

Сварка, родственные процессы и технологии

УДК 621.791.052

DOI: 10.14529/met190207

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИЧИН НИЗКОЙ УДАРНОЙ ВЯЗКОСТИ КОЛЬЦЕВОГО СВАРНОГО ШВА

А.А. Шевченко¹, Е.С. Семенова², Н.А. Шабурова²

¹ ООО «ЭТЕРНО», г. Челябинск, Россия,

² Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Причинами пониженной ударной вязкости околошовных зон в сварных соединениях могут быть неоднородность химического состава (ликвация) и перегрев металла. Если ликвация приводит к неравномерности механических свойств по сечению сварного соединения, то перегрев, сопровождающийся ростом зерна, значительно повышает склонность сварного шва к хрупкому разрушению. В работе исследовался штампосварной тройник: магистраль тройника изготовлена из стали марки 10Г2ФБЮ, удлинительное кольцо изготовлено из стали 09Г2С. Целью исследования было установить причины низкой ударной вязкости кольцевого сварного шва указанного изделия. Макроструктурные исследования сварного соединения показали, что шов был наложен со смещением. Имеющая место неравноосность приводит к смещению линии разрушения, в результате чего разрушение проходит в наиболее хрупкой структуре участков сварного шва.

При исследовании микроструктуры металла шва установлено наличие в структуре видманшпетт феррита. Данная структурная составляющая наблюдается как у внешней поверхности шва, так и в центре. Присутствие видманшпетта оказывает негативное влияние на механические свойства металла. Поскольку микроструктурные исследования показали неравномерное распределение грубоиглочатого феррита по толщине шва, то было предложено увеличить количество проходов при сварке с трех до четырех. Проведенные сравнительные исследования структуры и свойств образцов опытных сварок показали целесообразность таких изменений. Так, измерения микротвердости сварных соединений после сварки в 3 и 4 прохода показали, что при наложении 3 валиков твердость металла шва ниже, чем при наложении 4 валиков, но не более допустимых значений 260 HV₁₀. Таким образом, по результатам исследования по устранению причин низкой ударной вязкости были рекомендованы следующие мероприятия: строгий контроль технологии сварки участков сварного шва (для недопущения неравноосности) и установление минимального числа проходов при сварке (для получения нужных механических свойств).

Ключевые слова: сварной шов, ударная вязкость трубных сталей, сталь 10Г2ФБЮ, сталь 09Г2С, перегрев, видманшпеттов феррит.

Введение

Ударная вязкость околошовных зон зависит от химического состава и свойств основного металла, а также от режима термической обработки. Наиболее распространенным случаем снижения ударной вязкости околошовных зон в сварных соединениях является перегрев металла, вызывающий рост зерна [1]. Перегрев чаще наблюдается в электродуговых сварных соединениях и может вызывать весьма значительное понижение ударной вязкости. Повышение ударной вязкости достигается применением закалки или нормализации свар-

ного соединения. Для улучшения пластических свойств металла в зонах закалки назначают отпуск сварных конструкций. При этом одновременно достигается снижение остаточных напряжений. Сварные соединения и конструкции без значительных концентраторов напряжений хорошо сопротивляются ударным нагрузкам, в том числе и при отрицательных температурах, при условии достаточно высокого качества исходного основного металла и соблюдения технологического процесса сварки [2–4].

Также причинами низкой ударной вязкости могут быть структурная и химическая не-

однородность металла, микротрещины, сформировавшиеся в процессе литья. Ликвация возникает в результате того, что сплавы, в отличие от чистых металлов, кристаллизуются не при одной температуре, а в интервале температур. При этом состав кристаллов, образующихся в начале затвердевания, может существенно отличаться от состава последних порций кристаллизующегося маточного раствора. Чем шире температурный интервал кристаллизации сплава, тем больше химической неоднородности, причем наибольшую склонность к ней проявляют те компоненты сплава, которые наиболее сильно влияют на ширину интервала кристаллизации (для стали, например, сера, кислород, фосфор, углерод). Ликвация, как правило, оказывает вредное влияние на качество металла, так как приводит к неравномерности его свойств [5, 6].

На предприятии, занимающимся изготовлением сварных трубных конструкций, при проведении сдаточных испытаний по ГОСТ 6996–66 были получены неудовлетворительные значения величин ударной вязкости сварного кольцевого шва. При требуемых заказчиком значениях $KCU^{-60} = 70$ Дж/см² и $KCV^{-40} = 50$ Дж/см², фактически было получено $KCU^{-60} = 22,5$ Дж/см² и $KCV^{-40} = 26,6$ Дж/см².

Кольцевой шов тройника проходит термическую обработку – высокий отпуск ($T = 600...630$ °С).

Целью проведения исследования было выяснить причину провала испытаний на ударный изгиб и выработать рекомендации по недопущению подобного брака в будущем.

Материал и методика исследования

Объектом исследования выбрано готовое изделие – штампосварной тройник размером 1020×325 мм, материал изготовления магистрали тройника – сталь 10Г2ФБЮ, толщина стенки 22 мм, материал изготовления удлинительного кольца – сталь 09Г2С, толщина стенки 14 мм. Вырезка образцов для макро- и микроструктурных исследований проводилась

у кольцевого сварного шва по направлению вдоль оси трубы.

Химический состав участков сварного шва определялся методом спектрального анализа на приборе атомно-эмиссионном спектрометре ДФС-500.

Исследование макроструктуры сварного шва проводилось по ГОСТ Р 57180–2016. Для проведения микроструктурных исследований образцы травились в 4%-ном растворе азотной кислоты в этиловом спирте. Анализ и съемка микроструктуры проводились на микроскопе Axio Observer D1.m. Микротвердость металла сварного шва определяли на твердомере FM-800.

Результаты эксперимента и их обсуждение

По технологии сварка кольцевого шва состоит из нескольких проходов, корневой проход был выполнен электродами LB52U, для заполняющих и облицовочных проходов применялись электроды BOEHLER FOX V65, отличающиеся повышенным содержанием никеля, что улучшает при наплавке показатели прочности и ударной вязкости вплоть до температур испытания -50 °С.

Проведен анализ химического состава шва, существенных отклонений в составе обнаружено не было, фактический химический состав сварного шва соответствует заявленным маркам электродов, нарушений при выборе материала для сварки не выявлено (см. таблицу).

На макрошлифе сварного шва (рис. 1) видно, что для заполнения шва сварка проводилась в 3 прохода (3 валика). Кроме того, как хорошо видно из рис. 1, сварной шов наложен со смещением (нарушена соосность между верхним и нижним валиком).

Неравноосность сварного шва приводит к смещению линии разрушения. В результате чего граница разрушения проходит по участкам сварного шва с наиболее хрупкой структурой.

Химический состав участков сварного шва

Наименование образцов	Массовая доля элементов*, %										
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	Al	V	Mo	Nb	Ti
Наружный шов	0,099	1,43	0,44	0,074	0,54	0,094	0,005	0,014	0,17	0,01	0,007
Внутренний шов	0,08	0,98	0,54	0,047	0,04	0,046	0,002	0,01	0,012	0,006	0,01
Середина шва	0,086	1,12	0,59	0,05	0,31	0,058	0,003	0,01	0,015	0,01	0,008

* Количество P и S в образцах не превышает 0,011 и 0,0056 мас. % соответственно.

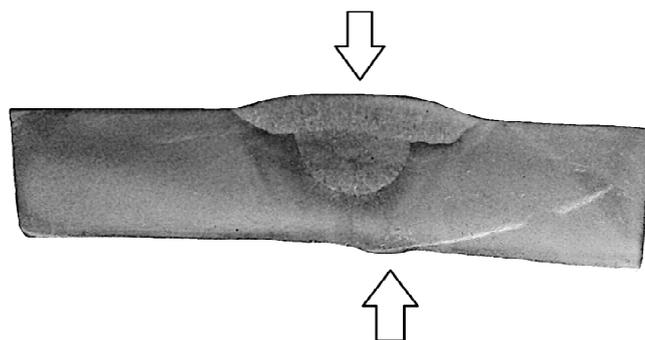


Рис. 1. Макрошлиф сварного шва и линия смещения

При исследовании микроструктуры отмечено наличие крупнозернистой структуры с выделениями видманштетт феррита по границам. Данная структурная составляющая наблюдается во всех участках сварного шва и, как известно [7–10], оказывает негативное влияние на механические свойства металла. Характерная микроструктура металла шва на расстоянии 2,5 мм от наружной поверхности показана на рис. 2.

Для сравнения, на рис. 3 показана структура металла сварного шва на расстоянии 4 мм от наружной поверхности. Видно, что

грубоигольчатая структура феррита проявляется в этом участке в меньшей степени. Наблюдаемая неравномерность распределения структурных составляющих по высоте сварного шва может приводить к неравномерному протеканию пластической деформации в объеме металла, что подтверждается работами [11–12].

Для определения влияния количества проходов при сварке на структуру металла исследовались сварные соединения после сварки в 3 и 4 прохода. Результаты исследования показали, что увеличение числа проходов при

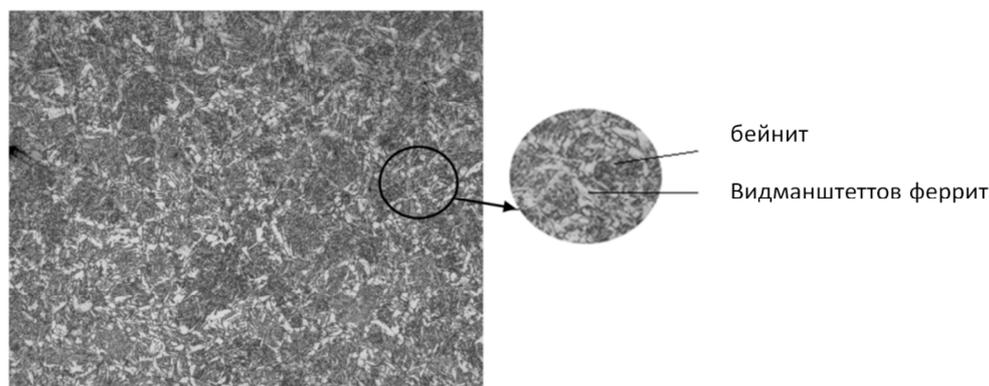


Рис. 2. Микроструктура металла шва на расстоянии 2,5 мм от наружной поверхности, $\times 100$

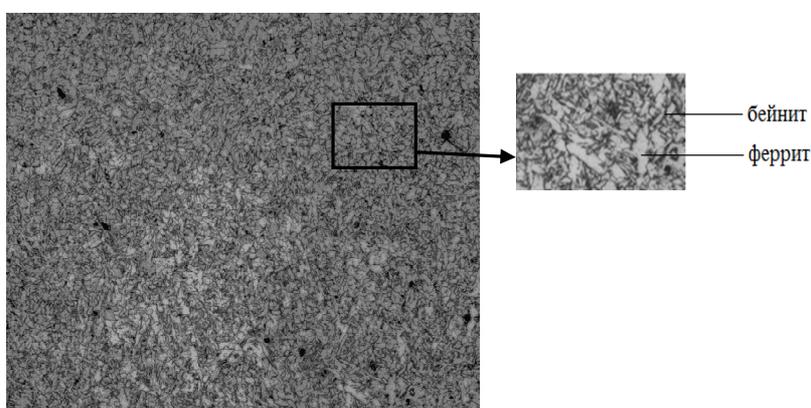


Рис. 3. Микроструктура металла шва на расстоянии 4 мм от наружной поверхности, $\times 100$

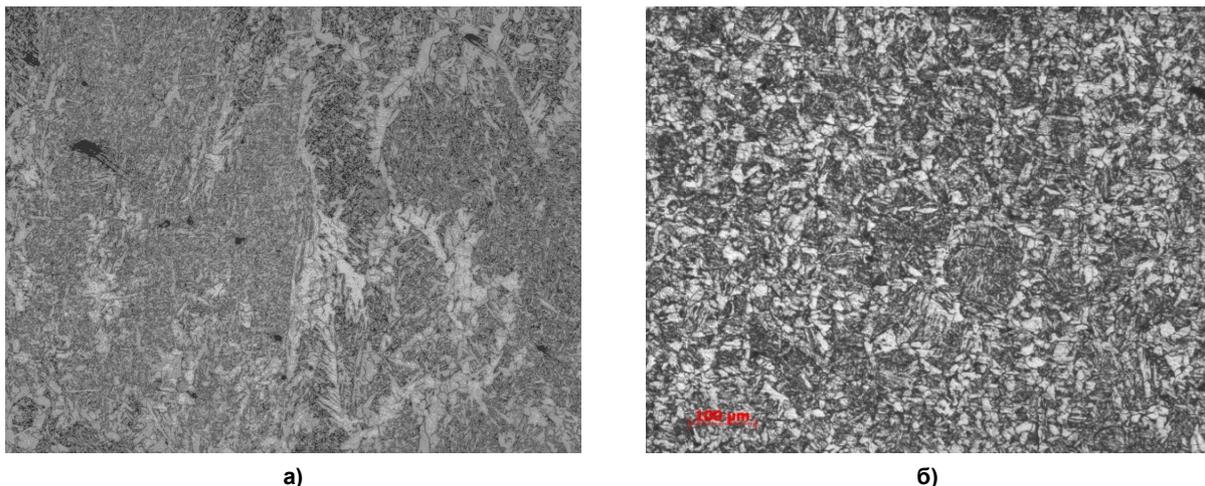


Рис. 4. Микроструктура металла в центре шва, $\times 100$: а – после сварки в 3 прохода; б – после сварки в 4 прохода

сварке приводит к устранению грубой видманштеттовой структуры в центральных зонах сварного шва (рис. 4).

О влиянии последних проходов при сварке на структуру металла свидетельствуют и результаты замера микротвердости. Так, на рис. 5 показаны участки и результаты замера твердости при сварке в 3 прохода. На рис. 6

показаны результаты аналогичных измерений твердости при сварке в 4 прохода.

Видно, что наибольшие значения твердости наблюдаются в области наложения последнего валика, который в отличие от предыдущих не подвергался перекристаллизации.

Ударные испытания опытных образцов со сваркой в 4 прохода показали полное со-

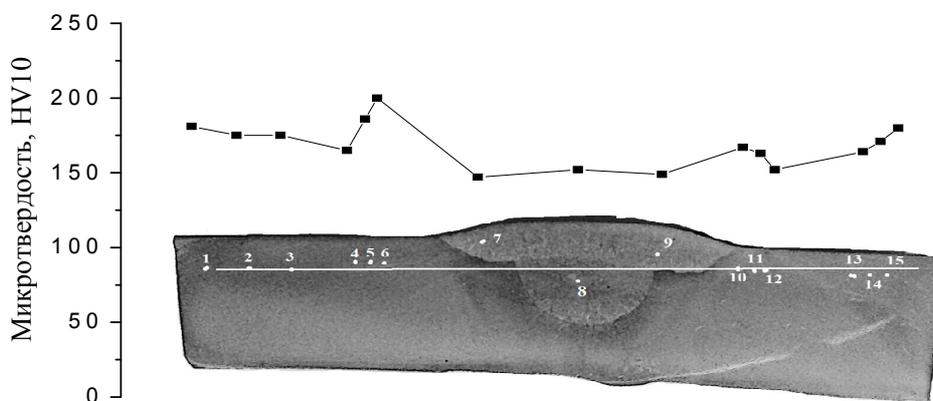


Рис. 5. Участки и результаты замера твердости на образце после сварки в 3 прохода

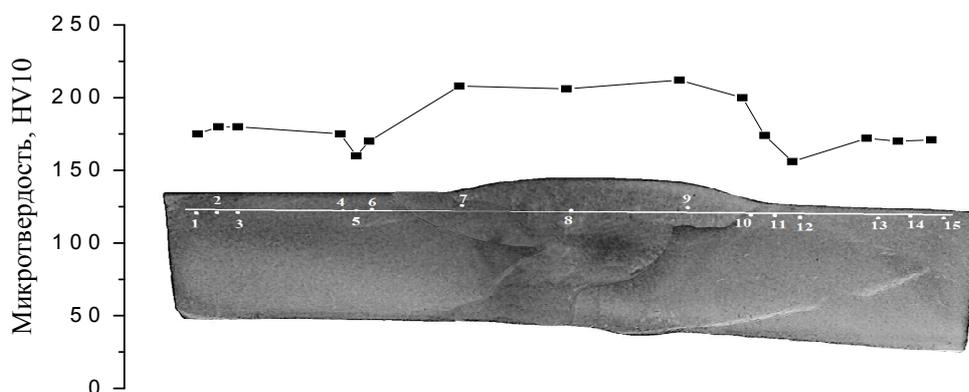


Рис. 6. Участки и результаты замера твердости на образце после сварки в 4 прохода

ответствие значений ударной вязкости требованиям стандарта без изменения режима термической обработки. Испытания проводились согласно ГОСТ 6996–66, при требуемых заказчиком значениях $KCU^{-60} = 70 \text{ Дж/см}^2$ и $KCV^{-40} = 50 \text{ Дж/см}^2$, фактически было получено $KCU^{-60} = 233,9 \text{ Дж/см}^2$ и $KCV^{-40} = 179,1 \text{ Дж/см}^2$.

Схожие результаты о положительном влиянии отжигающего валика на хладостойкость сварного соединения приведены в ряде статей [13–15]. Так, авторы работы [13] на основе проведенных экспериментов доказывают, что основной причиной низкой хладостойкости сварных соединений конструкций из сталей 10ХСНДА и 15ХСНДА, полученных односторонней однопроходной автоматической сваркой под флюсом сплошной проволокой с гранулированной присадкой на формирующих подкладках, следует считать сформировавшуюся в зоне сплавления крайне неоднородную структуру, состоящую из дефектного феррита, насыщенного карбидными и карбонитридными включениями, которые служат своеобразными концентраторами напряжения, обуславливая хрупкость соединения. Авторы отмечают, что применение многослойной стыковой сварки металлоконструкций на пониженных погонных энергиях с наложением отжигающего валика приводит к отсутствию видманштетта в структуре и соответствию металла требуемым значениям ударной вязкости. В работе [15] отмечается, что для получения высоких показателей ударной вязкости металла зоны термического влияния и его сопротивляемости образованию холодным трещинам необходимо, чтобы размер действительного аустенитного зерна в зоне термического влияния был минимальным. С этой точки зрения сварочные термические циклы в зоне термического влияния многослойного соединения должны быть такими, чтобы первые тепловые воздействия приводили к неизбежному росту зерна и закалке; очередное тепловое воздействие должно привести к рекристаллизации аустенита с измельчением зерна и, возможно, повторной закалкой. Для этого максимальная температура очередного воздействия должна быть выше A_{c3} , но ниже температуры начала интенсивного роста зерна. Все последующие воздействия должны обеспечивать отпуск закаленных структур, для чего их максимальная температура не должна превышать A_{c1} . Такой термический цикл обес-

печит получение структуры зоны термического влияния в виде мелкодисперсной смеси продуктов отпуска, обладающей высокими показателями прочности и ударной вязкости. Для реализации приведенной схемы должно выполняться не менее двух проходов.

Выводы

Таким образом, исследование позволило выявить несколько причин низкой ударной вязкости: прежде всего – наличие видманштетт феррита в структуре и неравноосность сварного шва. Если последний фактор устраняется ужесточением технологического контроля: недопущением овальности свариваемых фрагментов, контролем соосности кромок при сварке, правильной разделкой заготовок и т. д. [9, 10], то для оптимизации структуры сварного шва (устранение видманштетт феррита) было предложено введение на производстве критерия минимального количества проходов при сварке. Исследование опытных образцов с 4 проходами при сварке показало, что в структуре металла шва отсутствуют грубые игольчатые выделения видманштетт феррита. Испытания на ударную вязкость опытных образцов подтвердили полное их соответствие требованиям ГОСТ 6996–66.

Литература

1. *Материаловедение в машиностроении: учеб. для бакалавров / А.М. Адашкин, Ю.Е. Семенов, А.К. Онегина, В.Н. Климов. – М.: Юрайт, 2016. – 535 с.*
2. *Бернштейн, М.Л. Механические свойства металлов: учеб. / М.Л. Бернштейн, М.А. Займовский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1979. – 496 с.*
3. *Смирнов, М.А. Основы термической обработки стали: учеб. пособие / М.А. Смирнов, В.М. Счастливцев, Л.Г. Журавлев. – Екатеринбург: УрО РАН, 1999. – 495 с.*
4. *Лахтин, Ю.М. Материаловедение / Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтьева. – М.: Машиностроение, 1990. – 528 с.*
5. *Гуляев, А.П. Металловедение: учеб. для вузов / А.П. Гуляев. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1986. – 544 с.*
6. *Голиков, И.Н. Дендритная ликвация в сталях и сплавах / И.Н. Голиков, С.Б. Масленков. – М.: Металлургия, 1977. – 244 с.*
7. *Новиков, И.И. Теория термической обработки металлов / И.И. Новиков. – М.: Металлургия, 1978. – 392 с.*

8. Биронт, В.С. Теория термической обработки металлов. Отжиг: учеб. пособие / В.С. Биронт. – Красноярск: СФУ, 2007. – 180 с.

9. Овчинников, В.В. Дефекты сварных соединений: учеб. пособие / В.В. Овчинников. – 4-е изд., стер. – М.: Издат. центр «Академия», 2012. – 64 с.

10. Федосов, С.А. Основы технологии сварки: учеб. пособие / С.А. Федосов, И.Э. Оськин. – 2-е изд., испр. – М.: Инновационное машиностроение, 2017. – 125 с.

11. Гудков, А.А. Трещиностойкость стали / А.А. Гудков. – М.: Металлургия, 1989. – 375 с.

12. Охрупчивание конструкционных сталей и сплавов / под ред. К.Л. Брайента, С.К. Бенерджи; пер.с англ. Ю.П. Либерова. – М.: Металлургия, 1988. – 550 с.

13. Ледников, Е.А. Хладостойкость свар-

ных соединений стальных мостовых конструкций из высококачественного проката стали 10ХСНДА и 15ХСНДА / Е.А. Ледников, Д.П. Чепрасов, Д.А. Конник // Ползуновский альманах. – 2017. – № 1. – С. 84–90.

14. Maksuti, R. Correlation of microstructure and hardness of twopass submerged arc welds of line pipe steel X65 / R. Maksuti, H. Mehmeti, S. Imeri // International Journal of Microstructure and Materials Properties. – 2010. – Vol. 4, no. 3. – P. 347–355. DOI: 10.1504/ijmmp.2009.031140

15. Управление структурой сварных соединений при орбитальной TIG-сварке технологических трубопроводов компрессорных станций / А.В. Шипилов, А.В. Коновалов, В.В. Бровко, С.И. Полосков // Известия вузов. – 2011. – № 6. – С. 44–52.

Шевченко Александр Александрович, ведущий инженер-технолог, ООО «ЭТЕРНО», г. Челябинск; Shevchenko_ooo@mail.ru.

Семенова Елена Сергеевна, бакалавр кафедры материаловедения и физико-химии материалов, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; elena.semenova.1997@susu.ru.

Шабурова Наталия Александровна, канд. техн. наук, доцент кафедры материаловедения и физико-химии материалов, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; shaburovana@susu.ru.

Поступила в редакцию 18 февраля 2019 г.

DOI: 10.14529/met190207

DETERMINATION OF THE CAUSES OF LOW SHOCK VISCOSITY OF RING WELD

A.A. Shevchenko¹, Shevchenko_ooo@mail.ru,
E.S. Semenova², elena.semenova.1997@susu.ru,
N.A. Shaburova², shaburovana@susu.ru

¹ LLC “ETERNO”, Chelyabinsk, Russian Federation,

² South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

The reasons for the reduced toughness of the heat-affected zones and the weld metal in welded joints can be the heterogeneity of the chemical composition (segregation) and overheating of the metal. Segregation leads to non-uniformity of mechanical properties over the cross section of the welded joint. Overheating, accompanied by grain growth, significantly increases the tendency of the weld to brittle fracture. In this study, a stamped welded tee was investigated: the main magistral was made of 10Mn2VNbAl steel, the extension ring was made of 09Mn2Si steel. The aim

of the study was to establish the reasons for the low toughness of the annular weld of the specified product. Macrostructural studies of the welded joint showed that the seam was applied with displacement. The unevenness that occurs leads to a displacement of the fracture line, as a result of which the fracture takes place in the most fragile structure of the weld sections.

In the study of the microstructure of the weld metal, the presence of widmanstett-ferrite in the structure was established. This structural component is observed both at the external surface of the seam and in the center. The presence of widmanstett ferrite has a negative effect on the mechanical properties of the metal. Since microstructural studies showed an uneven distribution of coarse-needle-ferrite across the weld thickness, it was proposed to increase the number of passes during welding from three to four. Comparative studies of the structure and properties of samples of pilot welds showed the feasibility of such changes. So, measurements of microhardness of welded joints after welding in 3 and 4 passes showed that when applying 3 rollers, the hardness of the weld metal is lower than when applying 4 rollers, but no more than permissible values of 260 HV₁₀. Thus, according to a study to eliminate the causes of low toughness, the following measures were recommended: strict control of the welding technology of weld sections (to prevent displacement of the weld axis) and the establishment of the minimum number of passes during welding (to obtain the desired mechanical properties).

Keywords: weld, toughness of pipe steels, steel 10Mn2VNbAl, steel 09Mn2Si, overheating, widmanstett-ferrite.

References

1. Adaskin A.M., Sedov Yu.E., Onegin A.K., Klimov V.N. *Materialovedeniye v mashinostroyenii* [Materials Science in Mechanical Engineering]. Moscow, Publishing Yurayt, 2016. 535p.
2. Bernstein M.L., Zaymovsky M.A. *Mekhanicheskiye svoystva metallov* [Mechanical Properties of Metals]. 2nd ed. Moscow, Metallurgy Publ., 1979. 496 p.
3. Smirnov M.A., Schastlivtsev V.M., Zhuravlev L.G. *Osnovy termicheskoy obrabotki stali* [Fundamentals of Heat Treatment of Steel]. Ekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 1999. 495 p.
4. Lakhtin Yu.M., Leontiev V.P. *Materialovedeniye* [Materials Science]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. 528 p.
5. Gulyaev A.P. *Metallovedeniye* [Metal science. 6th ed.]. Moscow, Metallurgy Publ., 1986. 544 p.
6. Golikov I.N., Maslenkov S.B. *Dendritnaya likvatsiya v stalyakh i splavakh* [Dendritic Segregation in Steels and Alloys]. Moscow, Metallurgy Publ., 1977. 244 p.
7. Novikov I.I. *Teoriya termicheskoy obrabotki metallov* [Theory of Heat Treatment of Metals]. Moscow, Metallurgy Publ., 1978. 392 p.
8. Byront V.S. *Teoriya termicheskoy obrabotki metallov. Otzhig* [Theory of Heat Treatment of Metals. Annealing]. Krasnoyarsk, Siberian Federal University Publ., 2007. 180 p.
9. Ovchinnikov V.V. *Defekty svarnykh soyedineniy* [Defects of Welded Joints]. 4th ed. Moscow, Publishing Center "Academy", 2012. 64 p.
10. Fedosov S.A., Oskin I.E. *Osnovy tekhnologii svarki* [Fundamentals of Welding Technology]. 2nd ed. Moscow, Innovative Mechanical Engineering Publ., 2017. 125 p.
11. Gudkov A.A. *Treshchinostoykost' stali* [Crack Resistance of Steel]. Moscow, Metallurgy Publ., 1989. 375 p.
12. Brayent K.L., Benerjee S.K. (Eds.). *Okhrupchivaniye konstruktsionnykh staley i splavov* [Embrittlement of Structural Steels and Alloys]. Transl. from Engl. Moscow, Metallurgy Publ., 1988. 550 p.
13. Lednikov E.A., Cheprasov D.P., Konnik D.A. [Cold Resistance of Welded Joints of Steel Bridge Constructions from High-Quality Rolled Steel 10CrSiNiCuN and 15 CrSiNiCuN]. *Polzunovskiy al'manakh*, 2017, no. 1, pp. 84–90. (in Russ.)
14. Maksuti R., Mehmeti H., Imeri S. Correlation of Microstructure and Hardness of Twopass Submerged Arc Welds X65. *International Journal of Microstructure and Materials Properties*, 2010, vol. 4, no. 3, pp. 347–355. DOI: 10.1504/ijmmp.2009.031140

15. Shipilov A.V., Konovalov A.V., Brovko V.V., Poloskov S.I. [Control of the Structure of Welded Joints during Orbital TIG Welding of Technological Pipelines of Compressor Stations]. *News of Universities*, 2011, no. 6, pp. 44–52. (in Russ.)

Received 18 February 2019

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Шевченко, А.А. Определение причин низкой ударной вязкости кольцевого сварного шва / А.А. Шевченко, Е.С. Семенова, Н.А. Шабурова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2019. – Т. 19, № 2. – С. 63–70. DOI: 10.14529/met190207

FOR CITATION

Shevchenko A.A., Semenova E.S., Shaburova N.A. Determination of the Causes of Low Shock Viscosity of Ring Weld. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2019, vol. 19, no. 2, pp. 63–70. (in Russ.) DOI: 10.14529/met190207
