

УДК 621.791:621.791.92:621.31

Н.Г. Ефименко, д-р техн. наук, О.Ю. Атоженко, Харьков, Украина

## **МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТАЛИ 15X1M1ФЛ, ВЫПОЛНЕННЫХ СПОСОБОМ ПОПЕРЕЧНОЙ ГОРКИ**

*Досліджувались механічні властивості зварних з'єднань із сталі 15X1M1ФЛ після зварювання способом поперечної горки без підігріву. Вказаний спосіб забезпечує високі показники міцності і пластичності високотемпературної ділянки ЗТВ і наплавленого металу. Характеристики пластичності однакові для зварних з'єднань, як без термічної обробки, так і з високим відпуском після зварювання. Отримані результати досліджень дають підставу рекомендувати відміну попереднього підігріву, а також термічної обробки вузлів після зварювання при використанні вказаного способу.*

*Ключові слова: сталь 15X1M1ФЛ, зварювання, крихке руйнування, відпуск, механічні властивості*

*Исследовались механические свойства сварных соединений из стали 15X1M1ФЛ после сварки способом поперечной горки без подогрева. Указанный способ обеспечивает высокие показатели прочности и пластичности высокотемпературной области ЗТВ и наплавленного металла. Характеристики пластичности одинаковые для сварочных соединений, как без термической обработки, так и с высоким отпуском после сварки. Полученные результаты исследований дают основания рекомендовать отмену предыдущего подогрева, а также термической обработки узлов после сварки при использовании указанного способа.*

*Ключевые слова: сталь 15X1M1ФЛ, сварка, хрупкое разрушение, отпуск, механические свойства*

*N.G. EFIMENKO, O.JU. ATOZHENKO*

### *MECHANICAL PROPERTIES OF WELDED CONNECTIONS OF STEEL 15X1M1ФЛ, EXECUTED IN THE WAY OF THE CROSS-SECTION HILL*

*Mechanical properties of welded joints of 15X1M1ФЛ (Cr-Mn-V) steel after welding using the split pass method without heating were studied. After applying such a welding mode, strength and plasticity of the weld-adjacent zone and the weld bead were high. Plasticity characteristic were equal for welded joints both without heat treatment and with high-temperature tempering after welding. Impact elasticity of all zones at room temperature of testing decreases dramatically, but metal of the weld-adjacent zone resists harder to brittle failure which is proved by studying the fractures.*

*Key words: steel Cr-Mn-V, welding, mechanical properties, brittle failure tempering*

Известны технологические способы сварки массивных толстостенных конструкций из низколегированных сталей с ограниченной свариваемостью, которые без предварительного подогрева и последующей термообработки обеспечивают высокую работоспособность и надежность изделий при эксплуатации [1,2]. К таким относится способ ручной многопроходной сварки поперечной горкой, при котором, благодаря автоподогреву, в сварном соединении обеспечивается структура без участков разупрочнения и охрупчивания [1, 3].

До настоящего времени остается актуальной проблема отмены предварительного и сопутствующего подогрева при сварке и заварке дефектов крупногабаритных литых конструкций энергетического оборудования, изготавливаемого из теплоустойчивой стали 15X1M1ФЛ. Известно [4], что подог-

рев сложно влияет на свариваемость сталей и может привести к дополнительному охрупчиванию металла шва и зоны термического влияния. Кроме того, проведение сварки с подогревом и последующей термообработкой требует дополнительных энергозатрат, а в производственных условиях их осуществление не всегда представляется возможным.

В данной работе изучали влияние способа сварки поперечной горкой на механические свойства сварных соединений из стали 15X1M1ФЛ, определяемые при стандартных испытаниях и характеризующие сопротивление разрушению при нормальных температурах.

Исследовали ремонтные заварки заготовок диаметром 120 мм, длиной ~ 300 мм, отлитые в заводских условиях и подвергнутые термической обработке (нормализации и отпуску при 720-750°C). Разделку металла под сварку выполняли механическим способом вдоль длины заготовок. Размеры разделки: глубина – 60 мм, ширина – 40 мм, длина – 120 мм. Заварку имитируемого дефекта производили ручным способом электродами ТМЛ-ЗУ типа Э09Х1МФ диаметром 4 мм без предварительного подогрева. Режим сварки:  $I_{св}=160-170\text{A}$ ,  $U_{св}=28\text{В}$ . Толщина наплавляемых слоев ~ 4 мм.

После сварки одну из заготовок подвергали высокому отпуску при  $t_{н}=720-750^{\circ}\text{C}$  согласно штатной технологии. Заготовки разрезались в поперечном направлении на темплеты для макроанализа и измерения твердости по  $\text{HV}_5$ . При макроисследовании дефектов не выявлено, швы отличаются высокой сплошностью, ширина зоны термического влияния составляет 2,5-3,8 мм. Из этих темплетов, согласно схемы *рис.1*, вырезались заготовки для изготовления разрывных и ударных образцов. Прочностные и пластические характеристики различных зон сварных соединений определялись по известной методике при комнатной температуре. Ударная вязкость определялась при температурах от -20 до +350°C при испытании стандартных образцов с полукруглым надрезом (типа Менаже), вырезанных из различных участков сварных соединений.

Это дало возможность оценить влияние сварки способом поперечной горки без предварительного подогрева на свойства высокотемпературного участка зоны термического влияния (ЗТВ) и наплавленного металла (шва) и сравнить их со свойствами основного металла.

Установлено, что на уровне средней части шва значение твердости ЗТВ и наплавленного металла сварного соединения, не подвергавшегося отпуску после сварки, выше по сравнению с основным металлом (*рис.2*). Однако, ее максимальные значения не достигают допустимых показателей для стали 15X1M1ФЛ, свариваемой по принятой технологии [5,6]. Твердость всех зон сварного соединения, подвергавшегося отпуску, сильно снижается но остается выше твердости основного металла. Такое различие, очевидно, связано с тем, что при сварке способом поперечной горки металл ЗТВ и шва, находясь в напряженном состоянии, испытывает пластическую деформацию, в резуль-

тате которой происходит дислокационное упрочнение субструктуры зерен твердого раствора, сохраняющееся после высокого отпуска.

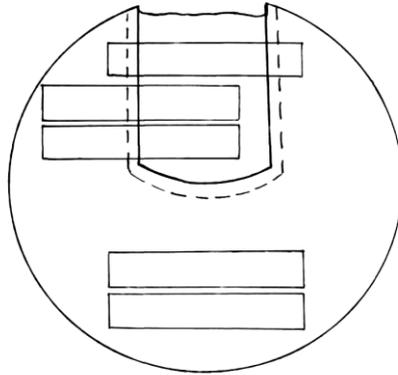


Рисунок 1 – Схема вырезки разрывных и ударных образцов из различных участков сварных соединений стали 15X1M1ФЛ

Прочностные характеристики металла различных участков соединений, как без термообработки, так и с термообработкой (рис.3) превышают нормы, установленные РТМ для стали 15X1M1ФЛ в нормализованном и отпущенном состоянии ( $\sigma_B \leq 637$  МПа;  $\sigma_{0,2} \leq 450$  МПа).

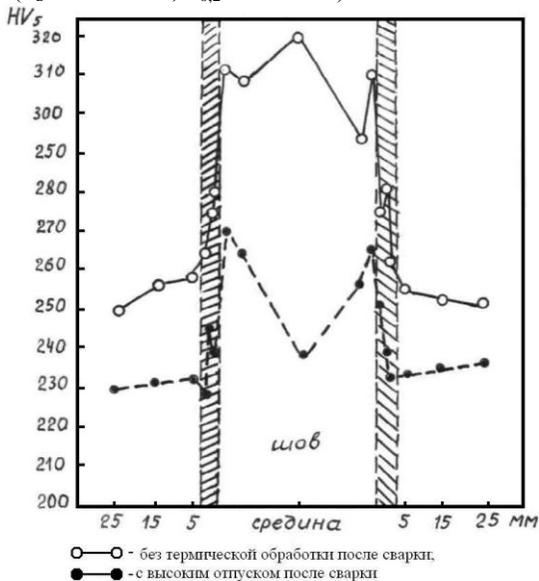


Рисунок 2 – Изменение твердости сварного соединения из стали 15X1M1ФЛ после сварки на расстоянии 25 мм от поверхности шва

В сварном соединении без термической обработки уровень значений  $\sigma_B$  практически одинаков во всех зонах, несмотря на значительное повышение твердости в высокотемпературной области ЗТВ и в металле шва (см. рис.2); предел текучести  $\sigma_{0,2}$  металла ЗТВ и шва несколько повышается по сравнению с основным металлом. После сварки и высокого отпуска значения  $\sigma_B$  и  $\sigma_{0,2}$  металла всех зон снижаются (~ на  $100 \frac{H}{мм^2}$ ), причем  $\sigma_{0,2}$  основного металла и ЗТВ одинаковый, а металла шва значительно выше. Из приведенных данных следует, что после сварки без подогрева в ЗТВ и наплавленном металле происходит небольшое повышение прочностных характеристик по сравнению с основным металлом.

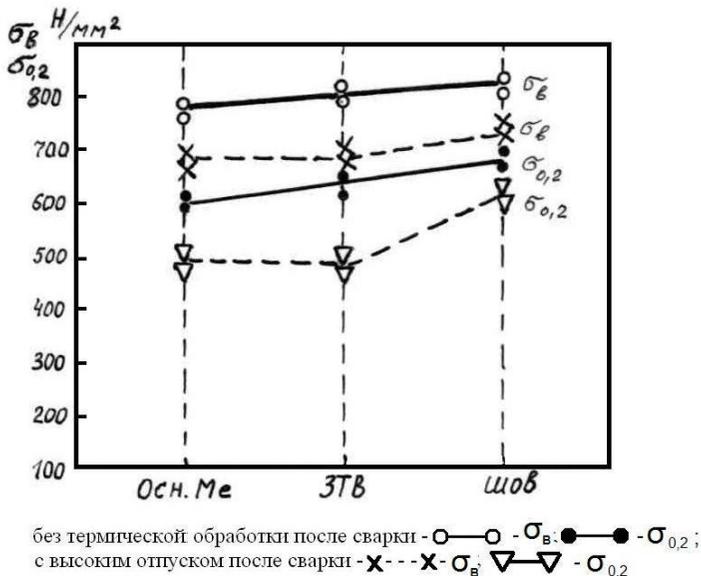


Рисунок 3 – Изменение прочностных свойств различных зон сварных соединений из стали 15X1M1ФЛ

Относительное удлинение ( $\delta$ ) во всех зонах практически одинаково и соответствует уровню 18-20%, как для образцов без термической обработки после сварки, так и с высоким отпуском после сварки (рис.4). Относительное сужение ( $\psi$ ) имеет высокие значения для всех зон (более 50%). Однако, наиболее высокие значения  $\psi$  имеет металл шва после сварки без термической обработки (68%). В основном металле и ЗТВ значения  $\psi$  несколько ниже. После высокого отпуска значения  $\psi$  в ЗТВ повышаются, а в основном и наплавленном металле наблюдается большой разброс его значений, что может быть признаком перехода от пластичного к хрупкому состоянию. [5].

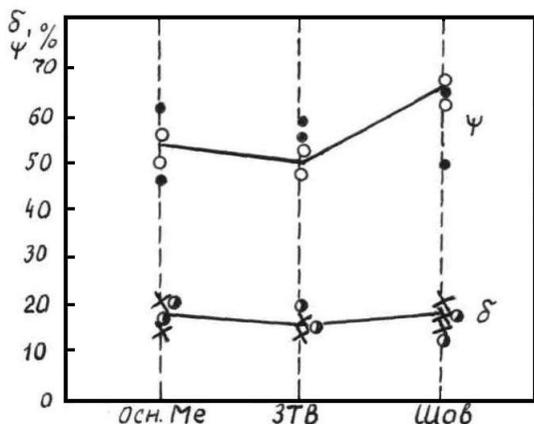


Рисунок 4 – Изменение пластических характеристик различных зон сварных соединений из стали 15X1M1ФЛ

Рисунок 4 – Изменение пластических характеристик различных зон сварных соединений из стали 15X1M1ФЛ

При анализе результатов, полученных при испытаниях на ударный изгиб при  $+20^{\circ}\text{C}$  металла всех исследуемых зон сварных соединений в состоянии как после сварки, так и после отпуска, установлено, что их абсолютные значения близки и невысокие (рис. 5 и 6). Такие уровни ударной вязкости получены и в работах [4,6]. Объясняется это тем, что переходная критическая температура хрупкости для теплоустойчивых сталей типа 15X1M1ФЛ находится выше  $+20^{\circ}\text{C}$ .

Отмечается тенденция повышения КСУ металла всех зон сварного соединения после высокого отпуска, однако в основном металле она остается более высокой. Это объясняется тем, что до сварки основной металл находится в отпущенном состоянии, а отпуск заготовок, проведенный после сварки, повышает его вязкость [6]. Значения ударной вязкости при  $+20^{\circ}\text{C}$  металла высокотемпературной области ЗТВ и наплавленного металла, подвергнутых высокому отпуску, приближаются к значениям основного металла в исходном состоянии (КСУ наплавленного металла –  $92 \text{ Дж/см}^2$ , ЗТВ –  $105 \text{ Дж/см}^2$ , основного металла –  $96 \text{ Дж/см}^2$ ). Эти данные позволяют сделать вывод о том, что сварка способом поперечной горки не снижает сопротивление хрупкому разрушению в зоне термического влияния и шве по сравнению с основным металлом.

При изучении изломов ударных образцов было выявлено, что после испытания при  $+20^{\circ}\text{C}$  в основном и наплавленном металле образуется 100% хрупкий излом, а в ЗТВ – смешанный с 30% вязкой составляющей (как в образцах без термообработки, так и с высоким отпуском). В образцах, испытанных при  $0^{\circ}\text{C}$ , в ЗТВ также образуется смешанный излом, но в образцах без

термической обработки больше вязкой составляющей (~ 20%), чем в образцах с высоким отпуском (~ 2% вязкой составляющей).

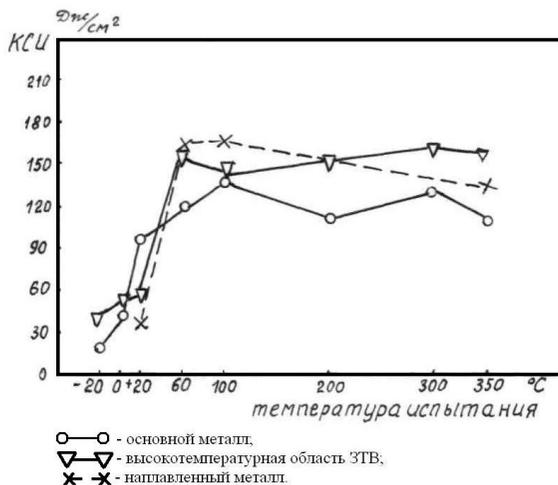


Рисунок 5 – Изменение ударной вязкости КСУ сварного соединения стали 15X1M1ФЛ после сварки без последующей термообработки

Появление вязкой составляющей в изломах образцов металла высоко-температурной области ЗТВ указывает на формирование структуры с повышенным сопротивлением хрупкому разрушению в этом участке по сравнению с основным металлом, хотя КСУ его выше, чем ЗТВ. Такую особенность вязко- хрупкого разрушения можно объяснить тем, что при сварке способом поперечной горки этот участок испытывает значительные напряжения и пластические деформации в условиях постоянно меняющихся температур нагрева и охлаждения. При этом вследствие развития процессов динамической полигонизации и частичной рекристаллизации («in situ») создается измельченная субструктура аустенита, наследуемая образующимися при охлаждении продуктами распада (бейнитом, мартенситом) [7]. Такая структура обеспечивает высокую ударную вязкость при высокой прочности и повышает стойкость к образованию холодных трещин в околошовной зоне сварных соединений [8].

Следует также отметить, что при сварке способом поперечной горки обеспечивается автоподогрев, в результате чего металл шва и ЗТВ подвергаются самоотпуску, улучшающему их структуру и свойства до проведения послесварочного высокого отпуска.

Повышение температуры испытаний до +60°C приводит к резкому увеличению КСУ зон сварного соединения и основного металла до уровня 120-170 Дж/см<sup>2</sup>, как в состоянии после сварки, так и после отпуска, за исключением металла шва абсолютное значение КСУ которого достигает 220 Дж/см<sup>2</sup> после

высокого отпуска. При температуре испытания  $+100^{\circ}\text{C}$  значение КСУ отпущенного металла еще больше увеличивается, достигая  $270 \frac{\text{Дж}}{\text{см}^2}$ . Это объясняется тем, что в центре шва, при указанной широкой разделке, металл по химическому составу приближается к электродному, более качественному, нежели основной литой металл. Тенденция высокого уровня КСУ металла шва сохраняется и при испытании при  $+350^{\circ}\text{C}$ .

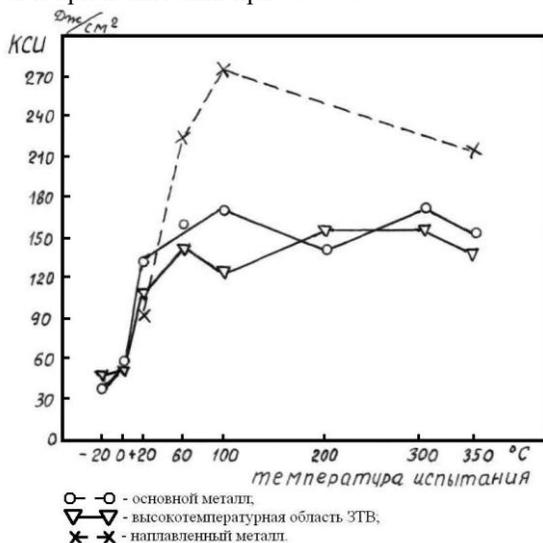


Рисунок 6 – Изменение ударной вязкости КСУ сварного соединения стали 15X1M1ФЛ после сварки с последующим высоким отпуском

Повышение температуры испытаний включительно до  $+350^{\circ}\text{C}$  стабилизирует уровень показателей КСУ основного металла и высокотемпературной области ЗТВ (рис.5 и 6). Вместе с тем КСУ высокотемпературной области ЗТВ в сварных соединениях без отпуска более высокая, чем в сварных соединениях, подвергавшихся после сварки высокому отпуску (рис.6).

Полученные закономерности создают предпосылки для вывода о том, что проведение высокого отпуска после сварки способом поперечной горки не оказывает заметного влияния на повышение сопротивления хрупкому разрушению в околосшовной зоне. Иначе ведет себя наплавленный металл, который после высокого отпуска имеет очень высокие значения КСУ, пониженную твердость в этой зоне (рис.2) и повышенную пластичность (рис.4). Совершенно очевидно, что послесварочный высокий отпуск оказывает заметно влияет на структурные превращения в наплавленном металле, уменьшая его склонность к хрупким разрушениям.

#### Выводы

1. После сварки стали 15X1M1ФЛ, выполненной способом поперечной горки, прочностные и пластические свойства в зоне термического влияния

находятся на высоком уровне и не отличаются от свойств основного металла, хотя его твердость значительно ниже, как после сварки без термической обработки, так и с высоким отпуском.

2. Наибольшее сопротивление хрупкому разрушению при +20°C имеет металл околосварочной зоны, свидетельством чего в изломах образцов с надразом в высокотемпературной области ЗТВ присутствует 30% вязкой составляющей, а в образцах других участков вязкой составляющей не обнаружено.

3. В сварных соединениях, полученных с применением способа поперечной горки, существенных различий вязкопластических свойств металла высокотемпературной области ЗТВ с послесварочным высоким отпуском и без него не установлено, что, очевидно, связано с автоподогревом и с процессами термомеханического упрочнения. Однако, высокий отпуск соединения после сварки существенно улучшает свойства наплавленного металла, что подтверждает целесообразность его проведения.

**Список использованных источников:** 1 *Синадский С.Е.* Автоподогрев и автотермообработка при сварке поперечной горкой / *С.Е. Синадский, В.И. Панов* // Сварочное производство. – 1985. - №11. – С. 3-5. 2 *Панов В.И.* Универсальная методика ремонтной сварки крупногабаритных конструкций тяжелого машиностроения / *В.И. Панов* // Сварочное производство. – 2007. - №4. – С. 11-17. 3 *Ефименко Н.Г.* А.с. 1816595 СССР, А1 В23 К9/16. Способ многопроходной сварки // *Н.Г. Ефименко, М.В. Орлов, Н.Е. Левиберг, Н.П. Воличенко.* СССР. - №4902660/08. – Заявлено 30.10.90. – Оpubл. 23.05.93. – Бюл. №19. 4 *Козлов Р.А.* Сварка теплоустойчивых сталей / *Р.А. Козлов.* – Л.: Машиностроение, 1986. – 160 с. 5 *Левиберг Н.Е.* Влияние отпуска на свойства металла зоны термического влияния сталей 15Х1М1ФЛ, 15Х3М1ФЛ и 25Х2НМФА / *Н.Е. Левиберг, С.И. Герман, О.П. Фомина, Е.М. Нетеса* // Технология и организация производства. – 1983. - №2. – С.42-44. 6 *Герман С.И.* Электродуговая сварка теплоустойчивых сталей перлитного класса / *С.И. Герман.* – М.: Машиностроение, 1972.–200 с. 7 *Бернштейн М.Л.* Прочность стали / *М.Л. Бернштейн.* – М.: Металлургия, 1974. – 200 с. 8 *Анохов А.Е.* Работоспособность литых корпусов из стали 20ХМФЛ, отремонтированных перлитными электродами без термообработки / *А.Е. Анохов, Ф.А. Хромченко, И.В. Федина, И.Н. Ворновицкий, А.С. Позднякова* // Сварочное производство. – 1985. - №3. – С.17-19.

*Надійшла до редакції 15.03.2011*

**Bibliography (transliterated):** 1 *Sinadskij S.E.* Avtopodogrev i avtotermostroobrabotka pri svarke poperechnoj gorkoj / *S.E. Sinadskij, V.I. Panov* // Svarochnoe proizvodstvo. – 1985. - №11. – S. 3-5. 2 *Panov V.I.* Universal'naja metodika remontnoj svarki krupnogabaritnyh konstrukcij tjazhelogo mashinostroenija / *V.I. Panov* // Svarochnoe proizvodstvo. – 2007. - №4. – S. 11-17. 3 *Efimenko N.G.* A.s. 1816595 SSSR, A1 V23 K9/16. Sposob mnogoprohodnoj svarki // *N.G. Efimenko, M.V. Orlov, N.E. Levenberg, N.P. Volichenko.* SSSR. - №4902660/08. – Zajavleno 30.10.90. – Opubl. 23.05.93. – Bjul. №19. 4 *Kozlov R.A.* Svarka teploustojchivyh stalej / *R.A. Kozlov.* – L.: Mashinostroenie, 1986. – 160 s. 5 *Levenberg N.E.* Vlijanie otpuska na svojstva metalla zony termicheskogo vlijanija stalej 15H1M1FL, 15H3M1FL i 25H2NMFA / *N.E. Levenberg, S.I. German, O.P. Fomina, E.M. Netesa* // Tehnologija i organizacija proizvodstva. – 1983. - №2. – S.42-44. 6 *German S.I.* Elektrodugovaja svarka teploustojchivyh stalej perlitnogo klassa / *S.I. German.* – M.: Mashinostroenie, 1972.–200 s. 7 *Bernshtejn M.L.* Prochnost' stali / *M.L. Bernshtejn.* – M.: Metallurgija, 1974. – 200 s. 8 *Anohov A.E.* Rabotosposobnost' lityh korpusov iz stali 20HMFL, otremonirovannyh perlitnymi jelektrodami bez termooobrabotki / *A.E. Anohov, F.A. Hromchenko, I.V. Fedina, I.N. Vornovickij, A.S. Pozdnjakova* // Svarochnoe proizvodstvo. – 1985. - №3. – S.17-19.