

УДК 621.791.05
И 85

ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ СВОЙСТВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ДУПЛЕКСНОЙ СТАЛИ EN 1.4462

А. М. Костин, канд. техн. наук, доц.¹;

А. И. Осмиченко, магистр¹;

А. Н. Воробьев, инж.²

¹Национальный университет кораблестроения, г. Николаев;

²Одесский припортовый завод, г. Одесса

Аннотация. Изучена структура сварных соединений дуплексной стали EN 1.4462 методами компьютерного металлографического анализа. Выполнен комплекс коррозионных и механических испытаний сварных соединений. Оптимизирована процедура (процесс) ручной аргонодуговой сварки, которая обеспечивает необходимые эксплуатационные характеристики сварных соединений.

Ключевые слова: дуплекс, нержавеющие стали, аустенит, феррит, структура, межкристаллитная коррозия, механические испытания.

Анотація. Досліджено структуру зварних з'єднань дуплексної сталі EN 1.4462 методами комп'ютерного металлографічного аналізу. Виконано комплекс корозійних та механічних випробувань зварних з'єднань. Оптимізовано процедуру (процес) ручного аргонодугового зварювання, яка забезпечує необхідні експлуатаційні характеристики зварних з'єднань.

Ключові слова: дуплекс, нержавіючі сталі, аустеніт, ферит, структура, міжкристалітна корозія, механічні випробування.

Abstract. The structure of welded joints of EN 1.4462 duplex steel was studied. The complex of corrosion and mechanical testing of welded joints was performed. The manual argonarc welding procedure (process) which provides the necessary performance specifications of welded joints was optimized.

Keywords: duplex, stainless steels, austenite, ferrite, structure, grain dropping, mechanical tests.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Технологические трубопроводы установок по производству карбамида, рабочее давление в которых составляет до 4,0 МПа, а температура достигает 220 °С, изготавливают в основном из классических хромоникельмолибденовых сталей типа 17-14-3. Кроме требований по химическому и структурному составу и механическим характеристикам, к сталям выдвигаются требования по стойкости к межкристаллитной коррозии (МКК). Скорость коррозии согласно ДСТУ ISO 3651-1:2005 не должна превышать 0,5 мм/год. При таких условиях ресурс работы трубопроводов составляет в среднем 15 лет.

В настоящее время рассматривается возможность замены хромоникельмолибденовых сталей типа 17-14-3 дуплексной сталью EN 1.4462 с целью повышения ресурса работы технологических трубопроводов в 1,5–2,0 раза. Возникает необходимость

исследования и оптимизации свойств сварных соединений дуплексной стали EN 1.4462, выполненных с использованием ручной аргонодуговой сварки применительно к условиям работы установок по производству карбамида.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Дуплексная сталь EN 1.4462 (X2CrNiMoN 22-5-3) достаточно широко применяется в различных отраслях промышленности. Типичный химический состав ее приведен в табл. 1.

Сталь имеет аустенитно-ферритную структуру с содержанием феррита 35...55% (оптимальное содержание около 50%). Формирование высокодисперсной дуплексной структуры способствует значительному повышению прочности по сравнению со сталями с простой аустенитной структурой, обеспечивая при этом такие важные характеристики, как

Таблица 1. Типичные свойства стали EN 1.4462 и присадочной проволоки для ручной аргонодуговой сварки [5]

Материал	Обозначение по стандарту EN	Типичный химический состав, % (мас.)						FN*	PRE _N **
		C	Cr	Ni	Mo	N	Mn		
Сталь 1.4462	X2CrNiMoN 22-5-3	0,02	22	5,7	3,1	0,2	–	49 ... 77	35
Проволока 1.4462	W 22 9 3 NL	<0,025	23	9	3	0,1	1,6	30 ... 60	35

*FN — содержание ферритной фазы.

**PRE_N — эквивалент стойкости к питтинговой коррозии.

стойкость против питтингообразования и щелевой коррозии, коррозионного растрескивания под напряжениями [1, 2]. Коррозионная стойкость, в том числе стойкость к межкристаллитной коррозии, обеспечивается высоким содержанием хрома, низким содержанием углерода и дополнительным легированием азотом, который измельчает и стабилизирует структуру металла, оказывая таким образом комплексное положительное влияние на эксплуатационные характеристики сталей, в том числе и при повышенных температурах [1, 5]. Рабочая температура стали EN 1.4462 в связи со склонностью данного класса материалов к высокотемпературному охрупчиванию не должна превышать 280 °C [5, 6].

Сталь EN 1.4462 характеризуется хорошей свариваемостью в среде инертных газов при условии строгого соблюдения технологических рекомендаций по процедуре сварки [2, 4]. Сварочный материал, как правило, должен соответствовать химическому составу основного металла, с большим на 2...4% содержанием никеля — для обеспечения сбалансированного соотношения ферритной и аустенитной фаз в наплавленном металле в условиях высокой скорости охлаждения при сварке. Типичные свойства присадочной проволоки приведены в табл. 1. При дуговой сварке в защитных газах для сохранения благоприятного соотношения аустенита и феррита в металле шва и околошовной зоне особое внимание также необходимо уделять удельному тепловложению и составу газовой защиты [5]. Естественно, что существенное влияние в этом случае оказывают такие сопутствующие технологические факторы, как температура предварительного подогрева и межваликовая температура.

Анализ имеющихся в литературе сведений относительно общих рекомендаций по тепловложению при ручной аргонодуговой сварке показывает достаточно широкий диапазон допустимых значений. Так, например, для дуплексных сталей с 22% Cr стандарт EN 1011-3 рекомендует придерживаться тепловложения 0,5...2,5 кДж/мм, Международный институт сварки — 1,2...2,0 кДж/мм, производители материалов BÖHLER и Sandvik — 1,0...3,0 кДж/мм [2–7] и т. д. Таким образом, из-за большого количества параметров режима сварки универсальных рекомендаций не существует, поэтому подбор и оптимизацию параметров необходимо выполнять для каждого конкретного случая.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ — получение свойств сварных соединений дуплексной стали EN 1.4462, выполненных ручной аргонодуговой сваркой, на уровне эксплуатационных требований к технологическому оборудованию установок по производству карбамида.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

В качестве основного металла для исследований применительно к условиям производства карбамида авторами была выбрана дуплексная сталь Sandvik SAF 2205 (EN 10088-3:1.4462/X2CrNiMoN 22-5-3) в виде трубы ($D=219$ мм, $\delta=12,1$ мм). В качестве присадочного материала выбрана проволока BÖHLER CN 22/9N — IG (EN 12072:-1.4462/W 22 9 3 NL) — табл. 2.

Режимы сварки выбирали исходя из анализа имеющейся информации у производителей сварочных материалов, личного опыта, а также из результатов комплекса предварительных сварочно-технологических испытаний. На основании проделанной работы, с учетом особенностей технологии сварки неповоротного стыка трубы (положение PF по ISO 6947) были выбраны следующие оптимальные режимы сварки: корень шва: $I_{cb}=90$ А (DC(-)); $U_d=15$ В; $V_{cb}=60$ мм/с; $q_n=0,8$ кДж/мм; заполнение и облицовочные швы: $I_{cb}=110$ А (DC(-)); $U_d=16$ В, $V_{cb}=60$ мм/с, $q_n=1,1$ кДж/мм; температура предварительного подогрева — до 100 °C, межваликовая температура — до 100 °C, расход защитного газа — 8...12 л/мин; расход газа на поддув — 10...16 л/мин. Дополнительная информация: использовали вольфрамовый электрод WL15/WS2, источник питания — фирмы EWM (TIG 300 AC/DC).

В качестве защитной среды для ручной аргонодуговой сварки производители обычно рекомендуют аргон, смеси аргона с азотом и гелием. Гелий в данном случае обеспечивает повышенную концентрацию тепловложения, что благоприятно сказывается на структурном состоянии дуплексных сталей, повышая их вязкость и расширяя диапазон допустимых параметров сварки [5]. Дополнительное введение азота в состав защитного газа в количестве 2...3% прежде всего предотвращает его выгорание из основного и присадочного материала в процессе сварки, а при более высоких концентрациях осуществляет дополнительное легирование металла шва азотом [1]. Однако следует помнить, что в этом

Таблица 2. Свойства стали Sandvik SAF 2205 и проволоки BÖHLER CN 22/9 N – IG [6, 7]

Материал	Типичный химический состав, % (мас.)							Предел прочности R_m , МПа	Предел текучести $R_{p0,2}$, МПа	Относительное удлинение A_5	Работа удара KV+20, Дж	PRE _N
	C	Cr	Ni	Mo	N	Si	Mn					
Сталь Sandvik	0,03	22	5	3,2	0,12	1	2	>720	>560	>31	>150	35
Проволока	<0,15	22,6	8,8	3,2	0,15	0,4	1,7	>800	>600	>33	>150	35

*Проволока диаметром $d=2,4$ мм.

случае существенно повышается износ вольфрамового электрода [3, 5]. В целом основным требованием к защитным газам является присутствие кислорода в минимально возможной концентрации (не более 30 ppm), что подразумевает использование предельно чистых по кислороду газов [5]. Большинство производителей рекомендуют два состава защитной среды: Ar и смесь Ar+2–3% N₂ [2–5, 7]. В связи с этим было принято решение выполнять сварку двух опытных стыков с использованием аргона и смеси аргон+2% N₂. После сварки металл шва и околошовная зона тщательно полировались для удаления остатков оксидов.

Из опытных стыков вырезались комплекты образцов для металлографических, механических и коррозионных испытаний. Травление структуры сварных

соединений осуществлялось в электролите: ортофосфорная кислота H₃PO₄ (150 г)+хромовый ангидрид Cr₂O₃ (35 г) — на протяжении 2 мин.

Анализ структуры сварных соединений проводился с использованием промышленного комплекса приложений для компьютерного анализа изображений SIAMS600, который позволил оперативно обрабатывать снимки, полученные на микроскопе NEOFOT–21. Характерные макро- и микроструктуры анализируемых участков сварных соединений показаны на рис. 1 и 2. Анализ макроструктур показал, что в обоих случаях макродефекты типа несплавления, поры, трещины и др. отсутствуют. Сопряжение металла шва с основным металлом в корневой и лицевой зонах плавное. Протяженность зоны



Рис. 1. Макроструктура образцов 1 и 2 (защитный газ аргон и аргон +2% N₂ соответственно): а — образец №1; б — образец №2; ×4

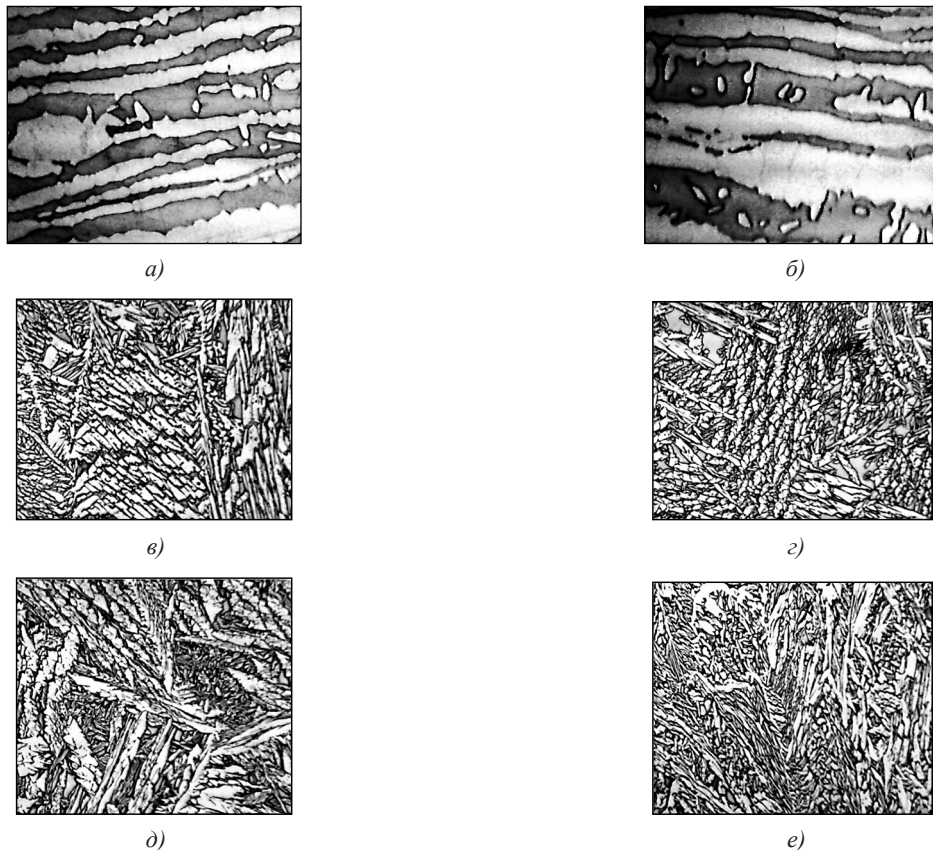


Рис. 2. Микроструктуры анализируемых участков сварных соединений (образец №1 — защитный газ аргон, образец №2 — аргон +2% N₂): а — основной металл, образец №1; б — основной металл, образец №2; в — середина шва, образец №1; г — середина шва, образец №2; д — корень шва, образец №1; е — корень шва, образец №2; ×200

термического влияния не превышает 1,5 мм. Наблюдается равномерность величины зерна по всей площади наплавленного металла. Количество проходов и геометрические характеристика сварного соединения соответствуют сварочной процедуре (WPS).

Анализ микроструктур показал, что в обоих случаях обеспечивается формирование дисперсной аустенитно-ферритной структуры. Количество фазовых составляющих в отдельных зонах сварных соединений приведено в табл. 3.

В целом отношение ферритной и аустенитной фаз отвечает требованиям к данному классу материалов и приближается к оптимальному. Однако следует отметить, что в случае применения смеси аргон + 2% N₂ наблюдается незначительное, в пределах статистической ошибки, повышение количества аустенитной фазы. Кроме того, наблюдается тенденция к снижению величины зерна и повышению структурной стабильности (табл. 4), что, вероятно, можно объяснить положительным влиянием азота. В целом структурное состояние в обоих случаях можно оценить как идентичное.

Замеры твердости в поперечном сечении сварных соединений вдоль оси шва также дали сопоставимые результаты (рис. 3).

Механические испытания образцов показали удовлетворительные характеристики значений предела прочности и ударной вязкости при комнатной температуре для обоих вариантов сварки. Свойства сварных соединений не уступают свойствам основного металла, заявленным в сертификате ($R_m = 757...787$ МПа, $KCU_{+20} = 160...177$ Дж/см²). Пластичность сварных соединений испытывали загибом лицевой и корневой поверхностей шва на угол 110 град. Диаметр гибочной оправки при толщине образца 12,1 мм составлял 10,0 мм. В каждом случае испытывались по два образца. Все образцы испытания выдержали.

Следующим этапом работы являлись испытания на стойкость сварных соединений к межкри-

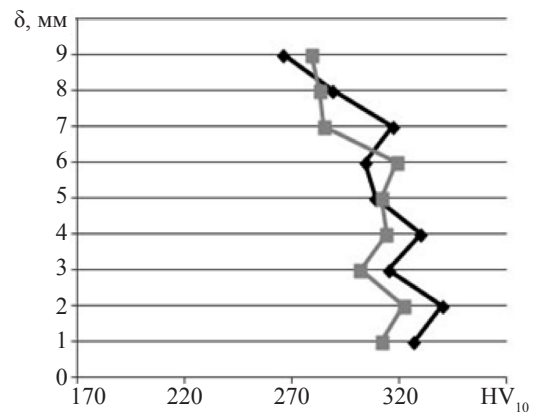


Рис. 3. Распределение твердости в поперечном сечении сварных соединений: —●— защитная среда аргон; —■— защитная среда аргон + 2% N₂

сталлитной коррозии в соответствии с требованиями стандарта ДСТУ ISO 3651-1:2005 (испытания по методу Хью). Коррозионные испытания проводили в кипящем (65 ± 0,2) % (мас.) водном растворе азотной кислоты ($\rho_{20} = 1,40$ г/см³) с удельным объемом коррозионного раствора не менее 20 см³/см² площади поверхности испытываемых образцов. Все комплекты образцов кипятили в течение пяти циклов длительностью 48 ч каждый. После каждого цикла испытаний определяли потерю массы образца. Результаты испытаний показали, что все образцы имеют блестящую поверхность, без видимых очагов межкристаллитного разрушения. Для сварных соединений, выполненных в среде аргона, средняя скорость коррозии $v_{кр} = 0,043$ мм/год, в среде аргон + 2% N₂ — $v_{кр} = 0,039$ мм/год. Можно сделать вывод, что оба варианта сварки обеспечивают стойкость сварных соединений к межкристаллитной коррозии в соответствии с ГОСТ 6032:2005.

Для сравнения в тех же условиях испытывались сварные соединения стали 03X17H14M3, выполненные с использованием электродов АНВ-17У.

Таблица 3. Количество фазовых составляющих в отдельных зонах сварных соединений, %, при сварке в защитной среде

Зона сварного соединения	Аргон		Аргон + 2% N ₂	
	Феррит	Аустенит	Феррит	Аустенит
Основной металл	48,9	51,1	52,3	47,7
Середина шва	51,2	48,8	50,9	49,1
Корень шва	50,8	49,2	50,6	49,4

Таблица 4. Площадь в отдельных зонах сварных соединений, мкм², при сварке в защитной среде

Зона сварного соединения	Аргон	Аргон + 2% N ₂
Основной металл	562/2/21/24	662/2/20/19
Середина шва	99/2/20/15	109/2/20/8
Корень шва	120/2/24/15	95/2/19/12

Примечание. Указаны значения max/min/среднее/погрешность.

Средняя скорость коррозии составила $v_{\text{ср}} = 0,098$ мм/год. Полученные результаты подтверждают перспективность использования стали EN 1.4462 в технологическом оборудовании установок по производству карбамида.

ВЫВОДЫ

1. Комплексный анализ полученных результатов подтвердил перспективность использования ста-

ли EN 1.4462 в технологическом оборудовании установок по производству карбамида.

2. Сварные соединения стали EN 1.4462, выполненные ручной аргонодуговой сваркой, обеспечивают необходимый уровень структурной стабильности, прочности, пластичности и стойкость к межкристаллитной коррозии.

3. При выборе защитного газа следует отдавать предпочтение смеси аргон+2% N₂ над чистым аргоном.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Зубченко, А. С.** Влияние структуры металла шва на склонность к питтинговой коррозии сварных соединений ферритно-аустенитной стали [Текст] / А. С. Зубченко, И. Л. Харина, А. Е. Корнеев // *Металловедение и термическая обработка металлов*. — ОАО НПО ЦНИИТМАШ, 2006. — № 7 (613). — С. 32–35.
- [2] Сварка дуплексных нержавеющей сталей [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.avestawelding.com/4976.epibrw>.
- [3] Сварка дуплексных нержавеющей сталей [Электронный ресурс / BÖHLER Welding]. — Режим доступа: <http://www.bohlermn.ru>.
- [4] TIG сварка дуплексных сталей : учебный материал [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.welding.kz/files/lesson_5.pdf.
- [5] SVETSAREN : Корпоративный журнал ЭСАБ по сварке и резке [Текст] / осн. М-во образования и науки РФ. — К. : Знания, 2008.
- [6] BÖHLER CN 22/9 N-IG [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.bw-group-china.com/attach/products/Bohler%20CN%2022%209%20N-IG%20_GMAW.pdf.
- [7] Sandvik SAF 2205 [Электронный ресурс] : Sandvik Materials Technology. — Режим доступа: <http://www.smt.sandvik.com/en/materials-center/material-datasheets/tube-and-pipe-seamless/sandvik-saf-2205>.

© А. М. Костін, А. І. Осміченко, А. Н. Воробйов

Надійшла до редколегії 21.11.2012

Статтю рекомендує до друку член редколегії Вісника НУК
д-р техн. наук, проф. *В. Ф. Квасницький*

Статтю розміщено у Віснику НУК № 5, 2012