

УДК 621.791: 621.791.92: 621.31

Ефименко Н. Г., Атоженко О. Ю.

### **СТОЙКОСТЬ ПРОТИВ ХРУПКОГО РАЗРУШЕНИЯ И МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ОБЛАСТИ ЗОНЫ ТЕРМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ ПРИ СВАРКЕ ПОПЕРЕЧНОЙ ГОРКОЙ ТОЛСТОСТЕННЫХ ЛИТЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ СТАЛИ 15X1M1ФЛ**

В настоящее время сварка и заварка дефектов крупных отливок из стали 15X1M1ФЛ производится по сложной технологии, предусматривающей многослойную ручную дуговую сварку с предварительным и сопутствующим подогревом и послесварочную термическую обработку в виде высокого отпуска, которые требуют больших энергозатрат. Однако бывают ситуации, при которых затруднительно или невозможно проводить операции подогрева и термической обработки, поэтому актуальной является задача изыскания и научного обоснования возможности применения таких технологий сварки, которые позволяют получать оптимальные свойства соединений без предварительного (сопутствующего) подогрева и послесварочной термической обработки.

Известен способ многослойной сварки поперечной горкой крупногабаритных конструкций, который применяется для хорошо свариваемых низколегированных сталей без подогрева и термической обработки и обеспечивает оптимальную структуру и требуемые механические свойства сварным соединениям [1–3]. Применительно к теплоустойчивым сталям типа 15X1M1ФЛ данный способ сварки исследовался недостаточно, хотя внедрение его в производство может дать значительную экономию средств при сокращении энергозатрат и уменьшении трудоёмкости изготовления арматуры и корпусов турбинных установок.

Целью данной работы является изучение влияния сварки поперечной горкой без предварительного подогрева стали 15X1M1ФЛ на стойкость против хрупкого разрушения и исследование морфологических особенностей структуры зоны термического влияния (ЗТВ), возникающей при этом.

Материалом для исследования послужили сварные соединения заготовок из стали 15X1M1ФЛ, которые были отлиты в заводских условиях и термообработаны по режиму – Нормализация 970–1000 °С; Отпуск 720–750 °С. Размеры заготовок: Ø120 мм, длина 300 мм. Вдоль длины заготовок механическим способом в средней их части производились выборки металла шириной 40 мм и глубиной 60 мм, которые заваривались многослойной ручной дуговой сваркой способом поперечной горки без предварительного подогрева электродами Ø4 мм марки ТМЛ–ЗУ. Сварка выполнялась на постоянном токе обратной полярности ( $I_{св} = 160–180\text{А}$ ,  $U_d = 26\text{В}$ ). При этом обеспечивался угол наклона свариваемых заготовок с разделкой относительно горизонтальной плоскости в пределах 25–30 °С. После сварки одна часть заготовок оставалась нетермообработанной, а другая – отпускалась в заводской печи при температуре 720–750 °С с выдержкой 3 ч согласно штатной технологии.

Изменение температуры нагрева в ЗТВ контролировалось хромель-алюмелевыми термопарами, которые зачеканивались на расстояниях 2, 3, 4 и 7 мм от свариваемых кромок выборок. Показания термопар фиксировались на приборе ЭПП – 09МЗ с построением графиков изменения температуры. Анализ результатов замеров показал, что на расстоянии ~ 2 мм от свариваемой кромки максимальная температура ЗТВ составляла ~ 630–660 °С. Следовательно, высокотемпературная область ЗТВ распространяется на небольшую глубину от границы сплавления (~ 1 мм).

Для проведения макроанализа и измерения твёрдости по НV заготовки разрезались в поперечном направлении относительно оси швов на темплеты толщиной 12–13 мм. Твёрдость измерялась с обеих сторон сечения швов на трёх уровнях по высоте (10, 25 и 40 мм),

после чего вырезались образцы с острым надрезом для определения ударной вязкости (KCV). Места вырезки образцов выбирались таким образом, чтобы острие надреза фиксировалось в высокотемпературной области ЗТВ, металле шва и основном металле (рис. 1).

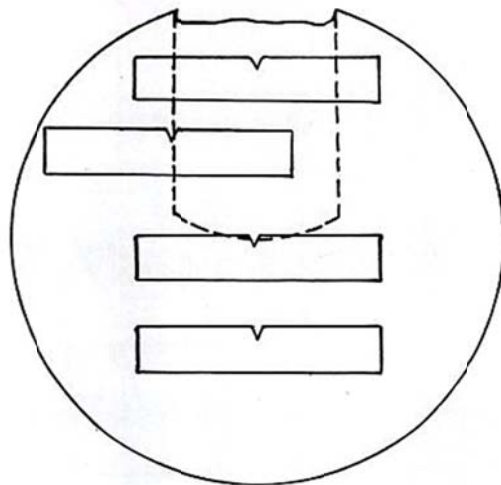


Рис. 1. Схема вырезки ударных образцов с острым надрезом (Шарпи) из различных участков сварных соединений стали 15Х1М1ФЛ, выполненных способом поперечной горки

Испытания образцов проводились при пониженных и повышенных температурах (от  $-60$  до  $+100$  °С). При каждой температуре испытывали от 3 до 5 образцов, полученные результаты усредняли.

Микроструктуру исследовали в верхней, средней и корневой части соединений. Травление микрошлифов осуществлялось двумя реактивами: для выявления микроструктуры – в 4 % спиртовом растворе  $\text{HNO}_3$ ; для выявления границ зёрен в ЗТВ и наплавленном металле – в пересыщенном водном растворе пикриновой кислоты с добавлением ПАВ. Величина зерна определялась сравнением со стандартной шкалой баллов ГОСТ 5639–82 и методом случайных секущих [4] с подсчетом средних условных диаметров ( $\overline{D}_{\text{усл}}$ ).

При макроанализе установлено, что металл сварных швов имеет высокую сплошность, дефектов не выявлено, ширина зоны термического влияния составляет 2,5–3,8 мм. Микроструктура ЗТВ в высокотемпературной области нагрева при сварке состоит преимущественно из бейнита зернистой морфологии [5, 6].

На рис. 2 представлены графики изменения твёрдости по сечению швов [7], из которых видно, что после сварки способом поперечной горки без предварительного подогрева твёрдость высокотемпературной области ЗТВ и наплавленного металла по сравнению с основным металлом значительно повышается. Так, в образцах, не подвергавшихся после сварки термической обработке, максимальная твёрдость вблизи границы сплавления в ЗТВ достигает  $\sim 280$  HV, а в металле шва –  $\sim 315$  HV. Однако, эти максимальные значения твёрдости ниже допустимых норм для стали 15Х1М1ФЛ, свариваемой по производственной технологии [8].

Повышение твердости после сварки свидетельствует об образовании структур частичной закалки с различным соотношением бейнита и мартенсита, количество которых зависит от скорости охлаждения, влияющей также на формирование морфологии самого бейнита [9]. Сопоставление полученных значений твердости с данными диаграммы неизотермического распада аустенита стали 15Х1М1ФЛ, приведенной в работе [10], показывает, что при сварке поперечной горкой без подогрева в ЗТВ образуется верхний бейнит (до 70 %), а оставшийся переохлажденный аустенит (с повышенным содержанием углерода) превращается частично в мартенсит с сохранением остаточного аустенита.

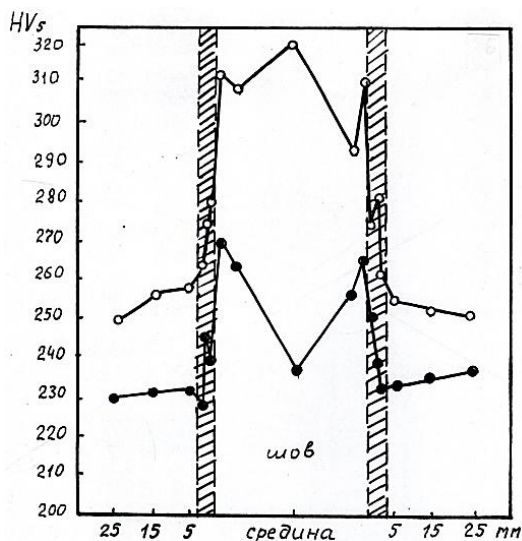


Рис. 2. Изменение твердости сварных соединений из стали 15X1M1ФЛ, выполненных способом поперечной горки без предварительного подогрева:

- – без термической обработки после сварки;
- – с высоким отпуском после сварки

Одним из критериев оценки склонности к хрупкому разрушению является ударная вязкость, определяемая при испытании стандартных ударных образцов с острым надрезом (KCV).

На графиках рис. 3, 4 представлены результаты испытаний, проведенные в данной работе. Сравнение графиков показывает, что как в состоянии после сварки без термической обработки, так и после высокого отпуска, при всех температурах испытания ударная вязкость в высокотемпературной области ЗТВ (несмотря на повышенную твердость) значительно выше, чем в основном металле. В наплавленном металле ударная вязкость также выше, чем в основном, особенно в отпущенном состоянии. Полученные результаты указывают на то, что после сварки способом поперечной горки в зоне термического влияния вблизи границы сплавления образуется структура с более высоким сопротивлением хрупкому разрушению по сравнению со структурой основного и наплавленного металла. При этом переходная критическая температура хрупкости смещается к отрицательным температурам.

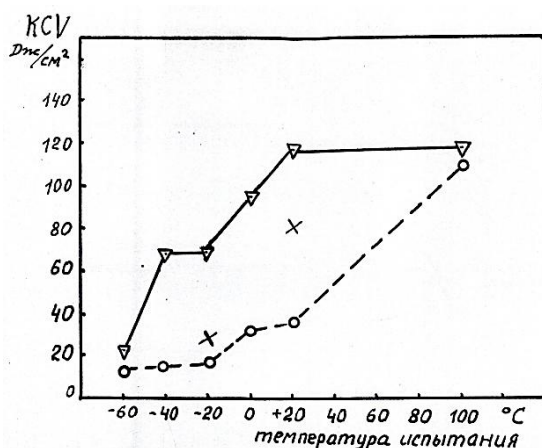


Рис. 3. Изменение ударной вязкости образцов Шарпи, вырезанных из различных участков сварного соединения стали 15X1M1ФЛ, выполненного способом поперечной горки без подогрева и не подвергавшегося после сварки термической обработке:

- ▽—▽ – ЗТВ; x – наплавленный металл; ○—○ – основной металл

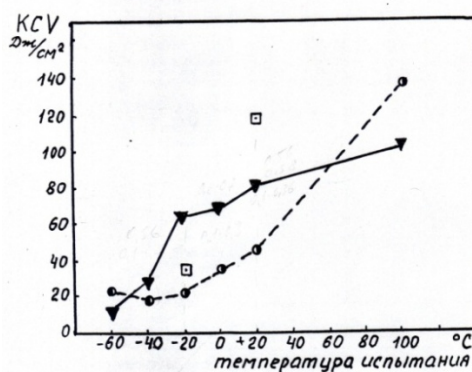


Рис. 4. Изменение ударной вязкости образцов Шарпи, вырезанных из различных участков сварного соединения стали 15X1M1ФЛ, выполненного способом поперечной горки без подогрева и подвергнутого высокому отпуску после сварки:

▼ — ЗТВ; □ — наплавленный металл; ● — основной металл

Стойкость против зарождения и развития трещин сварных соединений из низколегированных теплоустойчивых сталей определяется, прежде всего, структурным состоянием металла [11]. Металлографические исследования показали, что на всех уровнях сварных соединений, полученных способом поперечной горки без подогрева, в ЗТВ и наплавленном металле образуется структура, состоящая из верхнего и преимущественно зернистого бейнита. Как известно, образование зернистого бейнита происходит в области высоких температур превращений (700–500 °С) при непрерывном охлаждении, и многие исследователи получение данной структуры при сварке считают целесообразным, что подтверждается результатами данной работы. Однако, следует отметить некоторые особенности строения бейнитных структур, хотя они не отражаются на твердости.

На рис. 5, а показана микроструктура зоны сплавления в верхней части шва (слева – наплавленный металл, справа – ЗТВ основного металла). В наплавленном металле образовалась дисперсная структура, состоящая из верхнего и зернистого бейнита. Граница сплавления не выявляется, а просто происходит плавный переход к структуре высокотемпературной области ЗТВ, состоящей в основном из мелкозернистого бейнита. На рис. 5, б показана микроструктура ЗТВ на расстоянии ~ 1 мм от границы сплавления, которая представляет собой в основном зернистый бейнит. На рис. 5, в показана микроструктура ЗТВ на расстоянии ~ 2 мм. Здесь микроструктура состоит из очень мелких зёрен доэвтектоидного феррита и дисперсного зернистого бейнита. На рис. 5, г, показана микроструктура, которая находится на расстоянии ~ 3 мм от границы сплавления. Она представляет структуру литого основного металла с неполной фазовой перекристаллизацией, в результате которой в объёмах бывших крупных первичных кристаллов образовалась мелкозернистая структура, состоящая из очень мелкого феррита и зернистого бейнита. Грубые образования избыточного феррита, расположенные по границам кристаллитов, не подвергались фазовой перекристаллизации при сварке, однако, они фрагментированы на отдельные мелкие зерна, что объясняется процессами первичной рекристаллизации и полигонизации, обусловленные тем, что под действием сварочных напряжений нагретый выше температуры рекристаллизации металл ЗТВ был подвержен пластической деформации. Чётко выявляемая фрагментированная структура пластин избыточного феррита является убедительным доказательством термомеханического воздействия на зёрненное строение свариваемого металла. В зависимости от температуры нагрева (выше или ниже критических точек) участки металла ЗТВ подвергаются при сварке высокотемпературной термомеханической обработке (ВТМО) или низкотемпературной термомеханической обработке (НТМО). В результате такого воздействия образуется полигонизованная или частично рекристаллизованная структура, обладающая при повышенной твёрдости высокой ударной вязкостью, что подтверждается результатами проведенных испытаний [11, 12].



Важно также подчеркнуть, что почти при всех температурах испытания ударная вязкость в ЗТВ значительно выше у образцов, вырезанных из заготовок, которые после сварки поперечной горкой без предварительного подогрева не подвергались термической обработке.

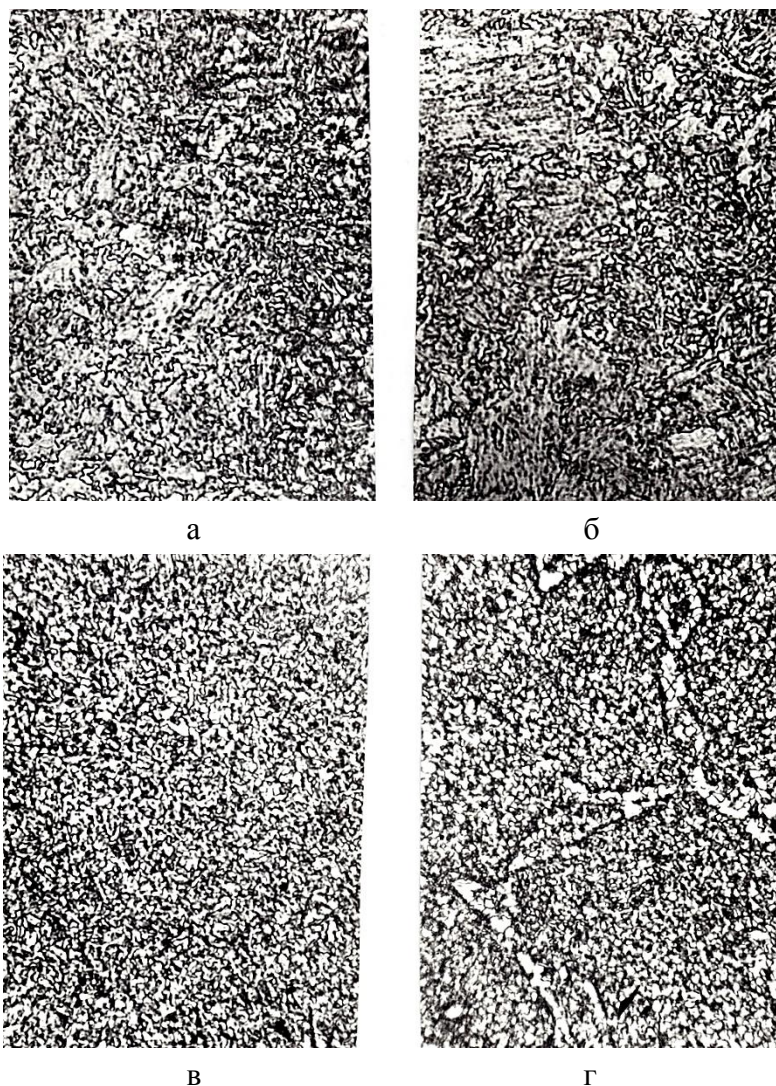


Рис. 5. Микроструктура в верхней части шва сварного соединения из стали 15X1M1ФЛ, полученного способом поперечной горки без подогрева и последующей термообработки ( $\times 500$ ):

а – зона сплавления (слева – наплавленный металл, справа – высокотемпературная область ЗТВ; б – ЗТВ на расстоянии 1 мм от границы; в – ЗТВ на расстоянии 2 мм от границы; г – ЗТВ на расстоянии 3 мм от границы

Следовательно, в высокотемпературной области ЗТВ критическая температура хрупкости определяется морфологическими особенностями зёрненной структуры, сформированной в процессе проведения сварки способом поперечной горки, и её положение не изменяется в результате структурных превращений, происходящих при высоком отпуске.

При изучении зёрненной структуры в световом микроскопе было замечено, что вблизи зоны сплавления некоторые зёрна имеют деформированную форму и зубчатые границы, что подтверждает развитие пластической деформации. При определении величины зерна было выявлено, что высокотемпературный участок ЗТВ и наплавленный металл отличаются мелкозернистостью. Так, в ЗТВ  $\overline{D}_{ycl} \approx 0,0192$  мм (7–8 балл), в наплавленном металле

$D_{\text{усл}} \approx 0,0186$  мм (8–9 балл). Однако, величина зерна неоднородная: более мелкие зёрна, соответствующие  $\sim 13$  баллу, располагаются по границам основных зёрен и внутри таковых, что является подтверждением начала развития процессов динамической рекристаллизации.

## ВЫВОДЫ

После сварки способом поперечной горки заготовок из стали 15X1M1ФЛ без подогрева твёрдость в ЗТВ и наплавленном металле вблизи границы сплавления значительно выше твёрдости основного металла. Проведение послесварочного высокого отпуска уменьшает разницу в твёрдости, однако полного выравнивания её значений не происходит, что связано с процессами термомодеформационного упрочнения.

После сварки способом поперечной горки без подогрева ударная вязкость KCV в высокотемпературной области ЗТВ (несмотря на повышенную твёрдость) значительно выше, чем в основном металле.

В высокотемпературной области ЗТВ ударная вязкость KCV выше у образцов, вырезанных из заготовок, которые после сварки не подвергались термической обработке в виде высокого отпуска.

После сварки стали 15X1M1ФЛ поперечной горкой без подогрева критическая температура хрупкости в ЗТВ по сравнению с основным металлом смещается к отрицательным температурам и не зависит от проведения послесварочной термообработки (высокого отпуска), что объясняется тем, что в ЗТВ под действием пластической деформации (возникающей при сварке) происходят процессы динамической полигонизации и рекристаллизации, в результате которых образуется мелкое зерно с измельченной устойчивой субструктурой.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баженов В. В. Влияние сварки способом поперечной горки на свойства сварных соединений из термоупрочненных сталей / В. В. Баженов, С. Е. Синадский, В. И. Панов // Сварочное производство. – 1982. – № 12. – С. 14–17.
2. Панов В. И. Универсальная методика ремонтной сварки крупногабаритных конструкций тяжелого машиностроения / В. И. Панов // Сварочное производство. – 2007. – № 4. – С. 11–17.
3. А. с. 1816595 СССР, А1 В23К9/16. Способ многопроходной сварки / Н. Г. Ефименко, М. В. Орлов, Н. Е. Левенберг, Н. П. Воличенко (СССР). – № 4902660/08 ; заявл. 30.10.90 ; опубл. 23.05.93, Бюл. № 19.
4. Салтыков С. А. Стереометрическая металлография / С. А. Салтыков. – М. : Металлургия, 1970. – 375 с.
5. Чепрасов Д. П. Особенности формирования бейнитных структурных зернистой морфологии в ОШЗ сварных соединений из высокопрочных низколегированных сталей / Д. П. Чепрасов, М. Н. Сейдуров, А. А. Иванайский // Сварочное производство. – 2009. – № 7. – С. 7–11.
6. Скульский В. Ю. Оценка склонности сварных соединений теплоустойчивой хромистой мартенситной стали к образованию трещин при термической обработке / В. Ю. Скульский, А. К. Царюк, С. И. Моравецкий // Автоматическая сварка. – 2009. – № 1. – С. 5–9.
7. Ефименко Н. Г. Твёрдость и микроструктура стали 15X1M1ФЛ после сварки способом поперечной горки / Н. Г. Ефименко // Восточно-европейский журнал передовых технологий : Прикладная физика и материаловедение. – 2011. – № 2/5 (50). – С. 48–52.
8. Нетеса Е. М. О свойствах продуктов промежуточного распада стали 15X1M1ФЛ / Е. М. Нетеса, О. П. Фомина, Л. Ю. Деглина // Вестник Харьк. политехн. ин-та : Прогрессивная технология обработки металлов. – 1985. – Вып. 6. – № 225. – С. 27–28.
9. Касаткин Б. С. Микроструктурная мартенситно-аустенитная составляющая в сварных соединениях высокопрочных низколегированных сталей (обзор) / Б. С. Касаткин, О. Н. Козловец // Автоматическая сварка. – 1992. – № 9–10. – С. 3–12.
10. О структуре зоны термического влияния сварных соединений сталей 15X1M1ФЛ, 25X2HMФА и 20XH2MФА / Н. Е. Левенберг, С. И. Герман, О. П. Фомина, Е. М. Нетеса, А. К. Царюк, Т. А. Корниенко // Автоматическая сварка. – 1983. – № 6. – С. 19–21.
11. Дяченко С. С. Фізичні основи міцності та пластичності металів : навч. посіб. / С. С. Дяченко. – Харків : видав. ХНАДУ, 2003. – 226 с.