

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТОЛСТОСТЕННЫХ ТРУБ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА КЛАССА ПРОЧНОСТИ К60, К65

А.О. Худяков^{1, 2}, П.А. Данилкин^{1, 2}

¹ Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск;

² ОАО «Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности (ОАО «РосНИТИ»), г. Челябинск

Из практики эксплуатации и опыта механических испытаний известно, что металл зоны термического влияния (ЗТВ) сварного соединения более чем основной металл подвержен разрушению. В ходе проведения многочисленных испытаний по оценке статической трещиностойкости установлено, что наименьшими вязкими свойствами обладают область крупного зерна ЗТВ и линия сплавления. Такое снижение вязких свойств сварных соединений прямошовных труб большого диаметра (ТБД) приводит к отбраковке продукции и серьезным экономическим последствиям.

С целью выявления причин такого поведения металла в ЗТВ было выполнено моделирование термических циклов сварки на образцах из сталей класса прочности К65 с помощью комплекса Gleeble 3800. В ходе выполнения работы была установлена взаимосвязь между сформированной микроструктурой в ЗТВ и вязкими свойствами сварных соединений высокопрочных труб. Самым неблагоприятным типом микроструктуры в области крупного зерна ЗТВ является глобулярный бейнит. Выявлено негативное влияние ванадия и кремния на вязкие свойства сварных соединений высокопрочных труб большого диаметра. Так же были установлены причины снижения вязких свойств литого металла сварных швов. Сильное снижение вязких свойств металла шва происходит при выделении феррита по границам первичных дендритов.

По результатам исследований был разработан химический состав основного металла труб, и предложен способ повышения вязких свойства литого металла сварного шва за счет добавок титана и бора в сварочную ванну. Рекомендации были применены при производстве опытной партии труб для проекта «Сила Сибири». Результаты механических испытаний показали высокие значения вязких свойства полученных сварных соединений.

Ключевые слова: сварное соединение, зона термического влияния, скорость охлаждения, вязкие свойства, микроструктура, бейнит.

Известно, что основной проблемой изготовления сварной конструкции с точки зрения эксплуатационной надежности сварных соединений (СС) является поведение металла в зоне термического влияния (ЗТВ). Как показывает практика эксплуатации конструкций и результаты испыта-

ний СС, металл ЗТВ более чем основной металл трубы подвержен разрушению.

СС обладает ярко выраженной структурной и механической неоднородностью (рис. 1). Это связано с наибольшими структурными изменениями, происходящими в зоне, нагреваемой выше темпе-

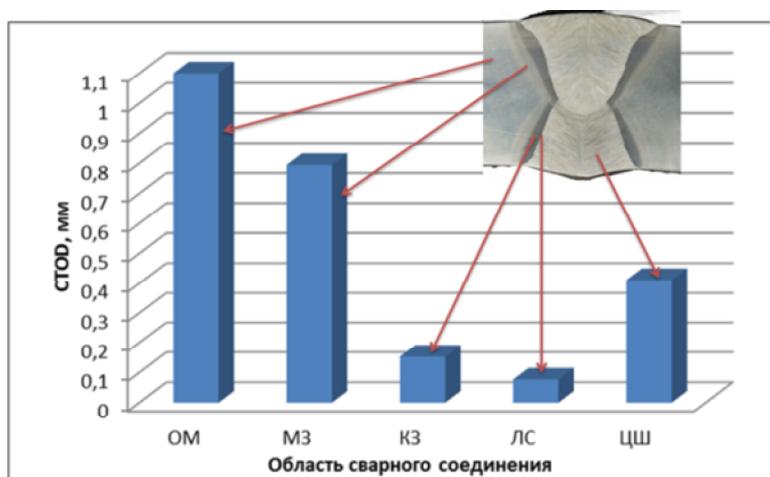


Рис. 1. Механическая неоднородность сварных соединений труб большого диаметра

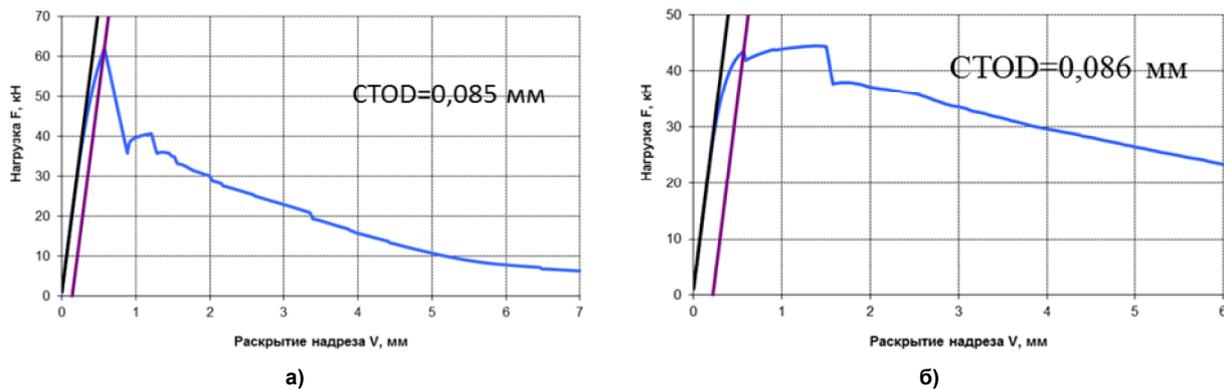


Рис. 2. Результаты испытаний на статическую трещиностойкость (CTOD): а – линия сплавления; б – центр шва

ратуры начала интенсивного роста зерна аустенита [1, 2]. Испытания на статическую трещиностойкость (CTOD) могут показывать чрезвычайно низкий уровень вязких свойств СС труб как по линии сплавления (ЛС), так и по центру шва (ЦШ) (рис. 2).

На сегодняшний день самый высокий уровень требований по статической трещиностойкости предъявляется к трубам для прокладки в зонах активных тектонических разломов (АТР) (CTOD ≥ 0,2 мм).

Для достижения высоких вязких свойств сварных соединений ТБД были поставлены и успешно решены следующие задачи:

- 1) взаимосвязь вязких свойств ЗТВ сварных соединений труб от сформировавшегося типа микроструктуры;
- 2) влияние отдельных легирующих элементов на вязкие свойства в ЗТВ сварных соединений труб;
- 3) установление причин снижения статической трещиностойкости литого металла сварного шва.

Для решения первой задачи осуществляли имитацию термических циклов сварки с помощью установки моделирования технологических процессов Gleeble 3800. В ходе металлографических исследований установлено, что в интервале скоро-

стей охлаждения 1–5 °С/с формируется структура гранулярного бейнита. С увеличением скорости охлаждения гранулярный бейнит постепенно заменяется на игольчатый и реечный, а при достижении скорости охлаждения в 100 °С/с образуется мартенситоподобная реечная структура (рис. 3). При этом диапазоны скоростей охлаждения существования той или иной структуры напрямую зависят от химического состава сталей.

Далее образцы с имитированными циклами сварки испытывали на статическую трещиностойкость и определяли зависимость уровня CTOD от сформированного типа микроструктуры (рис. 4). В результате получили, что самой низкой трещиностойкостью обладает микроструктура гранулярного бейнита, а наиболее предпочтительной является структура реечного бейнита. При формировании мартенситоподобной структуры происходит падение уровня CTOD, но он все же остается на высоком уровне и соответствует требованиям, предъявляемым к трубам, предназначенным для прокладки в зонах АТР.

Влияние отдельных химических элементов на вязкие свойства СС высокопрочных ТБД изучается многими специалистами сварочного производства по всему миру [3, 4]. Установлено, что введение в ниобийсодержащую сталь ванадия приводит к снижению устойчивости аустенита и приводит к

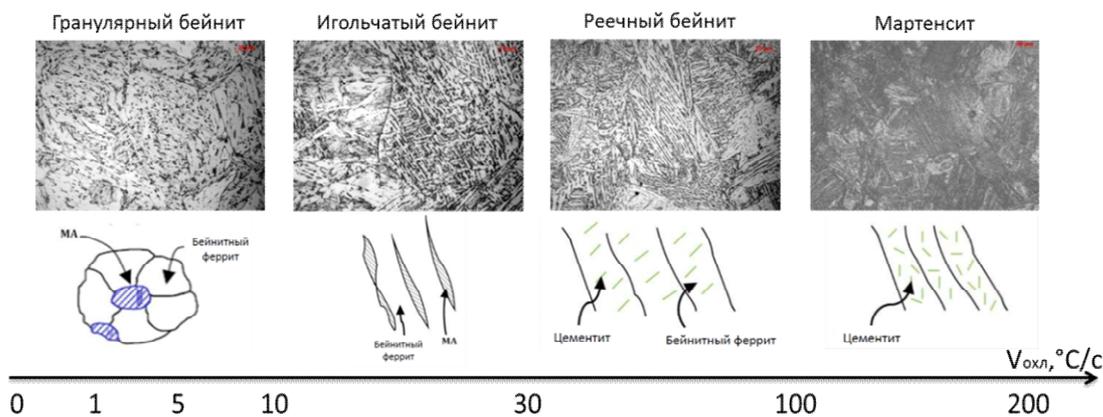


Рис. 3. Зависимость сформированного типа микроструктуры от скорости охлаждения

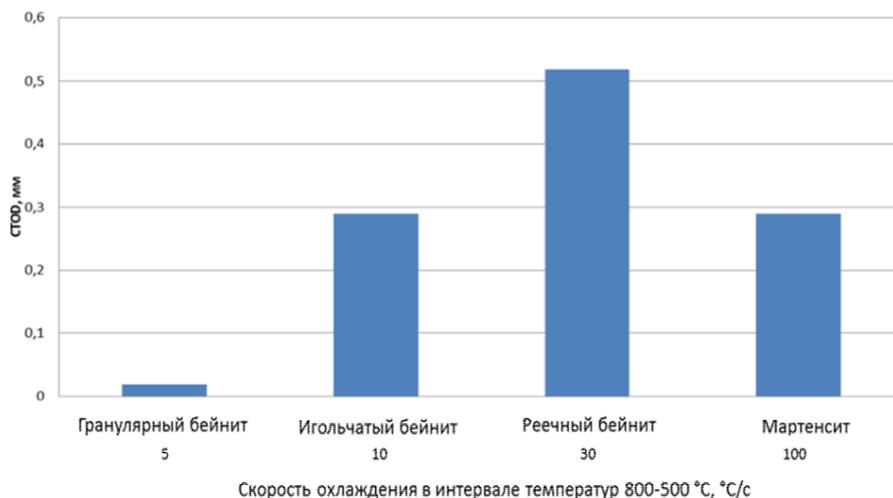


Рис. 4. Зависимость уровня CTOD от сформированного типа микроструктуры в ЗТВ

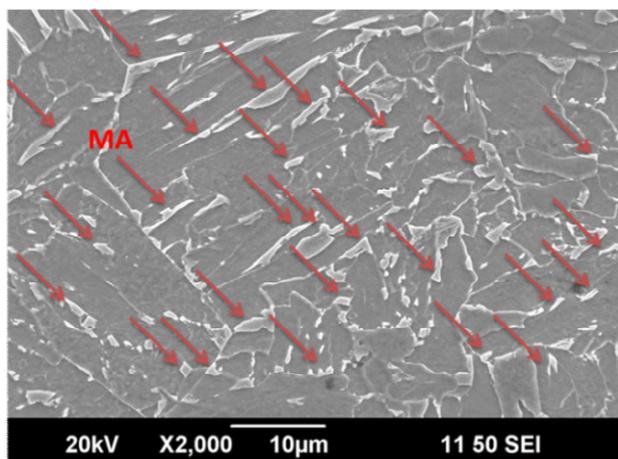
смещению всей термокинетической диаграммы в сторону больших скоростей охлаждения. Уровень вязких свойств в ЗТВ у стали легированной Nb + V значительно ниже, чем у стали легированной Nb, при этом область оптимальных скоростей охлаждения смещена в сторону более высоких скоростей охлаждения, что неблагоприятно для заводской сварки толстостенных труб.

Так же по результатам многочисленных исследований установлено, что уровень вязких свойств СС высокопрочных ТБД напрямую зависит от количества мартенсит-аустенитной (М-А) составляющей в ЗТВ (рис. 5). С увеличением объемной доли М-А составляющей происходит резкое снижение уровня CTOD [5].

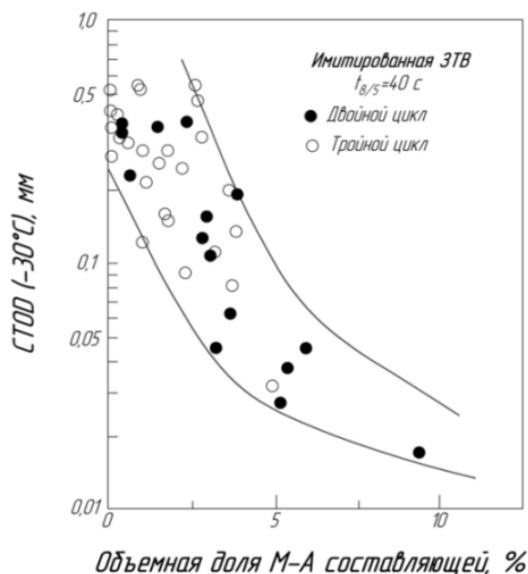
Количество и величина образования островков М-А составляющей зависит от скорости охлаждения и химического состава основного металла.

Так наибольшая доля М-А составляющей наблюдается при скоростях охлаждения 1,5–5 °C/c (рис. 6, а), что соответствует скоростям охлаждения при многодуговой сварке труб. Но количество М-А составляющей можно регулировать с помощью химического состава основного металла. Снижение содержания кремния даже в небольших пределах может существенно снизить плотность образования островков М-А составляющей (рис. 6, б) и, соответственно, повысить вязкие свойства в ЗТВ СС толстостенных труб[6].

Испытания на статическую трещиностойкость металла сварного шва так же могут показывать низкий уровень CTOD. Для выяснения причин снижения вязких свойств металла шва были проведены металлографические исследования. В ходе



а)



б)

Рис. 5. Влияние М-А составляющей на вязкие свойства СС: а – выделения М-А составляющей; б – зависимость уровня CTOD от объемной доли М-А составляющей

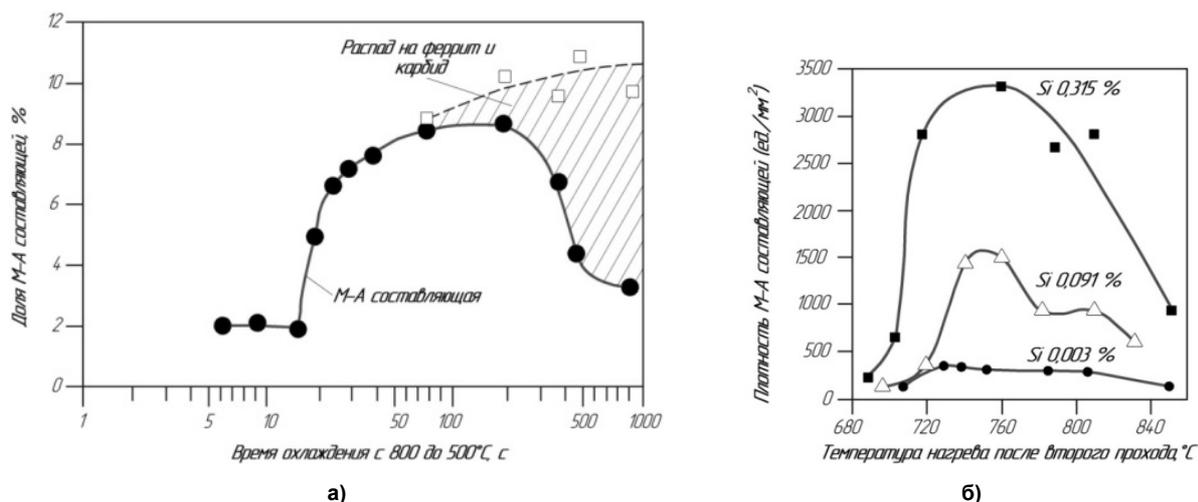


Рис. 6. Факторы, влияющие на образование М-А составляющей: а – зависимость доли М-А составляющей от времени охлаждения в диапазоне температур 800–500 °С; б – зависимость плотности образования М-А составляющей от содержания кремния и температуры повторного нагрева

металлографических исследований выявлено то, что причиной низкого уровня СТOD сварных швов является выделение феррита по границам дендритов (рис. 7) [7].

Решить задачу подавления образования феррита в металле сварного шва возможно при введении в сварочную ванну оксида титана (TiO) и некоторого количества бора (В). Оксид титана химически стабилен при температуре 1350–1400 °С, поэтому он не растворяется в закристаллизованном металле. Частицы TiO являются центрами вторичной кристаллизации и способствуют образованию игольчатого бейнита в процессе охлаждения литого металла сварного шва. Бор увеличивает прокаливаемость стали и способствует образованию игольчатого бейнита. Образование игольчатого бейнита подавляет образование феррита по границам дендритов.

На основании выполненных исследований были реализованы следующие технические решения:

– исключение ванадия из химического со-

става основного металла труб классов прочности K60, K65;

– снижение содержания кремния до максимально-возможного предела;

– введение в сварочную ванну титана и бора с помощью сварочной проволоки ОК Autrod 13.64 (S3MoTiB).

Эти технические решения были применены к опытной партии труб для проекта «Сила Сибири». Концепция легирования основного металла представлена в таблице.

По результатам металлографических исследований установлено, что в литом металле сварного шва опытной партии труб практически отсутствуют выделения феррита по границам дендритов, а в области крупного зерна зоны термического влияния образовалась микроструктура преимущественно реечной и игольчатой морфологии (рис. 8). Получены высокие вязкие свойства сварных соединений, значение СТOD по центру шва составило 0,47 мм, по линии сплавления – 0,68 мм.

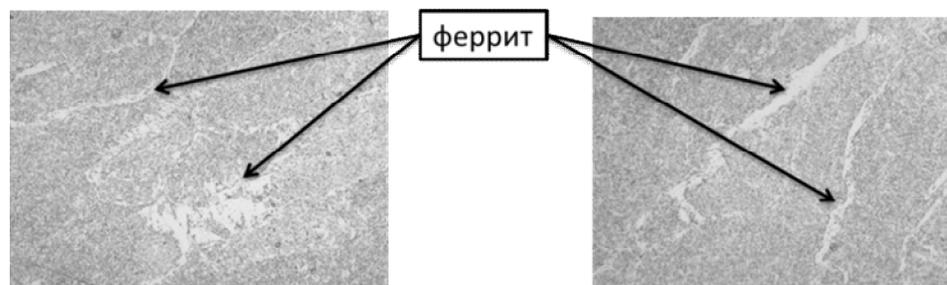


Рис. 7. Микроструктура литого металла сварного шва

Концепция легирования основного металла труб опытной партии для проекта «Сила Сибири»

C	Si	Mn	Mo	Ni	V + Nb + Ti	Mo + Cr + Cu	S	P
< 0,06	< 0,2	< 1,8	< 0,20	< 0,30	< 0,08	< 1,8	< 0,005	< 0,010

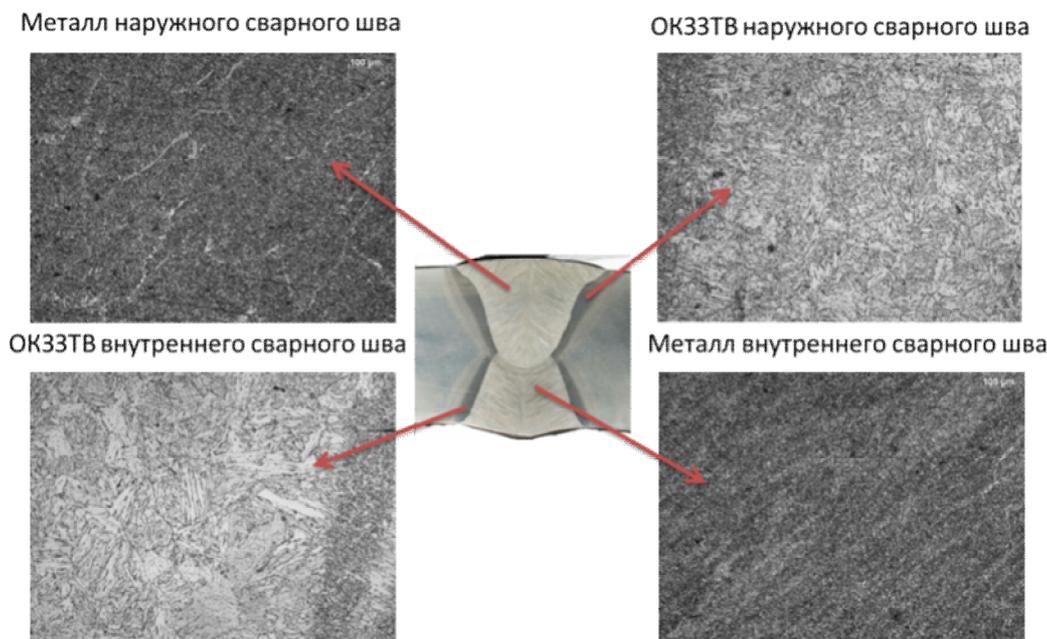


Рис. 8. Металлографические исследования СС труб для прокладки в зонах АТР по проекту «Сила Сибири»

Заключение

Установлено, что причиной резкого снижения вязких свойств в ЗТВ сварных соединений ТБД вызвано формированием гранулярного бейнита и выделением крупных островков МА-составляющей. Наиболее благоприятной структурой, обеспечивающей высокий уровень вязких свойств СС, является речный бейнит. Обнаружено негативное влияние ванадия и кремния на вязкие свойства ЗТВ. Снижение вязких свойств литого металла сварных швов вызвано образованием феррита по границам дендритов.

В результате проведенных исследований был рекомендован химический состав основного металла для производства толстостенных ТБД класса прочности К60 с целью обеспечения высоких вязких свойств СС. Для обеспечения высоких вязких свойств литого металла сварных швов необходимо дополнительно вводить TiO и В в сварочную ванну с помощью сварочной проволоки.

Предложенные технические решения были реализованы при производстве опытной партии труб для проекта «Сила Сибири». В результате механических испытаний получены высокие значения СТОД, достигнут высокий уровень вязких свойств сварных соединений ТБД.

Литература

1. Хлусова, Е.И. Стабильность свойств высокопрочных штрипсовых сталей / Е.И. Хлусова, В.В. Орлов // *Черная металлургия*. – 2013 – № 12. – С. 27–29.

2. Особенности многоэлектродной сварки под слоем флюса при производстве высокопрочных толстостенных труб / А.Н. Борцов, И.П. Шабалов, А.А. Величко и др. // *Металлург*. – 2013 – № 4. – С. 69–76.

3. Сравнение свариваемости высокопрочных трубных сталей, микролегированных ниобием, ниобием и ванадием / А.В. Назаров, Е.В. Якушев, И.П. Шабалов и др. // *Металлург*. – 2013. – № 10. – С. 56–61.

4. Effect of base metal composition on the toughness in the heat affected zone of DSAW-welded large-diameter linepipes / C. Stallybrass, O. Dmitrieva, J. Schroder, A. Liessem // *Ostend, 6th International Pipeline Technology Conference*. – 2013. – Paper no. S26-02.

5. A.D. Batte, P.J. Boothby, A.B. Rothwell. Understanding the weldability of niobium-bearing HSLA steels. – Loughborough, UK: Advantica Technologies. – 2009.

6. Kirkwood, P. Weldability – The role of Niobium in the heat affected zone of microalloyed high strength line pipe steels / P. Kirkwood // *Microalloyed pipe steels for oil and gas industry*. – Moscow, Russia, 2013.

7. Fletcher L. Effect of Ti and N concentrations on microstructure and mechanical properties of microalloyed high strength line pipe steel welds / L. Fletcher, Z. Zhu, M. Marimuthu et al. // *Welding of high strength pipeline steels. International seminar*. – Araxa, Brazil, 2011. – <http://ro.uow.edu.au/engpapers/4560>.

Худяков Артем Олегович, аспирант кафедры оборудования и технологии сварочного производства, Южно-Уральский государственный университет; ОАО «Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности (ОАО «РосНИТИ»», г. Челябинск; temkaho@gmail.com.

Данилкин Павел Алексеевич, аспирант кафедры оборудования и технологии сварочного производства, Южно-Уральский государственный университет; ОАО «Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности (ОАО «РосНИТИ»», г. Челябинск; temkaho@gmail.com.

Поступила в редакцию 13 января 2015 г.

MAINTENANCE OF FRACTURE TOUGHNESS OF WELDED JOINTS OF X80 LARGE DIAMETER THICK-WALLED PIPES

A.O. Khudyakov, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation; The Russian Research Institute of the Tube and Pipe Industries, Chelyabinsk, Russian Federation, temkaho@gmail.com,

P.A. Danilkin, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation; The Russian Research Institute of the Tube and Pipe Industries, Chelyabinsk, Russian Federation, temkaho@gmail.com

From practice and mechanical tests experience it is well known, that the metal of the heat affected zone (HAZ) of welded joints is subjected to damaging much more than the base metal. In the course of numerous tests on fracture toughness it was found that the coarse grain zone (CGHAZ) and the fusion line (CGHAZ) have the lowest welding toughness. Such reduction in toughness of welded joints of submerged arc welded large diameter pipes leads to the production rejection and serious economic consequences.

In order to identify the reasons of such metal behavior in HAZ welding, modeling of thermal cycles was simulated on samples from steels X80 using Gleeble 3800. During the work the relationship between the microstructure formed in the CGHAZ and toughness of welded joints of high-strength large diameter pipes was established. The most unfavorable type of CGHAZ microstructure is granular bainite. Negative effect of vanadium and silicon on toughness of welded joints of high-strength large diameter pipes was found. Also reasons of toughness reduction in weld metal were found. Great reduction of toughness in weld metal occurs when ferrite precipitates along primary dendrites boundaries.

According to the results of studies the chemical composition of base metal was designed and the method of increasing toughness of weld metal by the addition of titanium and boron into the weld puddle was recommended. Recommendations were used in the production of the experimental lot of pipes for the project "The Power of Siberia". The results of mechanical tests showed high toughness of welded joints.

Keywords: welded joint, heat affected zone, cooling rate, toughness, microstructure, bainite.

References

1. Khlusova E.I., Orlov V.V. [Stability of Properties of High-Strength Strip Steels]. *Chernaya metallurgiya*, 2013, no. 12, pp. 45–54. (in Russ.)
2. Bortsov A.N., Shabalov I.P., Velichko A.A., Mentuykov K.Yu., Utkin I.Yu. Features of Multi-Electrode Submerged-Arc Welding in the Production of High-Strength Thick-Walled Pipes. *Metallurgist*, 2013, vol. 57, no. 3–4, pp. 310–319. doi: 10.1007/s11015-013-9730-0.
3. Nazarov A.V., Yakushev E.V., Shabalov I.P., Morozov Yu.D., Kireeva T.S. Comparison of Weldability of High-Strength Pipe Steels Microalloyed with Niobium, Niobium and Vanadium. *Metallurgist*, 2013, vol. 57, no. 9–10, pp. 911–917. doi: 10.1007/s11015-014-9821-6.
4. Stallybrass C., Dmitrieva O., Schroder J., Liessem A. Effect of Base Metal Composition on the Toughness in the Heat Affected Zone of DSAW-Welded Large-Diameter Linepipes. *6th International Pipeline Technology Conference, Ostend*. 2013.
5. Batte A.D., Boothby P.J., Rothwell A.B. Understanding the Weldability of Niobium-Bearing HSLA Steels. *Advantica Technologies*. Loughborough, UK, 2009.
6. Kirkwood P. Weldability – The Role of Niobium in the Heat Affected Zone of Microalloyed High Strength Line Pipe Steels. *Microalloyed Pipe Steels for Oil and Gas Industry*. Moscow, 2013.

7. Fletcher L., Zhu Z., Marimuthu M., Zheng L. et al. Effect of Ti and N Concentrations on Microstructure and Mechanical Properties of Microalloyed High Strength Line Pipe Steel Welds. *Welding of High Strength Pipeline Steels. International Seminar*. Araxa, Brazil, 2011.

Received 13 January 2015

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Худяков, А.О. Обеспечение трещиностойкости сварных соединений толстостенных труб большого диаметра класса прочности К60, К65 / А.О. Худяков, П.А. Данилкин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2015. – Т. 15, № 1. – С. 96–102.

REFERENCE TO ARTICLE

Khudyakov A.O., Danilkin P.A. Maintenance of Fracture Toughness of Welded Joints of X80 Large Diameter Thick-Walled Pipes. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2015, vol. 15, no. 1, pp. 96–102. (in Russ.)