

УДК 621.791

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО ЦИКЛА СВАРКИ НА ТРАНСФОРМАЦИЮ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В ЗОНЕ ТЕРМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ ПРИ СВАРКЕ СТАЛИ 16Г2АФ

© 2013 Е.А. Кривоносова, Т.В. Лодягина

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Поступила в редакцию 01.11.2013

Рассмотрена трансформация оксисульфидных включений в структуре высокопрочной стали 16Г2АФ при различных скоростях охлаждения, имитирующих различные сварочные процессы. Проанализировано влияние формы и размера неметаллических включений на усталостные характеристики образцов, охлаждаемых с различной скоростью.

Ключевые слова: *неметаллические включения, зона термического влияния, термический цикл сварки, скорость охлаждения, малоцикловая усталость, структура*

Высокопрочная сталь 16Г2АФ за счет комплексного микролегирования и специальной обработки (контролируемой прокатке) обладает высокой прочностью, низким порогом хладноломкости, хорошей свариваемостью и используется при сооружении таких сварных конструкций, как резервуары высокого давления, железнодорожные и автомобильные мосты, магистральные трубопроводы [1, 2]. Надежность и долговечность указанных конструкций во многом будет определяться физико-химическими процессами и структурными превращениями, происходящими в металле в процессе сварки [3-12]. Под действием сварочного источника тепла в металле происходит изменение структуры и трансформация сульфидов и оксидов железа и марганца [13-16]. Появление в стали 16Г2АФ структуры бейнита и мартенсита при скоростях охлаждения свыше 20°C/с приводит к уменьшению ударной вязкости участка зоны термического влияния (ЗТВ) [17], а также влияет и на характер распространения трещины. Так как оксисульфидные включения являются главными концентраторами напряжений в структуре, их форма и размеры также существенно влияют на зарождение и траекторию движения трещины [13].

Разрушение сварных конструкций чаще всего происходит именно в ЗТВ, структура и свойства которой зависят от параметров термического цикла сварки (например, скорости охлаждения ω_{65} в интервале критических температур 600-500°C). Также следует отметить, что наиболее опасным участком ЗТВ является участок полной перекристаллизации (максимальная температура нагрева достигает 1350°C), так как в зависимости от режимов сварки и, соответственно, реализуемых скоростей

охлаждения на этом участке возможно образование как ферритных, так и бейнитных и мартенситных структур [18, 19]. Кроме того, под действием источника тепла в металле протекают физико-химические процессы, влияющие на форму и размеры неметаллических включений. В связи с малой протяженностью опасного участка ЗТВ реального сварного соединения для исследования использовалась методика имитации термических циклов сварки, позволяющая воспроизводить на образцах структуру любой точки ЗТВ за счет достижения различных скоростей охлаждения [20].

После определения микротвердости и металлографического анализа имитированных образцов из стали 16Г2АФ были выявлены их структура и изменение формы и размеров неметаллических включений в зависимости от скорости охлаждения ω_{65} . Высокий комплекс свойств основного металла стали 16Г2АФ закладывается при контролируемой прокатке, которая способствует получению мелкодисперсной ферритно-перлитной структуры с наличием вытянутых вдоль направления прокатки оксисульфидных строчечных включений (рис. 1). На рис. 1 представлены фотографии микроструктуры и неметаллических включений исследованных образцов. При анализе формы и размеров неметаллических включений внимание уделялось трансформации строчечных неметаллических включений (в виде пленок), так как именно такая форма ответственна за низкую пластичность металла [13].

Таким образом, термический цикл сварки значительно влияет на форму и размеры строчечных оксисульфидных неметаллических включений в зоне полной перекристаллизации стали 16Г2АФ (рис. 1б). Процесс трансформации неметаллических включений в ходе термической обработки связан с их частичным оплавлением, растворением в матрице, последующим перемещением к границе вновь сформированных зерен, выделением в виде дисперсных или пленочных образований и коалесценцией вследствие диффузии [13, 14, 21].

Кривоносова Екатерина Александровна, доктор технических наук, профессор кафедры «Сварочное производство и технология конструкционных материалов». E-mail: katerinakkkk@mail.ru

Лодягина Татьяна Валерьевна, старший преподаватель кафедры «Сварочное производство и технология конструкционных материалов». E-mail: talod@rambler.ru

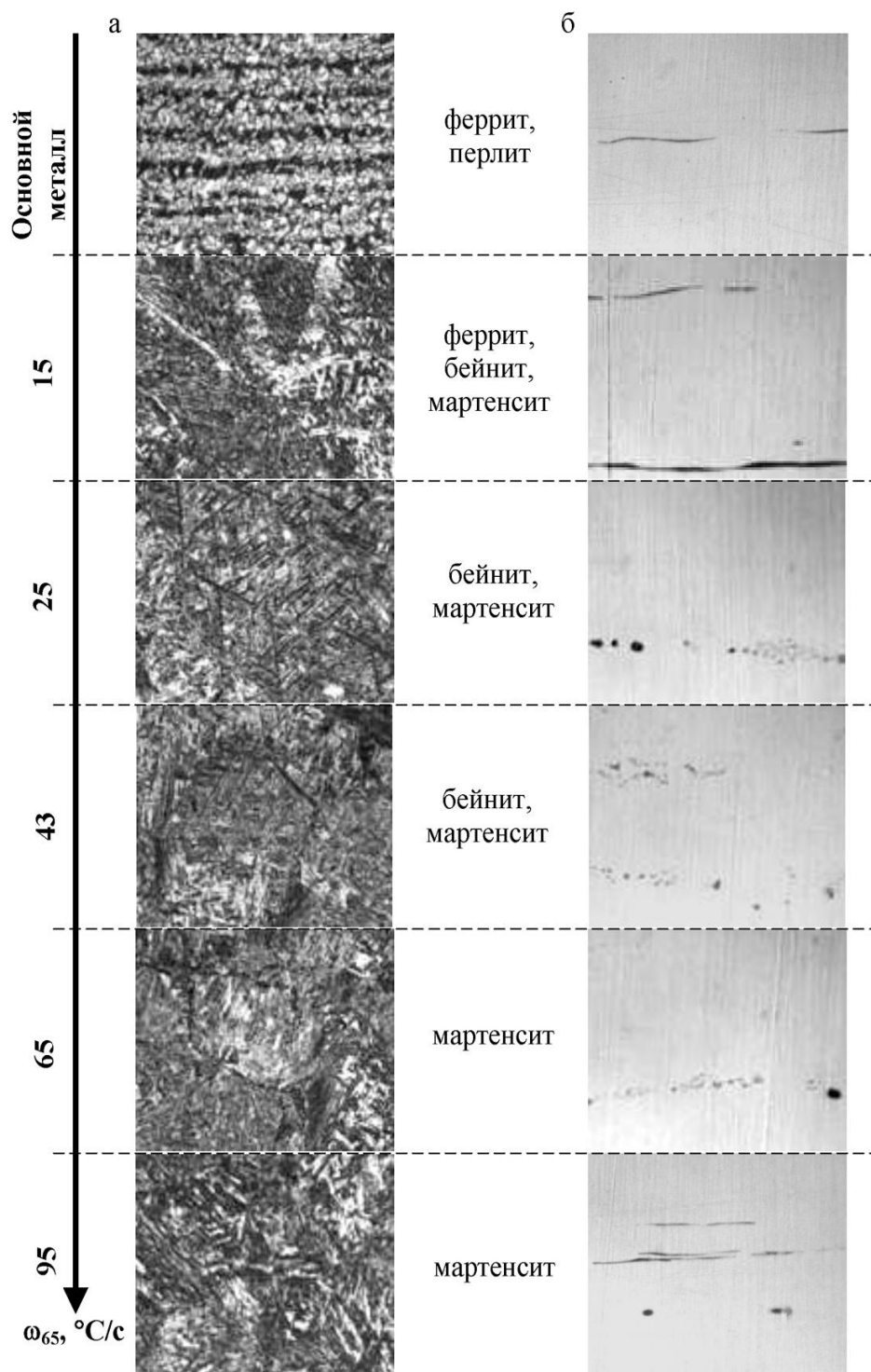


Рис. 1. Результаты металлографического анализа образцов стали 16Г2АФ, прошедших имитацию термического цикла сварки при различных скоростях охлаждения ω_{65} : а – микроструктура (x150); б – неметаллические включения (x500)

Так, при быстрых скоростях охлаждения ($\omega_{65} = 95^\circ\text{C}/\text{c}$) неметаллические включения не успевают полностью раствориться в матрице. С уменьшением скорости охлаждения, когда металл более длительное время находится при высоких температурах, наблюдается более полное растворение включения ($\omega_{65} = 65^\circ\text{C}/\text{c}$). При средних скоростях охлаждения ($\omega_{65} = 43^\circ\text{C}/\text{c}$) происходит полное растворение строчечных включений и выделение их в виде мелкодисперсных цепочек. При дальнейшем

уменьшении скорости охлаждения происходит коалесценция включений с образованием сначала более крупных частиц, расположенных в строчку ($\omega_{65} = 25^\circ\text{C}/\text{c}$), а затем и сплошных строчечных включений ($\omega_{65} = 15^\circ\text{C}/\text{c}$).

Конструкции из рассматриваемой стали, например, магистральные трубопроводы, работают как при статических, так и при знакопеременных нагрузках [18, 22], и целесообразным становится оценивать влияние неметаллических

включений на малоцикловую усталость стали 16Г2АФ. В табл. 1 приводятся сведения о результатах испытания на малоцикловую усталость исследуемых образцов. Испытание имитированных образцов с V-образным концентратором глубиной 1,5 мм на малоцикловую усталость проводились следующим образом. В процессе испытания консолюно-закрепленный образец подвергался плоскому изгибу по отнулевому циклу нагружения. В ходе циклического нагружения фиксировалось расстояние, на которое удалилась трещина от концентратора по высоте образца, и соответствующее число циклов нагружения. Образцы доводились до разрушения. После обработки результатов испытания

были определены такие параметры усталостного разрушения, как теоретическая длительность периода до появления трещины N_0 и длительность периода до разрушения N_k (долговечность) при скоростях охлаждения образцов ω_{65} , достигнутых при имитации термических циклов сварки. Объемная доля неметаллических включений в структуре образцов оценивалась с помощью программного комплекса для обработки и анализа изображений «ВидеоТест–Металл 1.0» при осреднении результата в результате обработки 10 фотографий для каждого имитированного образца.

Таблица 1. Результаты исследования структуры и сопротивления малоцикловой усталости стали 16Г2АФ в зависимости от скорости охлаждения ω_{65}

$\omega_{65}, ^\circ\text{C}/\text{с}$	15	25	43	65	95
структура	феррит, бейнит, мартенсит	бейнит, мартенсит	бейнит, мартенсит	мартенсит	мартенсит
N_0 , шт.	6820	9037	25140	18240	57840
N_k , шт.	206000	85800	135400	141600	176700
доля включений, об. %	0,17	0,22	0,22	0,18	0,12

На основании полученных данных можно сделать следующие выводы о влиянии формы и размеров неметаллических включений на сопротивление стали малоцикловой усталости. При $\omega_{65}=15^\circ\text{C}/\text{с}$ наблюдается малая длительность периода до зарождения трещины даже при наличии в структуре небольшой доли феррита (пластичной структурной составляющей) и малой объемной доле неметаллических включений (табл. 1). Вероятно, это связано с тем, что в данном случае под действием термического цикла сварки успевают образоваться оксисульфидные включения в виде пленок достаточной протяженности и толщины (рис. 1б), которые и будут являться главными концентраторами напряжений в процессе зарождения усталостной трещины. При средних скоростях охлаждения 25 и 43 $^\circ\text{C}/\text{с}$ в структуре образуются бейнит и мартенсит при одинаковой объемной доле неметаллических включений. Однако при $\omega_{65}=25^\circ\text{C}/\text{с}$ наблюдаются более крупные частицы, расположенные в строчку, чем при $\omega_{65}=43^\circ\text{C}/\text{с}$, что приводит к малой длительности периода как до зарождения трещины, так и до разрушения образцов.

Выводы:

1. В зоне полной перекристаллизации стали 16Г2АФ под действием термического цикла сварки наблюдается трансформация неметаллических включений. На форму и размеры включений оказывает влияние скорость охлаждения в интервале температур 600-500 $^\circ\text{C}$ как параметр термического цикла сварки.

2. Форма и размеры оксисульфидных включений оказывают заметное влияние на характеристики сопротивления стали 16Г2АФ малоцикловой усталости. Независимо от количества неметалли-

ческих включений наличие феррита замедляет процесс зарождения трещины; при наличии бейнитно-мартенситной структуры неметаллическую включения ускоряют как процесс зарождения, так и процесс распространения усталостной трещины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Гольдштейн, М.И. Специальные стали: учебник для вузов / М.И. Гольдштейн, С.В. Грачев, Ю.Г. Векслер. – М.: Металлургия, 1985. 408 с.
2. Березин, В.Л. Сварка трубопроводов и конструкций: учебник для вузов / В.Л. Березин, А.Ф. Суворов. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1983. 328 с.
3. 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.
4. Krivosova, E.A. Mathematical model of the kinetics of growth of titanium nitride particles in a welded joint / E.A. Krivosova, V.M. Yazovskikh, V.V..Utochkin, V.I. Shumyakov // Welding International. 2002. Vol. 16, N 12. P. 974-979.
5. Кривоносова, Е.А. Влияние режима сварки на структуру и свойства зоны термического влияния сталей с карбонитридным упрочнением / Е.А. Кривоносова, О.А. Рудакова, Г.В. Встовский // Тяжелое машиностроение. 2009. № 7. С. 23-27.
6. 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.
7. 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, материаловедение. 2011. Т. 13, №1. С. 32-41.
8. Синкина, Е.А. Влияние типа покрытия электрода на коррозионную стойкость металла шва стали

- 08X18H10T / Е.А. Синкина, Е.А. Кривоносова // Вестник ПГТУ. Машиностроение и материаловедение. 2011. Т. 13, №2. С. 79-85.
9. 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.
10. Кривоносова, Е.А. Влияние структуры отдельных слоев сварных швов стали 10Г2ФБЮ на сопротивление усталостному разрушению / Е.А. Кривоносова, О.А. Рудакова // Сварочное производство. 2012. №11. С. 6-9.
11. Кривоносова, Е.А. Анализ критериев оценки усталостных свойств металла сварных швов (часть 1) / Е.А. Кривоносова, А.И. Горчаков // Тяжелое машиностроение. 2013. № 3. С. 29-33.
12. Кривоносова, Е.А. Анализ критериев оценки усталостных свойств металла сварных швов (часть II) / Е.А. Кривоносова, О.А. Рудакова, А.И. Горчаков, Ю.В. Щербаков // Тяжелое машиностроение. 2013. № 8. С. 35-38.
13. Металлы и сплавы. Анализ и исследование. Физико-аналитические методы исследования металлов и сплавов. Неметаллические включения: Справочник / Б.К. Барахтин, А.М. Немец; Под ред. Б.К. Барахтина. – СПб.: НПО «Профессионал», 2006. 490 с.
14. Ольшанская, Т.В. Термодинамическая оценка условий трансформации неметаллических включений в околошовной зоне сварных соединений низколегированных сталей // Вестник ПГТУ. Машиностроение, материаловедение. 2010. Т. 12, № 1. С. 92-102.
15. Кривоносова, Е.А. Влияние неметаллических включений на развитие деформации сварных швов / Е.А. Кривоносова, О.А. Рудакова, А.И. Горчаков, Ю.В. Щербаков // Тяжелое машиностроение. 2003. № 12. С. 36-39.
16. Кривоносова, Е.А. Структурные аспекты усталостного разрушения металла сварных швов / Е.А. Кривоносова, В.М. Язовских, Н.Н. Вассерман // Тяжелое машиностроение. 2005. №9. С. 20-23.
17. Кривоносова, Е.А. Влияние режима сварки на структуру и свойства зоны термического влияния сталей с карбонитридным упрочнением / Е.А. Кривоносова, В.М. Язовских, Н.Н. Вассерман // Тяжелое машиностроение. 2009. №7. С. 23-27.
18. Гумеров, А.Г. Трещиностойкость металла труб нефтепроводов / А.Г. Гумеров, К.М. Ямалаев, Г.В. Журавлев, Ф.И. Бадиков. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2001. 231 с.
19. Шоришоров, М.Х. Фазовые превращения и изменения свойств стали при сварке: Атлас / М.Х. Шоришоров, В.В. Белов. – М.: «Наука», 1972. 220 с.
20. Ольшанская, Т.В. Разработка методики исследования влияния параметров режима сварки на свойства зоны термического влияния микролегированных сталей 16Г2АФ и 10Г2ФБ / Т.В. Ольшанская, О.А. Рудакова, Т.В. Лодягина // Перспективные технологии и материалы. Материалы междунаучно-техн. конф. г. Пермь, 24 ноября 2008 г. – Пермь, ПГТУ, 2008. С. 45-51.
21. Ольшанская, Т.В. Влияние термического цикла сварки на кинетику изменения формы и размеров неметаллических включений в зоне термического влияния низколегированных сталей / Т.В. Ольшанская, Е.М. Федосеева, М.Н. Игнатов // Вестник ПГТУ. Машиностроение, материаловедение. 2011. Т. 13, № 1. С. 20-27.
22. Кривоносова, Е.А. Определение характеристик сопротивления усталости многослойных сварных швов стали 10Г2ФБЮ / Е.А. Кривоносова, О.А. Рудакова // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. 2012. Т. 14, № 2. С. 29-36.

INFLUENCE OF THE WELDING THERMAL CYCLE ON THE TRANSFORMATION OF NONMETALLIC INCLUSIONS IN THE ZONE OF THERMAL INFLUENCE AT WELDING THE STEEL 16G2AF

© 2013 Е.А. Krivonosova, Т.В. Lodyagina

Perm National Research Polytechnical University

Transformation of oxide-sulphide inclusions in structure of high-strength steel 16G2AF at various speeds of cooling, imitating various welding processes is considered. Influence of form and amount of nonmetallic inclusions on fatigue characteristics of the samples, cooled with a various speed, are analyzed.

Key words: *nonmetallic inclusions, zone of thermal influence, welding thermal cycle, cooling speed, low-cycle fatigue, structure*

Ekaterina Krivonosova, Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department "Welding Production and Technology of Constructional Materials". E-mail: katerinakkkk@mail.ru
Tatiana Lodyagina, Senior Teacher at the Department "Welding Production and Technology of Constructional Materials". E-mail: talod@rambler.ru