

НЕКОТОРЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ МОНТАЖНО-СВАРОЧНЫХ РАБОТ ПРИ СООРУЖЕНИИ ИЗОТЕРМИЧЕСКИХ РЕЗЕРВУАРОВ

М. БЕЛОЕВ¹, Н. ЛОЛОВ²

¹KZU Holding Group. 1700, София, Болгария, ул. проф. Христо Вакарелски, 12

²Технический университет. 1000, София, Болгария, бульвар Климента Охридского, 8.

E-mail: marin.beloev@kzu-group.com

Рассмотрены основные технологические особенности, которые необходимо учитывать при проектировании, изготовлении и монтаже резервуаров для хранения сжиженного природного газа из стали с 9 % Ni. Они включают подготовку к сварке, выбор сварочных процессов и материалов, модульную сборку резервуара на монтаже, применение ультразвуковой проковки сварных соединений для снятия напряжений. Библиогр. 8, табл. 6, рис. 5.

Ключевые слова: дуговая сварка, изотермические резервуары, сталь с 9 % Ni, проектирование, изготовление, монтаж, модульная сборка, ультразвуковая проковка

Изотермические резервуары достаточно широко используются для хранения сжиженных газов, при этом сжижение позволяет значительно уменьшить объем газа при его переходе из газообразного состояния в жидкое. Например, объем природного газа уменьшается более чем в 600 раз. Изотермические резервуары двухкорпусные, внутренний резервуар входит в непосредственный контакт с хранимым продуктом, находящимся при низкой температуре. Это означает, что необходимо обратить особое внимание на материал, из которого он изготавливается, а также на выполнение монтажно-сварочных работ при его сооружении.

В табл. 1 [1, 2] приведены требуемые температуры сжижения различных газов и надлежащие материалы для изготовления сооружений для хранения и транспортировки.

Интерес к использованию природного газа в качестве источника энергии постоянно растет. Каждый год находят все новые и новые месторождения природного газа, и в глобальном масштабе газа добывается в 4 раза больше, чем потребляется. Поскольку месторождения (страны Персидского залива, Центральная Азия, Аляска, шельф Арктики) и индустриальные центры потребления газа (Европа, Япония, Северная Америка) значительно удалены друг от друга, природный газ необходимо транспортировать на очень отдаленные расстояния и большая его часть должна храниться в изотермических резервуарах в сжиженном состоянии.

Материалы для строительства резервуаров для сжиженного природного газа должны иметь низкотемпературную вязкость. В соответствии с SEW 680 сталями с низкотемпера-

турной вязкостью являются стали, которые сохраняют энергию разрушения при испытании на ударную вязкость, по меньшей мере 27 Дж при температурах ниже $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, а по DIN 17280 предельное значение низкотемпературной вязкости указано при температуре $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Кроме того, материалы должны иметь высокую прочность, что позволит уменьшить толщину стенки сосуда и обеспечить сварку без опасности хрупкого разрушения. До недавнего времени применялись высоколегированные и специальные материалы, к которым относятся аустенитные сварочные материалы, никелевые сплавы, алюминиевые сплавы, медь и медные сплавы. Поскольку объем применений в криогенной технике постоянно растет, а указанные материалы очень дороги, возникла необходимость в разработке более дешевых низколегированных сталей. Чаще всего это никелевые стали с различным содержанием

Таблица 1. Температуры сжижения газов и материалы, применимые к этим температурам

Газ	$T, ^{\circ}\text{C}$	Марка основного металла
Аммиак	$-33,4$	Углеродистая сталь
Пропан	$-42,1$	Раскисленная мелкозернистая сталь
Пропилен	$-47,7$	Сталь с 2,25 % Ni
Углеродный дисульфид	$-50,2$	
Двуокись углерода	$-78,5$	Сталь с 3,5 % Ni
Ацетилен	$-84,0$	
Этан	$-88,4$	
Этилен	$-103,8$	Сталь с 5...9 % Ni
Метан (природный газ)	$-163,0$	
Кислород	$-182,9$	
Аргон	$-185,9$	

ем никеля в зависимости от эксплуатационной температуры.

Поскольку температура сжиженного природного газа составляет $-163\text{ }^{\circ}\text{C}$, подходящим материалом для изготовления изотермических резервуаров для сжиженного природного газа является сталь с 9 % Ni, которая обеспечивает хорошее сочетание свойств по приемлемой цене.

Исключительные низкотемпературные свойства ударной вязкости являются результатом получения особо мелкозернистой структуры прочного никелевого феррита. Небольшие количества остаточного аустенита, образовавшегося при отпуске, улучшают ударную вязкость после термообработки. Наряду с хорошей вязкостью, полученной в результате улучшения структуры, сталь также имеет более высокие прочностные свойства.

В табл. 2 [3] представлена информация о химическом составе и механических свойствах стали с 9 % Ni. Для обеспечения хорошей низкотемпературной вязкости эта сталь должна быть высокой чистоты, т. е. с низким содержанием фосфора и серы, а также сбалансированным содержанием основных легирующих элементов.

Для проектирования, сооружения, инспекции и обслуживания резервуаров для сжиженного природного газа из стали с 9 % Ni существует широкий спектр требований и стандартов. Ниже приводится ряд соответствующих стандартов ASME, API, EN и JIS.

1. ASME Sec. VIII, Div. 1: проектирование и изготовление сосудов высокого давления; Div. 2: Альтернативные правила.

2. API Standard 620: проектирование и сооружение крупногабаритных сварных резервуаров низкого давления, Приложение Q: Резервуары для хранения под низким давлением

сжиженных углеводородных газов при температурах не ниже $-168\text{ }^{\circ}\text{C}$.

3. EN 14620-1 (2006): Проектирование и сооружение в месте эксплуатации вертикальных цилиндрических плоскостенных стальных емкостей для хранения охлажденных сжиженных газов при рабочих температурах между 0 и $-165\text{ }^{\circ}\text{C}$. Часть 1. Общие положения.

4. JIS B8265 (2010): Сооружение сосудов под давлением – Общие принципы; JIS B8267 (2008): Сооружение сосудов под давлением.

Факторы, влияющие на сварку стали с 9 % Ni. Успешная сварка стали с 9 % Ni при сохранении ее низкотемпературной вязкости зависит от ряда факторов, которыми являются:

- способ получения и марка поставленной стали;
- свойства основного металла, остаточный магнетизм, склонность к магнитному дугу, теплопроводность и тепловое расширение;
- сварочный процесс;
- погонная энергия сварки;
- скорость охлаждения, зависимость от температуры подогрева и температуры между проходами.

Подготовка к сварке. Никелевые стали с низкотемпературной вязкостью склонны к сохранению остаточного магнетизма, что отрицательно влияет на их поведение во время сварки из-за возникновения магнитного дуга. Поэтому необходимо выполнять их сварку в размагниченном состоянии. При заказе на поставку стали наряду со свидетельством о проверке в соответствии с EN 10204 «Сертификация материалов» также необходимо оговорить и освидетельствование силы магнитного поля, которая не должна превышать среднее значение $20 \cdot 10^{-4}$ Тл. Это гарантирует, что

Таблица 2. Требования к стали с 9 % Ni по ASTM и JIS

Стандарт	ASTM		JIS G 3127	
	A353	A353 (Тип I)	SL9N 520	SL9N 590
Максимальная толщина (мм)	50	50	50	100
Термообработка	NNT*1	Улучшенная	NNT	Улучшенная
C (%)	$\leq 0,13$		$\leq 0,12$	
Si (%)	0,15...0,40		$\leq 0,30$	
Mn (%)	$\leq 0,90$		$\leq 0,90$	
P (%)	$\leq 0,035$		$\leq 0,025$	
S (%)	$\leq 0,035$		$\leq 0,025$	
Ni (%)	8,50...9,50		8,50...9,50	
Предел текучести (МПа)	≥ 515	≥ 585	≥ 520	≥ 590
Предел прочности (МПа)	690...825		690...830	
Относительное удлинение (%)	$\geq 20,0$		$\geq 21 (6 \leq t \leq 16)^{*2}$ $\geq 25 (t > 16)^{*2}$ $\geq 21 (t > 20)^{*3}$	
Ударная вязкость при $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$	≥ 34		≥ 34	≥ 41
Поперечное расширение при $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\geq 0,38$		-	

*1 — NNT дважды нормализованная и закаленная. *2 — Плоский образец № 5, согласно JIS Z 2201 (мерная длина 50 мм).
*3 — Круглый образец № 4, согласно JIS Z 2201 (мерная длина 50 мм).

магнитное поле не будет влиять на сварочный процесс, особенно при сварке трубных или цилиндрических элементов.

Сварочные процессы и сварочные материалы. Для сварки стали с 9 % Ni используются следующие методы сварки: ручная электродуговая сварка покрытыми электродами, сварка порошковой проволокой, сварка под флюсом, ВИГ и МИГ сварка. Выбор сварочных материалов для этих сталей зависит от ряда факторов: безопасности, расчета конструкции изделия и экономической эффективности.

Безопасность изделия определяется следующими свойствами сварочного материала: коэффициент термического расширения, чувствительность к водороду, устойчивость к образованию горячих трещин, ударная вязкость, распространение трещин, относительное удлинение после разрыва /разрывная прочность/ при растягивающей деформации, поведение с точки зрения механики разрушения.

При проектировании изделия следует учитывать: предел текучести, прочность и ударную вязкость при расчетной температуре.

Экономическая эффективность требует учета таких факторов, как методы сварки, производительность вложения сварочного материала, ремонтпригодность, стоимость сварочных материалов.

Характеристики отдельных групп сварочных материалов. *Сварка однородными материалами.* К этой группе относятся сварочные материалы с содержанием никеля 9 %. Для ответственных конструкций сварка однородным металлом не рекомендуется, поскольку она не может гарантировать достаточную ударную вязкость металла шва.

1. Хромоникелевые аустенитные сварочные материалы (легирующий тип Cr–Ni). Обеспечивают хороший предел прочности и предел текучести металла шва. Металл шва имеет высокую ударную вязкость при температурах свыше $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$.

2. Никелевые сплавы.

Этот вариант предпочтительнее из-за большей устойчивости металла шва при переменных температурах.

Сварочные материалы на никелевой основе, такие как Inconel (Ni–Cr сплав) и Hastalloy (Ni–Mo сплав), имеют почти одинаковый коэффициент линейного расширения, что и сталь с 9 % Ni, в то время как аустенитные сварочные материалы имеют линейный коэффициент расширения, отличный от коэффициента расширения стали с 9 % Ni. Если не учитывать эти особенности, существует риск термической усталости, возникающей в результате разного термического расширения. Сварочные материалы на основе никеля обеспечивают более низкую скорость распространения трещин.

Спецификации и свойства сварочных материалов. В табл. 3 [3] приведены требования спецификаций AWS и JIS для сварочных материалов для стали с 9 % Ni.

Покрытые электроды. В соответствии со спецификацией AWS-A5.11 рекомендуются следующие типы покрытых электродов: E_{ni}CrFe-9, E_{ni}CrMo-6 и E_{ni}Mo-8,а согласно JIS Z 3225; D9Ni-1 и D9Ni-2.

Порошковые проволоки. Использование порошковой проволоки для сварки резервуаров для сжиженного природного газа из стали с 9 % Ni ограничено из-за жесткого контроля параметров сварки в узком диапазоне во избежание образования горячих трещин, а сварка во всех пространственных позициях затруднена.

ВИГ-сварка с механизированной подачей сплошной проволоки. Используется в основном в Японии.

Основным преимуществом сварки ВИГ является возможность использования автоматической сварки при повышенных значениях тока и преднамеренное магнитное отклонение дуги для получения высококачественного металла шва. Этот метод сварки в два раза эффективнее сварки покрытыми электродами и в четыре раза эффективнее ручной ВИГ сварки. Более того, этот метод позволил снизить почти до нуля появление дефектов и улучшить время выполнения сварки, общую стоимость и качество шва.

Сварка под флюсом. В спецификациях для сварки под флюсом в А 5.14 AWS регламентиру-

Таблица 3. AWS и JIS спецификации для сварочных материалов для стали с 9 % Ni

Процесс	AWS стандарт	Спецификации для
Ручная электродуговая сварка	A5.11/A5.11M:2005	Покрытых электродов из никеля и никелевых сплавов
Сварка порошковой проволокой	A5.34/A5.34M:2007	Порошковой проволоки из никелевых сплавов
МИГ сварка ВИГ сварка Сварка под флюсом	A5.14/A5.14M:2005	Сплошной проволоки из никеля и никелевых сплавов
Процесс	JIS стандарт	Спецификации для
Ручная электродуговая сварка	Z 3225:1999	Покрытых электродов для стали с 9 % Ni
ВИГ сварка	Z 3332:1999	Прутков и сплошной проволоки для ВИГ сварки стали с 9 % Ni
Сварка под флюсом	Z 3335:1999	Сплошной проволоки и флюсов для сварки под флюсом стали с 9 % Ni

Таблица 4. Технические требования на проволоку (AWS) и флюсы (JIS) для автоматической сварки

Технические требования	AWS A5.14 Проволока ERNiMo-8	JIS Z 3333	
		Флюс FS9Ni-F/YS9Ni металл шва	Флюс FS9Ni-H/YS9Ni металл шва
Для химического состава			
C (%)	≤ 0,10	≤ 0,10	≤ 0,10
Si (%)	≤ 0,75	≤ 1,5	≤ 1,5
Mn (%)	≤ 1,5	≤ 3,5	≤ 3,5
Ni (%)	≥ 60,0	≥ 60,0	≥ 60,0
Cr (%)	0,5...3,5	-	-
Mo (%)	17,0...20,0	10,0...25,0	10,0...25,0
W (%)	2,0...4,0	-	-
Fe (%)	≤ 10,0	≤ 20,0	≤ 20,0
Для механического состава			
Предел текучести (МПа)	-	≥ 365	≥ 365
Предел прочности (МПа)	-	≥ 660	≥ 660
Относительное удлинение (%)	-	≥ 25	≥ 25
Ударная вязкость KCV при -196 °C	-	Среднее значение ≥ 34 Каждый образец ≥ 27	Среднее значение ≥ 34 Каждый образец ≥ 27

ются только проволоки, в противоположность этому, стандарт JIS предписывает комбинацию проволоки и флюса. Это представлено в табл. 4 [3].

Сварочные процедуры. Ключевым фактором для экономичной и качественной конструкции резервуара является сокращение производственных работ на месте монтажа. Это может быть достигнуто за счет разработки модульной конструкции, при которой каждый отдельный модуль изготавливается в заводских условиях и транспортируется к месту сборки для последующего монтажа. Даже куполообразная крыша резервуара для сжиженного природного газа производится на заводе укруп-

ненными элементами и соединяется с корпусом на месте монтажа путем подъема сжатым воздухом.

Сварные соединения, выполняемые на месте монтажа, показаны на рис. 1. В табл. 5 приведены процедуры сварки отдельных типов соединений.

На рис. 2 приведены примеры скоса сварочных кромок для различных методов сварки и пространственных позиций.

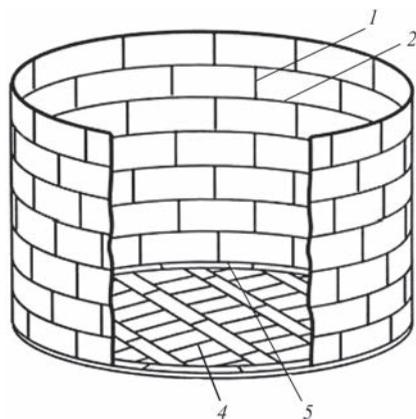


Рис. 1. Типичные сварные соединения корпуса и дна резервуара из стали с 9 % Ni, выполняемые на месте, в условиях монтажа (описание 4 см. в табл. 5)

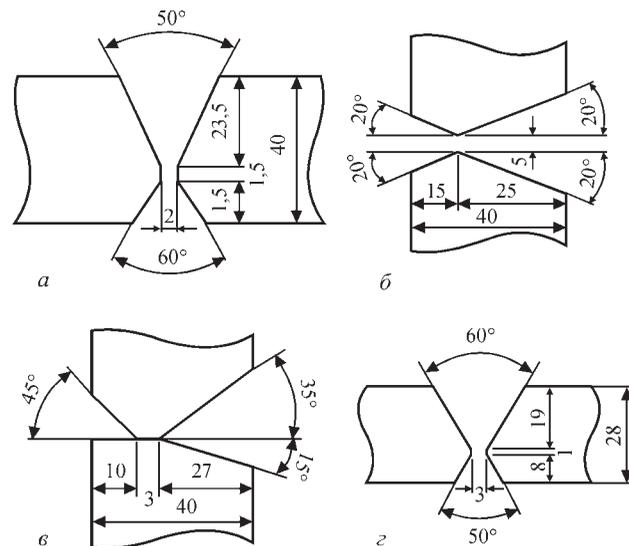


Рис. 2. Типичная разделка кромок для различных методов сварки и пространственных позиций: а – SMAW; б – GTAW; в – SAW; з – FCAW

Таблица 5. Сварочные процедуры для отдельных типов соединений (см. рис. 1)

Номер соединения	1	2	3	4
Элемент	Корпус	Корпус	Дно к корпусу	Дно
Тип соединения	Х-образное асимметричное	Х-образное асимметричное	Х-образное асимметричное	Внахлестку
Позиция	Вертикальная	Горизонтальная	Горизонтальная	Горизонтальная
Сварочный процесс	Покрытыми электродами с порошковой проволокой Авто-ВИГ	Подфлюсовый Авто-ВИГ	Покрытыми электродами Авто-ВИГ	Покрытыми электродами с порошковой проволокой Авто-ВИГ

Рекомендации для получения лучших результатов.

Избежание намагничивания стали. При транспортировке, хранении и дальнейшей обработке необходимо избегать намагничивания материала, которое может иметь место при круговом сгибе между валками; при транспортировке магнитными кранами; при резке с ведением по магнитным роликам; под воздействием токопроводящих сварочных кабелей или других подобных воздействий. Перед сваркой магнитное поле между свариваемыми кромками должно контролироваться с помощью магнитометра. Значения напряженности магнитного поля до $60 \cdot 10^{-4}$ Тл не оказывают существенного влияния на сварку.

Для решения проблемы магнитного дутья может быть приложена одна из следующих мер:

- сварка переменным током;
- использование современных сварочных источников тока, например, «square-wave» источник и т. д.;
- нанесение буферного слоя на свариваемые кромки выбранным для сварки электродом;
- после возникновения намагничивания его можно уменьшить или снять путем воздействия проводниками (кабелями), по которым протекает переменный ток, или с помощью электромагнитов. Для более толстых листов может потребоваться применение специального размагничивающего оборудования, которое использует постепенное уменьшение и изменение направления тока. В крайних случаях остаточный магнетизм можно удалить путем термообработки.

Погонная энергия (тепловложение). Как и для других низкотемпературных сталей, необходимо контролировать погонную энергию для сохранения ударной вязкости в металле ЗТВ. Как правило, сталь сваривается при небольшом тепловложении — даже сварку под флюсом лучше всего проводить проволокой диаметром 1,6 мм.

Рекомендуется проводить сварку с погонной энергией от 1,2 до 2,0 кДж/мм. Независимо от толщины не рекомендуется проводить сварку с тепловложением более 2,0 кДж/мм. Если для сварки под флюсом или МИГ сварки используются более высокие погонные энергии, то необходимо предварительно проверить, чтобы убедиться, что прочность сварного шва не ниже 655 МПа. Следует также соблюдать осторожность при толщине менее 13 мм, так как при сварке тонких листов соединения охлаждаются медленнее и, кроме того, значения вязкости более тонких листов изначально ниже.

Подогрев. Стали с 9 % Ni имеют относительно хорошую сопротивляемость образованию холодных трещин. Независимо от этого, рекомендуется листы толщиной более 25 мм подогревать

до 35 °С, а более тонкие листы не сваривать ниже точки росы. Температура между слоями не должна превышать 150 °С.

Термообработка после сварки. Если производителем специально не рекомендуется, термическая обработка после сварки толщины до 51 мм не выполняется. Во избежание возможного понижения ударной вязкости стали при проведении термообработки, после сварки необходимо контролировать температуру в диапазоне 551...583 °С, но не выше температуры отпуска с последующим охлаждением со скоростью не менее 167 °С/ч.

Образование горячих трещин. Как правило, это касается горячих трещин в кратере. Рекомендуется сошлифовывать кратер каждый раз при остановке дуги.

Участие основного металла. Механические свойства металла шва зависят от количества основного металла, участвующего в металле шва. Чаще всего это влияет на снижение механических свойств. Рекомендуется заранее проверить влияние параметров сварки, разработав процедуру, которая обеспечит необходимый предел прочности и предел текучести металла шва.

Изотермические резервуары для хранения сжиженного аммиака. Было установлено, что одной из основных причин аварий резервуаров для безводного аммиака в условиях нормальной эксплуатации является образование коррозионных трещин под напряжением [3]. Эти трещины распространяются преимущественно внутри кристаллических зерен и обычно наблюдаются в сталях повышенной прочности и твердости.

Наблюдения показывают, что трещины чаще всего связаны со сварными соединениями, где в ЗТВ твердость выше твердости основного металла и металла шва и существуют растягивающие остаточные напряжения. Проведение термической обработки после сварки для снятия остаточных напряжений уменьшает склонность к образованию трещин [4], но ее выполнение очень часто невозможно из-за больших размеров резервуаров. Кроме того, термическая обработка после введения сооружения в эксплуатацию может быть неэффективна, поскольку поля напряжений у вершины зародившихся трещин имеют достаточную интенсивность, которая поддерживает распространение трещин.

Необходимые меры при проектировании резервуаров для аммиака. Факторы, способствующие образованию стресс-коррозионных трещин, можно разделить на три группы:

Материал резервуара. С точки зрения материала, следует учитывать следующие факторы: тип материала, механические свойства и химический состав, микроструктуру, деформации и состояние

поверхности. Для изготовления [5] резервуаров для безводного аммиака рекомендуются листы из низкоуглеродистой низколегированной стали с номинальным пределом текучести не выше 355 МПа. Фактический предел текучести не должен превышать 440 МПа, а относительное удлинение δ_5 должно быть выше 22 %.

Рекомендуется, чтобы химический состав находился в следующем диапазоне, мас. %: 0,18 С; 0,10...0,50 Si; 1,65 Mn; 0,030 P; 0,025 S; min 0,020 Al; 0,20 Cr; 0,35 Cu; 0,08 Mo; 0,40 Ni; 0,10 V. После нормализации сталь должна иметь мелкозернистую структуру. Следует учесть, что для сталей с номинальным пределом текучести 355 МПа химический состав подбирается с целью ограничения максимального предела текучести до 440 МПа. Если необходимо легирование никелем, максимальное значение может быть 0,85 %.

Все материалы сооружения под давлением должны соответствовать требованиям к ударной вязкости согласно табл. 6.

Активная среда. С точки зрения активной среды следует принимать во внимание: тип среды, примеси, температуру и электрохимические условия.

Безводный аммиак хранится при температуре в диапазоне от температуры окружающей среды до -33 °С. Образование трещин в процессе коррозии под напряжением в значительной степени зависит от присутствия кислорода и воды в аммиаке. Во всех случаях образование трещин связано с наличием кислорода. Склонность к образованию трещин нарастает с увеличением содержания кислорода и уменьшается с содержанием воды (рис. 3). Обычной практикой является использование воды в качестве ингибитора коррозии.

При нормальных рабочих условиях охлажденного аммиачного резервуара содержание кислорода должно быть ниже 0,5 ppm, а содержание воды в интервале от 100 до 1000 ppm.

Напряжения. С точки зрения напряжений следует учитывать: остаточные напряжения, возникшие в результате производственного процесса при сооружении конструкции, в том числе и сварочные напряжения, рабочие напряжения и виды напряжений — статические, циклические при эксплуатации. Особую роль в возникновении стресс-коррозионных трещин играют поверхностные растягивающие остаточные напряжения. По этой причине необходимо обратить серьезное внимание на средства по их снижению.

Особенности технологии сварки, обеспечивающие максимальную долговечность сварной конструкции. Для достижения максимальной долговечности аммиачных резервуаров во избежание коррозии под напряжением необходимо при разра-

Таблица 6. Требования по ISO к ударной вязкости образцов с V-образным надрезом

Сорт материала	Температура испытания, °С	Работа разрушения ¹⁾ , Дж (min)	
		вдоль проката	поперек проката
Листы	-20	-	27
Трубы		41	-
Поковки		41	27

1) Среднее значение. Одно из значений может быть ниже средней, но не ниже 70 % ее величины.

ботке и внедрении технологии сварки соблюдать ряд условий, касающихся выбора сварочных материалов и режима сварки.

Для ручной электродуговой сварки необходимо использовать покрытые низководородные основные электроды (содержание диффузионного водорода менее 8 мл/100 г). Разрешается только сварочный материал, не содержащий молибдена и ванадия. Прочность наплавленного материала должна минимально превышать прочность основного металла. Твердость сварного шва, включая зону термического влияния, не должна превышать HV 230. Это должно быть подтверждено при тестировании и одобрении процедуры.

Для того, чтобы поддерживать сварочное напряжение и твердость сварных соединений низкими, температура подогрева должна быть минимальной. Подогрев и температура между слоями не должна быть ниже 100 °С, и все сварочные работы должны выполняться по многослойной технике сварки.

Дефекты сварки, такие как чрезмерное усиление шва и точки зажигания (дуги) на основном металле должны быть устранены посредством зашлифовки. Все стыковые швы и швы с полным проваром стенки резервуара должны выполняться по многослойной технике.

В конкретном случае подходящим методом снятия остаточных напряжений является возможность их ультразвуковой проковки.



Рис. 3. Соотношение между содержанием воды и кислорода в аммиаке и риск образования трещин в процессе коррозии под напряжением [6] (1 – 18 °С; 2 – –33)

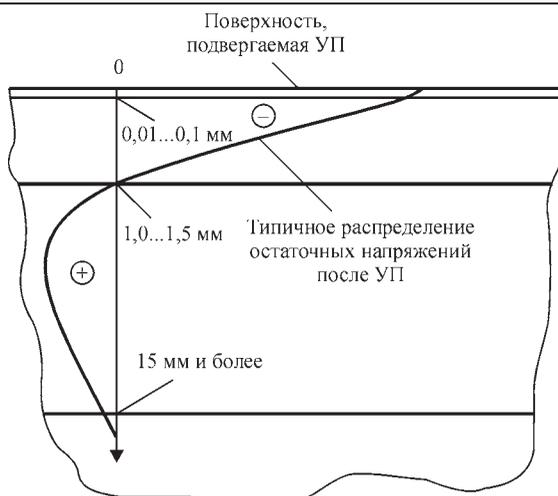


Рис. 4. Схема поперечного сечения материала/изделия, улучшенного в результате ультразвуковой проковки [7]

При необходимости поверхности швов должны зашлифовываться.

Ультразвуковая проковка. Ультразвуковая проковка (УП) является эффективным способом снятия вредных растягивающих остаточных напряжений и возникновения благоприятных сжимающих остаточных напряжений в поверхностных слоях деталей или сваренных элементов. Метод УП основан на комбинированном эффекте воздействия высокочастотных ударов специальными ударниками и ультразвуковых колебаний в обрабатываемом материале. В ходе ультразвуковой обработки ударник колеблется в небольшом зазоре между торцом ультразвукового преобразователя и обрабатываемым образцом, нанося удары по обрабатываемой поверхности.

Эффекты влияния ультразвука на металл следующие: акустическое размягчение (понижение твердости), акустическое упрочнение, акустический нагрев и т. д. В первом случае (акустического размягчения, называемого акустическо-пластическим эффектом), акустическое излучение уменьшает напряжение, что необходимо для пластической деформации.

В целом, влияние ультразвука на механическое поведение можно сравнить с эффектом нагрева материала. Разница заключается в том, что акустическое размягчение происходит непосредственно после воздействия ультразвукового облучения на металл. Кроме того, ультразвуковые волны с относительно небольшой амплитудой не оказывают остаточных эффектов на физические свойства металлов после претерпевания акустического излучения.

При УП ультразвуковой преобразователь (пьезоэлектрический или магнитострикционный) осциллирует с высокой частотой, типичная частота составляет 20...30 кГц. Независимо от технологии изготовления преобразователя его торец будет колебаться с амплитудой 20...40 мм.



Рис. 5. Система для ультразвуковой проковки, повышающей долговечность сварных элементов и конструкций [8]

Посредством УП может быть достигнуто повышение сопротивляемости к образованию коррозионных трещин напряжением путем создания сжимающих остаточных напряжений в поверхностных слоях металлов и сплавов, снижение концентрации напряжений в зоне термического влияния и улучшение механических свойств поверхностного слоя материала. На рис. 4 показана схема поперечного сечения материала/изделия, подвергнутого УП.

На рис. 5 показана конфигурация устройства для ультразвуковой проковки, которое может быть использовано для обработки зоны термического влияния как сварных швов, так и больших участков поверхностей, если это необходимо [7]. Скорость обработки порядка 0,4 м/мин.

Контроль остаточных напряжений. После обработки конструкции по снятию или снижению остаточных напряжений необходимо установить насколько эта обработка эффективна и результативна. Существует две группы методов для измерения остаточных напряжений: разрушающие и неразрушающие. Первая группа методов (путем разрушения) неприменима для контроля аммиачных резервуаров.

К неразрушающей группе методов контроля относятся магнитные, ультразвуковые и рентгеновская дифракция. Ультразвуковые методы являются достаточно перспективными. Они основаны на акустическо-упругих эффектах, вследствие которых скорость распространения упругих волн в твердых телах зависит от механического напряжения [7].

В заключение следует отметить, что высокая эксплуатационная надежность резервуаров для хранения сжиженного природного газа может быть обеспечена при комплексном соблюдении требований на стадии проектирования, изготовления, монтажа и эксплуатации.

Список литературы/References

1. Welding liquide natural gas tanks and vessels in 5% and 9% nickel steels, ESAB.
2. Welding LNG tanks ans vessels in 5% and 9% nickel steels, ESAB.

3. (2011) Kobe, co *Welding Today*, 14, 2, 1–10.
4. Det Norske Veritas – Report No: 98-3111, rev.01 – 15.19 Ammonia stress corrosion cracking.
5. (1992) Guidelines for the Construction of Pressure Vessel Type Tanks Intended for the Transportation of Anhydrous Ammonia at Ambient Temperatures, 33.
6. Alghamdi T., Liu S. (2014) Low Transformation Temperature (LTT) Welding Consumables for Residual Stress Management: Consumables Development and Testing Qualification. *Welding Journal*, 7, 93.
7. Kudryavtsev Y. (2013) Ultrasonic Measurement of Residual Stresses in Welded Specimens and Structures, *Proceedings of the ASME 2013 Pressure Vessels and Piping Conference PVP2013 July 14–18, 2013, Paris, France*.
8. Kudryavtsev Y., Kleiman J. (2013) Fatigue Improvement of Welded Elements and Structures by Ultrasonic Peening. *Proceedings of the ASME 2013 Pressure Vessels and Piping Conference PVP2013 July 14–18, 2013, Paris, France*.

ДЕЯКІ ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ВИКОНАННЯ МОНТАЖНО-ЗВАРЮВАЛЬНИХ РОБІТ ПРИ СПОРУДЖЕННІ ІЗОТЕРМІЧНИХ РЕЗЕРВУАРІВ

М. БЄЛОЄВ¹, Н. ЛОЛОВ²

¹KZU Holding Group. 1700, Софія, Болгарія, вул. проф. Христо Вакарелські, 12

²Технічний університет. 1000, Софія, Болгарія, бульвар Климента Охридського, 8.

E-mail: marin.belojev@kzu-group.com

Розглянуто основні технологічні особливості, які необхідно враховувати при проектуванні, виготовленні і монтажі резервуарів для зберігання зрідженого природного газу зі сталі з 9 % Ni. Вони включають підготовку до зварювання, вибір зварювальних процесів і матеріалів, модульну збірку резервуару на монтажі, застосування ультразвукової проковки зварних з'єднань для зняття напружень. Бібліогр. 8, табл. 6, рис. 5.

Ключові слова: дугове зварювання, ізотермічні резервуари, сталь з 9 % Ni, проектування, виготовлення, монтаж, модульне складання, ультразвукове проковування

SOME TECHNOLOGICAL PECULIARITIES OF PERFORMANCE OF ASSEMBLY-WELDING WORKS IN CONSTRUCTION OF ISOTHERMAL TANKS

M. BELOYEV¹, N. LOLOV²

¹KZU Holding Group

^{1,2}Khristo Vakaranski, 1700, Sofia, Bulgaria

²Technical University 8 Kliment Ohridski St., 1000, Sofia, Bulgaria

E-mail: marin.belojev@kzu-group.com

The paper deals with the main technological features which should be taken into account during design, manufacturing and mounting of tanks from 9 % Ni steel for liquefied natural gas storage. They include preparation for welding, selection of welding processes and materials, modular assembly of the tank in site, application of ultrasonic peening of welded joints for stress relieving. 8 Ref., 6 Tabl., 5 Fig.

Keywords: arc welding, isothermal tanks, steel with 9 % Ni, design, fabrication, mounting, modular assembly, ultrasonic peening

Поступила в редакцію 09.07.2018



Образцы из титанового сплава, полученные по технологии xBeam 3D Metal Printer и изделие «Муха» — ручная аргонодуговая сварка