TiC при дополнительном влиянии компонентов электродного покрытия реально в интервале 930-900 К, диффузионная область имеет размеры в пределах 0,002-0,004 мкм; при сварке электродами с основным покрытием дополнительное карбидообразование TiC практически отсутствует.

По аналогичному алгоритму был проведен расчет концентрационной ситуации близи растущей частицы NbC в сварном шве электрода с основным покрытием на стали 08Х18Н10Т. Данный расчет показал, что температура начала

карбидообразования для NbC выше, чем для TiC (900 К и 780 К соответственно), т.е. задача подавления межкристаллитной коррозии при сварке электродом с основным покрытием решается путем инициирования связывания углерода преимущественно в карбиды ниобия.

Разработанная модель кинетики диффузионных процессов вблизи растущей частицы вторичной фазы TiC, NbC в сварных швах с рутиловым и основным электродным покрытием и полученные по ней результаты позволили уточнить основные закономерности образования карбидных фаз и пути повышения качества металла сварного шва. Коррозия может затрагивать не только металл шва, но также распространяться на все зоны сварного соединения: линию сплавления, участки зоны термовлияния и др. [13, 14, 16-19]. Предложенная математическая модель с некоторыми поправками может быть использована для прогнозирования аналогичных процессов и в этих областях с учетом теплового воздействия дуги на указанные зоны сварного соединения.

#### Выходы:

- Установлено, что форма зерен  $\delta$ -феррита в сварных швах стали 08Х18Н10Т, выполненных электродами ЦЛ-11 и ОК61.30, различна, что говорит о разной скорости кристаллизации швов, следовательно, легирование  $\delta$ -феррита в этих швах различно.

- Установлено, что в сварных швах на стали 08Х18Н10Т, выполненных электродами с рутиловым покрытием, карбидообразование при дополнительном влиянии компонентов электродного покрытия реально в интервале 930-900 К, диффузионная область имеет размеры в пределах 0,002-0,004 мкм.

- При сварке электродами с основным покрытием температура начала карбидообразования для NbC выше, чем для TiC (900 К и 780 К соответственно), т.о. задача подавления межкристаллитной коррозии при сварке электродами с основным покрытием решается путем инициирования связывания углерода преимущественно в карбиды ниобия.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

- Уточкин, В.В. Термодинамическая оценка условий выделения соединений Ti, N, C в Сварных швах стали Ст.3 при микролегировании титаном через электродное покрытие / В.В. Уточкин, В.М. Язовских, Е.А. Кривоносова и др. // Вестник ПГТУ. Механика и технология материалов и конструкций. 2000. №3. С. 68-73.
- Кривоносова, Е.А. Математическая модель кинетики роста частиц нитрида титана в сварном шве / Е.А. Кривоносова, В.М. Язовских, В.В. Уточкин, В.И. Шумяков // Сварочное производство. 2002. №7. С. 24-28.

3. Уточкин, В.В. Термодинамическое моделирование фазового состава стали 09Х16Н4Б в области температур 500-800°C / В.В. Уточкин, Е.А. Кривоносова, М.А. Коротаева, Н.В. Пальшин // Механика и технология материалов и конструкций. Вестник ПГТУ. 2003. №6. С. 177-185.
4. Кривоносова, Е.А. Микролегирование титаном при сварке углеродистых сталей / Е.А. Кривоносова, В.В. Уточкин, В.М. Язовских // Сварочное производство. 2001. №5. С. 6-9.
5. Кривоносова, Е.А. К проблеме формирования свойств наплавленного металла при сварке плавлением и наплавке / Е.А. Кривоносова, В.В. Уточкин, В.М. Язовских / Вестник ПГТУ. Механика и технология материалов и конструкций. 2001. №4. С. 72-75.
6. Кривоносова, Е.А. Формирование свойств наплавленного металла при сварке плавлением и наплавке / Е.А. Кривоносова, В.В. Уточкин, В.М. Язовских // Ремонт, восстановление. 2002. №10. С. 31-32.
7. Язовских, В.М. Структурные факторы хладостойкости сварных швов / В.М. Язовских, Е.А. Кривоносова, В.И. Шумяков и др. // Сварочное производство. 2002. № 1. С. 12-14.
8. Кривоносова, Е.А. Влияние неметаллических включений на развитие деформации сварных швов / Е.А. Кривоносова, В.М. Язовских, Н.В. Вылејснева // Тяжелое машиностроение. 2003. №12. С. 36-39.
9. Кривоносова Е.А. Фрактальный анализ структурообразования сварных швов // Сварочное производство. 2005. №7. С. 3-6.
10. Язовских, В.М. Оптимизация состава электродного покрытия с силикомарганцем в качестве раскислителя / В.М. Язовских, Е.А. Кривоносова, В.И. Шумяков, И.Ю. Летягин // Сварка в Сибири. 2005. №2. С. 46-48.
11. Кривоносова, Е.А. Влияние режима сварки на структуру и свойства зоны термического влияния сталей с карбонитридным упрочнением / Е.А. Кривоносова, В.М. Язовских, О.А. Рудакова, Г.В. Встовский // Тяжелое машиностроение. 2009. №7. С. 23-27.
12. Кривоносова, Е.А. Влияние состава электродного покрытия на процессы структурообразования в сварных швах высоколегированных сталей / Е.А. Кривоносова, Е.С. Саломатова, О.А. Рудакова // Кривоносова, Е.А. Структурные особенности деформирования сварных швов высоколегированных сталей / Е.А. Кривоносова, О.А. Рудакова, Е.С. Саломатова, А.И. Горчаков // Сварка и диагностика. 2011. № 3. С. 14-17.
13. Кривоносова, Е.А. Разработка методики исследования коррозионной усталости сварных соединений магистральных газонефтепроводов / О.А. Рудакова, Е.А. Кривоносова, Е.С. Захарова, М.Х. Арипов // Вестник ПГТУ. Машиностроение и материаловедение. 2010. Том 12, №2. С. 58-64.
14. Кривоносова, Е.А. Мультифрактальный анализ структурного состава зоны термического влияния сталей с карбонитридным упрочнением / Е.А. Кривоносова, О.А. Рудакова, Г.В. Встовский // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2010. № 6. С. 26-31.
15. Кривоносова, Е.А. Исследование взаимосвязи между структурным составом зоны термического влияния и коррозионной стойкостью стали ЭП-56 различных плавок / Е.А. Кривоносова, Е.А. Синкина, О.А. Рудакова // Вестник ПГТУ. Машиностроение и материаловедение. 2011. Том 12, №1. С. 32-41.
16. Синкина, Е.А. Влияние типа покрытия электрода на коррозионную стойкость металла шва стали 08Х18Н10Т / Е.А. Синкина, Е.А. Кривоносова // Вестник ПГТУ. Машиностроение и материаловедение. 2011. Том 13, №2. С. 79-85.
17. Кривоносова, Е.А. Структурные особенности деформирования сварных швов высоколегированных сталей / Е.А. Кривоносова, О.А. Рудакова, Е.С. Саломатова, А.И. Горчаков // Сварка и диагностика. 2011. № 3. С. 14-17.
18. Кривоносова, Е.А. Влияние типа покрытия электродов на коррозионную стойкость металла шва стали 08Х18Н10Т / Е.А. Кривоносова, Е.А. Синкина, А.И. Горчаков // Сварочное производство. 2012. №4. С. 38-41.
19. Кривоносова, Е.А. Оценка размеров зоны повышенной пластической деформации при усталостном разрушении металла сварного шва // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. 2012. Т. 14, № 2. С. 71-76.
20. Кривоносова, Е.А. Влияние состава электродного покрытия сварочных электродов рутилового типа на структурообразование и сопротивление хрупкому разрушению металла шва // Е.А. Кривоносова, В.М. Язовских, В.В. Уточкин, Н.В. Вылејснева // Сварочное производство. 1997. №2. С. 17-22.

## KINETICS OF FORMATION THE CARBIDE PHASES OF TITAN AND NIOBIUM IN HIGH-ALLOYED STEELS WELD

© 2013 E.A. Krivonosova, E.A. Sinkina

Perm National Research Polytechnical University

The analysis of structure formation processes in metal of high-alloyed steel type 08X18H10T weld, received at manual arc welding by electrodes with various type of coverings – rutile (OK61. 30) and basic (CL - 11) is carried out. The problem of suppression of intercrysalline corrosion by initiation of binding the carbon in carbides with titan and niobium arriving in a weld from covering is solved.

Key words: *weld, high-alloyed austenitic steels, intercrysalline corrosion, carbide-formation*

*Ekaterina Krivonosova, Doctor of Technical Sciences, Professor  
at the Department "Welding Production and Technology of  
Constructional Materials". E-mail: katerinakkkk@mail.ru  
Elena Sinkina, Post-graduate Student. E-mail: svarka@psstu.ru*