

АРГОНОДУГОВАЯ СВАРКА ТЕПЛООБМЕННИКА ТКВ-600 ИЗ РАЗНОРОДНЫХ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ И СПЛАВА НА ЖЕЛЕЗНИКЕЛЕВОЙ ОСНОВЕ

В.Н. Шабалин

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул

Изучены процессы, обуславливающие низкую технологическую прочность сварных соединений труб из аустенитного сплава 06ХН28МДТ с трубными решетками теплообменников из аустенитных сталей 12Х18Н10Т и 10Х17Н13М2Т. Показано, что основной причиной образования горячих трещин и снижения свойств сварных соединений является химическая и структурная неоднородность металла шва, неблагоприятные условия кристаллизации, а так же высокие внутренние сварочные напряжения в соединениях разнородных аустенитных сталей и сплава на железоникелевой основе. Разработана технология получения стойких к образованию горячих трещин сварных соединений труб с трубными решетками теплообменников ручной дуговой сваркой в аргоне (РАД). Рекомендованы необходимые сварочные материалы и режимы сварки.

Ключевые слова: аустенитные стали и сплавы, свариваемость, сварные соединения и швы, химическая и структурная неоднородность, склонность к образованию горячих трещин, стойкость к межкристаллитной коррозии (м.к.к.).

TIG WELDING OF HEAT EXCHANGER TCW-600 DISSIMILAR AUSTENITIC STEEL AND ALLOY BASED ON IRON-NICKEL

V.N. Shabalin - Ph.D., Professor,

The Altai state technical university of I.I. Polzunov, Barnaul

The processes causing poor technological strength of welded joints of austenitic alloy 06HN28MDT with tube plates of heat exchangers made of austenitic steel and 12X18H10T 10X17H13M2T. It is shown that the main cause of hot cracking and reduce the properties of welded joints is the chemical and structural heterogeneity of the weld metal, poor crystallization conditions, as well as high internal stresses in the welding joints of dissimilar steels, and austenitic iron-nickel-based alloy. The technology of obtaining resistant to hot cracking of welds between tubes and tube heat exchangers boards manual arc welding in argon (RAD). Recommended welding materials and the necessary welding modes.

Keywords: austenitic steels and alloys, weldability, welds and seams, the chemical and structural heterogeneity, the propensity to hot cracking, resistance to corrosion mezhkristal-litnoy (m.k.k.).

Существующая на предприятиях химической отрасли непрерывность производственных процессов требует устойчивой и надежной работы всего применяемого оборудования, приборов и аппаратов.

Однако, в связи с жесткими режимами работы и агрессивностью рабочих сред, многие виды оборудования и аппаратов имеют ограниченный ресурс службы, подлежат периодической замене и ремонту. Одним из таких аппаратов являются теплообменники, относящиеся к сосудам, работающим под давлением и состоящие из трубных пучков, сваренных с трубными решетками (фланцами), помещаемых в специальный кожух. Трубное пространство и трубные доски изготавливают обычно

из высоколегированных коррозионностойких сталей типа 08Х18Н10Т, 12Х18Н10Т, 10Х17Н13М2Т и др. по ГОСТ 5632. В теплообменниках выходят из строя, в основном, трубные пучки, которые заменяют набором новых труб.

При использовании труб и трубных досок из однородных аустенитных сталей сварка их при замене не вызывает больших затруднений и выполняется по достаточно хорошо отработанным технологиям с близкими по составу сварочными материалами.

В то же время, при изготовлении или ремонте теплообменников с целью увеличения продолжительности их жизненного цикла с

АРГОНОДУГОВАЯ СВАРКА ТЕПЛООБМЕННИКА ТКВ-600
ИЗ РАЗНОРОДНЫХ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ
И СПЛАВА НА ЖЕЛЕЗНИКЕЛЕВОЙ ОСНОВЕ

трубами из других высоколегированных коррозионностойких сталей, например из сплава на железоникелевой основе 06ХН28МДТ, поставляемых по этому же ГОСТ 5632-72 возникают трудности. При этом сварные швы могут иметь низкую технологическую прочность и большую склонность к образованию горячих трещин.

Данная работа посвящена разработке технологии ручной аргонодуговой сварки (РАД) неплавящимися вольфрамовыми электродами разнородных аустенитных сталей и сплава 06ХН28МДТ + 12Х18Н10Т; 06ХН28МДТ + 10Х17Н13М2Т с целью повышения стойкости металла шва и околошовной зоны против образования горячих трещин.

Проведенный анализ выполненных аргонодуговой сваркой (РАД) сварных соединений труб из сплава на железоникелевой основе 06ХН28МДТ с трубными решетками теплообменника из стали 12Х18Н10Т, по технологии принятой на одном из химических предприятий, позволил заключить, что образующиеся трещины имеются как в металле шва, так и в околошовной зоне трубок. Трещины расположены как в продольном, так и в поперечном направлениях швов. Возникающие трещины по своей природе относятся не только к кристаллизационным, но и подсолидным, образующимся после окончания процесса кристаллизации. Основной причиной образования горячих трещин (кристаллизационных и подсолидных) следует считать низкую деформационную способность (пластичность) и межкристаллитную прочность образующегося металла шва, а также возникновение и развитие больших растягивающих напряжений в сварном соединении в момент минимальной прочности и пластичности кристаллизующегося жидкого металла сварочной ванны.

Для повышения сопротивляемости образованию кристаллизационных трещин при сварке аустенитных сталей большинство авторов рекомендуют [1-3]:

1) подавление столбчатой кристаллизации и измельчение кристаллической структуры швов путем легирования элементами – модификаторами, а также элементами, способствующими образованию высокотемпературных вторичных фаз при кристаллизации;

2) повышение чистоты сплавов по примесям для сужения температурного интервала хрупкости и повышения запаса пластичности.

Технологические меры борьбы с кристаллизационными трещинами направлены на изыскание способов и режимов сварки плавлением и конструктивных форм сварных со-

единений, снижающих темп нарастания внутренних деформаций в процессе затвердевания швов.

Для повышения сопротивляемости металлов и их однофазных сплавов образованию подсолидных горячих трещин при сварке аустенитных сталей рекомендуют [4-6]:

1) легирование сплавов элементами, снижающими диффузионную подвижность атомов в кристаллической решетке или способствующими созданию фрагментарной литой структуры;

2) повышение чистоты основного металла по примесям внедрения;

3) сокращение времени нахождения металла при температуре высокой диффузионной подвижности атомов и снижение темпа нарастания упруго-пластических деформаций при охлаждении.

Наиболее важными металлургическими факторами, способствующими повышению сопротивляемости металла шва образованию горячих трещин при сварке аустенитных сталей являются [7-8]:

1) образование двухфазной структуры в высокотемпературной области при кристаллизации металла шва за счет выделения первичного феррита, дисперсных частиц тугоплавкой фазы или боридной и хромоникелевой эвтектики;

2) ограничение содержания примесей, образующих легкоплавкие фазы, с целью сужения эффективного интервала кристаллизации.

Для измельчения структуры используют легирование наплавленного металла элементами, способствующими выделению при кристаллизации высокотемпературного δ -феррита. Наличие δ -феррита измельчает структуру металла шва и уменьшает концентрацию S, P и некоторых других примесей в межкристаллитных областях за счет большей растворимости этих примесей в δ -феррите, что уменьшает опасность образования легкоплавких эвтектик. Рекомендованное содержание ферритной фазы в наплавленном металле нестабильно аустенитных сталей ограничивается 2-6%. При сварке сталей с более высокой степенью аустенитности пределы содержания ферритной фазы в наплавленном металле повышают для того, чтобы обеспечить ее присутствие в шве с учетом перемешивания наплавленного металла с основным. Получение аустенитно-ферритной структуры швов на глубоко аустенитных сталях, содержащих более 15% Ni, требует повышенное их легирования ферритообразующими элементами, что приводит к снижению пластических свойств шва и охрупчиванию за счет появления хрупких эвтектик, а иногда и σ -фазы. Поэтому в

швах на таких сталях стремятся получить аустенитную структуру с мелкодисперсными карбидами и интерметаллидами, а также легировать швы повышенным количеством молибдена, марганца и вольфрама, подавляющими процесс образования горячих трещин [9-11]. Азот, являясь сильным аустенизатором одновременно способствует измельчению структуры за счет увеличения центров кристаллизации в виде тугоплавких нитридов.

Поэтому азотация металла шва способствует повышению их стойкости против горячих трещин. Необходимо также ограничение в основном и наплавленном металлах содержания вредных (S, P) и ликвирующих примесей, а также газов – кислорода и водорода. Для этого следует применять режимы, уменьшающие долю основного металла в шве и использовать стали и сварочные материалы с минимальным их содержанием.

Важным мероприятием для борьбы с горячими трещинами является применение технологических приемов, направленных на изменение формы сварочной ванны и направления роста кристаллов аустенита, а также уменьшение силового фактора, возникающего в результате термического цикла сварки, усадочных явлений и жесткости закрепления свариваемых кромок. Снижение усадочных деформаций достигается ограничением сварочного тока, заполнение разделок швами небольшого сечения и применением разделок свариваемых кромок специальной конструкции. Этому же способствует хорошая заделка кратеров при обрыве сварочной дуги. Техника сварки должна обеспечивать минимальное насыщение шва газами.

При сварке в аргоне для предупреждения подсоса воздуха необходимо поддерживать короткий вылет вольфрамового электрода, выбирать оптимальную скорость сварки и расход защитного газа.

В тоже время для предупреждения межкристаллитной коррозии сварных соединений аустенитных сталей не следует допускать повышение в металле шва углерода и длительного и многократного пребывания металла сварного соединения в интервале критических температур. Поэтому сварку необходимо выполнять при возможно наименьшей погонной энергии. Повторное возбуждение дуги оказывает нежелательное тепловое воздействие на металл, что может вызвать появление склонности его к коррозии. Швы, обращенные к агрессивной среде, следует, по возможности, сваривать в последнюю очередь, чтобы предупредить его повторный нагрев, а последующие швы при многопроходной сварке следует

выполнять после полного охлаждения предыдущих и принимать меры к ускоренному охлаждению сварных швов.

Таким образом, основными направлениями по борьбе с горячими трещинами при аргонодуговой сварке труб из сплава на железоникелевой основе 06ХН28МДТ с трубными решетками теплообменника из сталей 12Х18Н10Т и 10Х17Н13М2Т являются:

1) выбор необходимых сварочных материалов, в том числе соответствующих марок сварочной проволоки;

2) выбор и назначение оптимальных технологических приемов и режимов РАД.

Для определения химического и фазового состава сварных швов из разнородных аустенитных сталей и сплавов можно выделить два случая:

1) свариваемые стали относятся к одному структурному классу и отличаются только по степени легирования;

2) свариваемые стали относятся к различным структурным классам.

В данном случае свариваемые разнородные стали и сплав относились к одному структурному классу. Средний химический состав металла шва при сварке разнородных сталей со сплавом на железоникелевой основе будет определяться исходным составом свариваемых материалов, присадочной проволоки и долями их участия в образовании шва [12]. Содержание любого элемента в сварном шве может быть определено по формуле

$$[Me]_{ш} = n_A \cdot [Me]_A + n_B \cdot [Me]_B + n_{П} \cdot [Me]_{П}, \% \quad (1)$$

где $[Me]_A$, $[Me]_B$, $[Me]_{П}$ – содержание компонента $[Me]$ соответственно в свариваемых материалах А и В и присадочном металле – П; n_A , n_B , $n_{П}$ – доли их участия в образовании сварного шва.

В зависимости от режима и технологии сварки доли участия могут изменяться в широких пределах. Однако, высоколегированные стали одного структурного класса, но разного легирования проплавляются практически одинаково, поэтому доли их участия в формировании шва принимаются равными. Доли участия определяли по исходной конфигурации свариваемых кромок до расплавления и конечным геометрическим размерам шва. Площадь поперечного сечения шва определяли по выражению:

$$F_{ш} = F_{ПР} + F_H, \text{ мм}^2 \quad (2)$$

где $F_{ПР}$ и F_H – площади поперечного сечения расплавленных кромок основного и наплавленного электродного (присадочного) металла.

АРГОНОДУГОВАЯ СВАРКА ТЕПЛООБМЕННИКА ТКВ-600
ИЗ РАЗНОРОДНЫХ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ
И СПЛАВА НА ЖЕЛЕЗНИКЕЛЕВОЙ ОСНОВЕ

Доля участия основного металла в формировании шва определялась отношением:

$$\gamma_0 = (n_A + n_B) = \frac{F_{ПР}}{(F_{ПР} + F_H)} \quad (3)$$

Соответственно, доля участия наплавленного металла в образовании шва определялась по выражению:

$$\gamma_H = (n_H) = \frac{F_H}{(F_{ПР} + F_H)} \quad (4)$$

Свойства металла шва в значительной мере определяются его составом и структурным состоянием. Поэтому оценку фазового состава и структуры металла сварных швов из разнородных аустенитных сталей и сплава на железоникелевой основе в зависимости от доли участия и состава основного и наплавленного металла выполняли с помощью структурной диаграммы Шеффлера [13]. С ее помощью определяли предельно допустимую долю участия в шве основного и наплавленного металла и оценивали возможность использования принятых сварочных (присадочных) проволок и режимов сварки. Учитывая, что при однопроводной сварке состав металла шва достаточно однороден, по имеющимся формулам рассчитывали эквивалент хрома и никеля в металле сварных швов [13]. Эквивалент хрома определяли по формуле

$$Cr_{\text{экв.}} = Cr + 1,5Si + 3,5Ti + 0,5Nb + Mo + V, \% \quad (5)$$

Эквивалент никеля соответственно определяли по формуле

$$Ni_{\text{экв.}} = Ni + 30C + 0,5Mn, \% \quad (6)$$

Таблица 1 - Химический состав свариваемых сталей

Содержание элементов, %	Марка стали		
	12X18H10T (фланец)	10X17H13M2 (фланец)	06XH28МДТ (труба)
C	0,12	0,10	0,06
Mn	2,0	2,0	0,8
Si	0,8	0,8	0,8
Cr	18,0	17,0	23,5
Ni	10,0	13,0	27,5
Ti	0,7	0,6	0,5
Mo	-	2,5	2,75
Cu	-	-	3,0
S	≤	0,02	0,02
P		0,035	0,035

Расчётные значения эквивалентов $Cr_{\text{экв.}}$ и $Ni_{\text{экв.}}$ наносили на диаграмму Шеффлера и оценивали фазовый состав и структуру металла шва. При этом изыскивали приемы, обеспечивающие формирование металла

шва с благоприятной структурой, обеспечивающей при определенном химическом составе и условиях охлаждения отсутствие горячих трещин. Состав металла шва регулировали, изменяя доли участия основного и присадочного металла, а так же выбирая оптимальный состав присадочного металла.

Химический состав сталей и сплава, используемых для трубных досок теплообменников и трубных пучков, приведен в таблице 1.

Стали, используемые для трубных досок и сплав для трубных пучков теплообменников относятся к высоколегированным хромоникелевым сталям и сплавам аустенитного класса, имеющим различную степень легированности. По запасу аустенитности стали и сплав можно разделить на две группы: 1) с малым запасом аустенитности ($\frac{Cr}{Ni} > 1$) – стали 12X18H10T и 10X17H13M2Т; 2) сплав с большим запасом аустенитности ($\frac{Cr}{Ni} < 1$) – сплав 06XH28МДТ.

Стали 12X18H10T, 10X17H13M2Т и сплав 06XH28МДТ обладают высокой коррозионной стойкостью в различных агрессивных средах и достаточно высокими комплексом физико-механических свойств при нормальной и повышенной температурах и достаточно широко распространены в химическом машиностроении.

Химический состав сварочных проволок, выбранных для сварки данных аустенитных сталей и сплава на железоникелевой основе приведен в таблице 2.

Таблица 2 - Химический состав высоколегированной сварочной проволоки

Содержание элементов, %	Марка сварочной проволоки				
	Св-06X19H9T	Св-08X20H9Г7Т	Св-04X19H11M3	Св-01X23H28M3Д3Т	Св-01X19H18Г10AM4
C	0,08	0,10	0,06	0,03	0,03
Mn	1,5	7,0	1,5	0,5	10,0
Si	0,7	0,7	0,6	0,5	0,5
Cr	19,0	20,0	19,0	23,5	19,0
Ni	9,0	9,0	11,0	28,0	18,0
Ti	0,7	0,7	-	0,7	-
Mo	-	-	3,0	3,0	4,0
Cu	-	-	-	3,0	-
N	-	-	-	-	0,2
S	<	0,015	0,018	0,018	0,018
P		0,03	0,035	0,025	0,03

Химический состав сварочных проволок марки Св-06X19H9Т, Св-08X20H9Г7Т, Св-

04X19H11M3, Св-01X23H28M3ДЗТ соответствует ГОСТ 2246-70. Присадочные проволоки, приведенные в таблице 2, выбирали в соответствии с рекомендациями ОСТ 26.260-3-2001 «Сварка в химическом машиностроении. Основные положения». Выбранные для исследования ряд присадочных проволок для аргонодуговой сварки отличается друг от друга по содержанию С, Мп, Ni, Cr, Mo, Cu, Ti и N. Хром в проволоке и стали является основным ферритообразующим элементом, а никель, наоборот – аустенитообразующим. Углерод, азот, марганец, медь действуют подобно никелю, а молибден, кремний, ванадий и титан – подобно хрому. Поэтому формируемая структура сварных швов будет зависеть от количества вводимых ферритообразующих и аустенитообразующих элементов, как через сварочную проволоку так и из оплавляемых кромок свариваемых сталей и сплава.

Экспериментальные работы по аргонодуговой сварки разнородных аустенитных сталей и сплава проводили в производственных условиях, сваривая специально подготовленные патрубки из сплава 06ХН28МДТ с трубной доской теплообменника из стали 12Х18Н10Т. Длина патрубков – 300 мм, диаметр – 25 мм, толщина стенки труб для патрубков – 2,5 мм. Опытная решетка теплообменника имела диаметр 650 мм, толщина – 70 мм. В трубной доске было подготовлено 64 отверстия $\varnothing$ 25 мм для установки и привари патрубков. Верхнюю часть отверстий в трубной доске обрабатывали под углом $45^\circ \pm 5^\circ$ на глубину до 5 мм. Сборку патрубков с трубной доской выполняли на прихватках дуговой сваркой неплавящимся электродом в аргоне. Собранные соединения являются угловыми с односторонним скосом кромки и соответствуют ГОСТ 14771-76 и ГОСТ 16037-80. Аргонодуговую сварку патрубков с трубной доской теплообменника выполняли на установке УДГУ-301 на постоянном токе прямой полярности, вольфрамовыми электродами марки ЭВЛ (ГОСТ 23949-80) диаметром 3 мм, с присадочными проволоками, приведенными в таблице 2, диаметром 1,6 и 2,0 мм. Аргон использовали баллонный газообразный первого сорта (ГОСТ 10157-79), расход аргона – 10-12 л/мин. При изменении исследуемого фактора (марка сварочной проволоки, режим сварки) приваренные патрубки удаляли, собирая с трубной доской новые. Для оценки влияния выбранного фактора на склонность швов к образованию

горячих трещин к экспериментальной трубной доске приваривали от 24 до 32 патрубков. Сварочный ток устанавливали в пределах $I_d = 140-180$ А, напряжение на дуге $U_d = 16-18$ В, вылет электрода $l_d = 10-12$ мм, выпуск электрода $l_e = 5-7$ мм. Сварку выполняли «левым» способом, без поперечных колебаний горелки, с заправлением разделки за один проход. Патрубки обваривали по рядам, последовательно, сначала с одной, а затем с другой стороны. Доля участия основного металла в формировании сварных швов составляла $\gamma_o = 0,5$, доля наплавленного металла $\gamma_n = 1-0,5 = 0,5$. Так как свариваемые аустенитные стали и сплав оплавляются практически одинаково, то доли их участия в формировании шва соответственно равны по 0,25. После сварки одного ряда патрубков швы охлаждались на воздухе до температуры равной 100-120 °С. Оценку качества выполненных швов производили внешним осмотром с использованием лупы с 10-кратным увеличением.

На основании проведенных серии опытов по аргонодуговой сварки патрубков из сплава 06ХН28МДТ с трубной доской теплообменника из стали 12Х18Н10Т выбранными присадочными проволоками было установлено:

1) использование присадочных проволок марок Св-06Х19Н9Т, Св-08Х20Н9Г7Т и Св-04Х19Н11М3 не дает положительных результатов. В сварных швах образуются горячие трещины;

2) отсутствие трещин в сварных швах при использовании сварочных проволок марки Св-01Х23Н28М3ДЗТ и Св-01Х19Н18Г10АМ4. В данных сварных швах отсутствуют горячие трещины.

Для анализа полученных результатов производили расчет усредненного химического состава сварных швов по формуле (1). При этом для оценки структуры металла швов, выполненных с выбранными присадочными проволоками, рассчитывали эквивалентное содержание $Cr_{экв.}$ и $Ni_{экв.}$ по формулам (5) и (6) для каждого из вариантов. Расчетные значения эквивалента по хрому и никелю для сварных швов с присадочной проволокой Св-06Х19Н9Т (обр. №1), Св-08Х20Н9Г7Т (обр. №2), Св-04Х19Н11М3 (обр. №3), Св-01Х23Н28М3ДЗТ (обр. №4), Св-01Х19Н18Г10АМ4 (обр. №5) наносили на диаграмму Шеффлера, приведенную на рисунке 1.

АРГОНОДУГОВАЯ СВАРКА ТЕПЛООБМЕННИКА ТКВ-600
ИЗ РАЗНОРОДНЫХ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ
И СПЛАВА НА ЖЕЛЕЗНИКЕЛЕВОЙ ОСНОВЕ

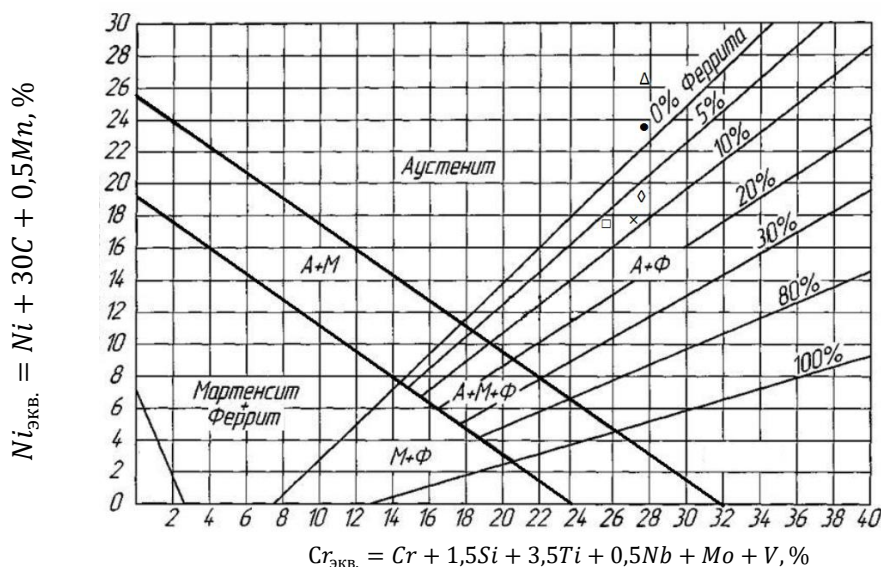


Рисунок 1 – Диаграмма Шеффлера для определения структуры сварных швов:
□ – обр. №1; ◇ - обр. №2; × - обр. №3; Δ - обр. №4; ● – обр. №5

Расчеты эквивалентных содержаний $Cr_{\text{экв.}}$ и $Ni_{\text{экв.}}$ и структурная диаграмма Шеффлера показывают наличие аустенитно-ферритной структуры в сварных швах образцов № 1-3 и чисто аустенитной структуры в сварных швах образцов № 4-5. Существование однофазной структуры в сварных швах аустенитных сталей может быть также подтверждено расчетом по формуле:

$$[Cr] = 0,9 Ni_{\text{экв.}} + 7,5 \% \quad (7)$$

Формула (7) выражает граничные условия существования металла с однофазной аустенитной или аустенитно-ферритной структурой. Расчетное содержание хрома в образцах по формуле (7) составляет: №1 – 23%, №2 – 24,4%, №3 – 23,6%, №4 – 30,6, №5 – 28,2%. Так как полученные значения эквивалента хрома для образцов № 1-3 больше расчетного значения хрома (формула 7), то металл швов действительно имеет аустенитно-ферритную структуру. Для образцов № 4-5 эквивалент хрома меньше расчетного значения хрома (формула 7) и металл шва при этом будет иметь однофазную аустенитную структуру.

На основании исследований было установлено, что при использовании присадочных проволок Св-06Х19Н9Т, Св-08Х20Н9Г7Т и Св-04Х19Н11МЗ для сварки сплава и стали 06ХН28МДТ+12Х18Н10Т в аргоне на всех возможных режимах в швах образуются горячие трещины. Применение присадочных проволок Св-01Х23Н28МЗДЗТ и Св-01Х19Н18Г10АМ4 позволяет избежать возникновения трещин в швах при аргонодуговой сварке неплавящи-

мися электродами ЭВЛ, $\varnothing$ 3 мм на токах в диапазоне $I_d = 140 - 180$ А и напряжении на дуге $U_d = 14 - 18$ В.

Таким образом при сварке разнородных сплава и сталей 06ХН28МДТ+12Х18Н10Т и 06ХН28МДТ+10Х17Н13М2Т не удается устранить горячие трещины за счет формирования в швах аустенитно-ферритной структуры с рекомендуемым многими авторами содержанием δ -феррита в пределах 2-10 %.

Отсутствие трещин при аргонодуговой сварке труб из аустенитного сплава и аустенитных сталей получено на швах с чисто аустенитной структурой, измельченной нитридами азота в сочетании с марганцем и молибденом или дополнительным легированием аустенитного шва медью, молибденом и титаном. Аустенитная структура обеспечивает необходимую прочность и пластичность металла шва в температурном интервале хрупкости, что нельзя отметить в данном случае о швах с аустенитно-ферритной структурой. Низкое содержание углерода в швах, свариваемых с проволоками Св-01Х23Н28МЗДЗТ и Св-01Х19Н18Г10АМ4 в сочетании с аустенитной структурой должно обеспечить и их высокую коррозионную стойкость в изделиях.

Результаты экспериментов подтверждены при ремонте и восстановлении кожухотрубного теплообменника ТКВ-600 с использованием труб из сплава 06ХН28МДТ и трубных досок из стали 12Х18Н10Т. Количество заготовок труб на один теплообменник составляло 258 штук. Поверхность трубных досок из стали 12Х18Н10Т и отверстия для трубок очищали

от загрязнений и обезжиривали ацетоном, очистке и обезжириванию подвергали также торцы всех трубок трубного пучка. Затем выполняли полный набор трубного пучка и прихватку трубок к трубным решеткам, прихватки выполняли на режиме, установленном для сварки. Режим сварки устанавливали подобным опытным образцам. В качестве присадки использовали сварочную проволоку марки Св-01Х19Н18Г10АМ4 диаметром 2 мм. Сварку трубок с трубными решетками выполняли «левым» способом, обваривая 5-6 трубок с одной стороны ряда, а затем с другой. После сварки одного-двух рядов трубок швы охлаждали на воздухе, затем продолжали сварку. Температура нагрева изделия при сварке не превышала 100 °С. После приварки всех трубок к одной трубной доске, теплообменник переворачивали и производили сварку трубок на другой трубной доске в такой же последовательности.

Сварные швы контролировали ВИК 100 %, а изготовленные теплообменники испытывали на пробное гидравлическое давление, равное 3 Мпа в течение часа.

Проведенные эксперименты и промышленное апробирования показало, что для устранения горячих трещин при аргонодуговой сварке труб с трубными решетками теплообменников из аустенитного сплава и аустенитной стали 06ХН28МДТ+ 12Х18Н10Т необходимо применять присадочную проволоку марки Св-01Х19Н18Г10АМ4 (ТУ-14-1-1892-76) или Св-01Х23Н28МЗДЗТ (ГОСТ 2246-70) диаметром 1,6-2,0 мм; сварку целесообразно вести вольфрамовыми электродами марки ЭВЛ (ГОСТ 23949-80) диаметром 3 мм с выпуском 5-7 мм на постоянном токе прямой полярности, величина сварочного тока $I_d = 140-160$ А, напряжение на дуге $U_d = 16 - 18$ В, формируя шов за один проход и обеспечивая периодическое охлаждение швов до температуры ниже 100-120°С. Расход аргона при сварке в пределах 10-12 л/мин. Сваренные по разработанной технологии теплообменники прошли гидравлические испытания и были приняты для эксплуатации в производстве.

Список литературы

1. Мовчан Б.А. О причинах и механизме образования горячих трещин в сварных швах с однофазной аустенитной структурой // Автоматическая сварка. – 1959. - №6. С. 8-11.
2. Демьяненко Г.П. Влияние режима сварки и предварительного подогрева свариваемой стали на склонность однофазных аустенитных швов к образованию горячих трещин / Демьяненко Г.П., Каховский Ю.Н. // Автоматическая сварка. – 1972. - №5. С. 21-24.
3. Каховский Н.И. Сварка нержавеющей сталей. Киев. – «Техника». – 1968. С. 356.
4. Каховский Ю.Н. Сварка хромоникельмолибденовых однофазных аустенитных сталей. // Автоматическая сварка. – 1970. - №1. С. 15-17.
5. Рыкалин Н.Н. Состояние и задачи развития теории технологической прочности металлов в процессе кристаллизации при сварке. // Сварочное производство. – 1971. №6. – С.5-7.
6. Якушин Б.Ф. О достоверности критериев и способов оценки технологической прочности металлов в процессе кристаллизации при сварке. // Сварочное производство. – 1971. №6. – С.9-12.
7. Медовар Б.И. Сварка аустенитных сталей и сплавов. Киев. – «Техника». 1964. С.468.
8. Медовар Б.И. Сварка жаропрочных аустенитных сталей и сплавов. М.: Машиностроение. 1966. С. 389.
9. Чепрасов Д.П. Дуговая сварка плакированных сталей аустенитным швом / Чепрасов Д.П., Шабалин В.Н. // Прогрессивные методы получения конструкционных материалов и покрытий, повышающих долговечность деталей машин: тезисы докладов Межреспубликанской науч.-техн. конференции. – Волгоград. – 1991. – С. 56-58.
10. ОСТ 26.260.3-2001 Сварка в химическом машиностроении. С. 283.
11. ГОСТ Р52630-2006 Сосуды и аппараты стальные сварные. С. 24.
12. Акулов А.И. Технология и оборудование сварки плавлением и термической резки: учебник для вузов / под ред. А.И. Акулова. – М: Машиностроение, 2003. – 560 с.
13. Земзин В.Н. Сварные соединения разнородных сталей. – М: Машиностроение, 1966. – 231 с.