

Механические свойства и коррозионная стойкость сварного соединения труб из супердуплексной стали SAF 2507, выполненного способом РАД с принудительным межслойным охлаждением

Филистеев В.Г.¹, Садыков А.А.¹, Березовский А.В.²

¹ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Москва, Россия, ²ФГАОУ ВО «УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, Россия
v_filisteev@vniigaz.gazprom.ru

Аннотация

Дуплексные стали склонны к изменению свойств в зоне термического влияния при воздействии сварочного термического цикла. В данном исследовании приведены механические, коррозионные свойства и фазовый состав основного металла, зоны термического влияния и металла шва сварного соединения труб $\varnothing 89 \times 15,0$ из супердуплексной нержавеющей стали SAF 2507 после сварочного термического воздействия с принудительным межслойным охлаждением.

Материалы и методы

Исследуемым материалом в данной работе является супердуплексная сталь SAF 2507. Трубы $\varnothing 89$ мм с толщиной стенки 15,0 мм из указанной марки стали сваривали ручной аргонодуговой сваркой неплавящимся вольфрамовым электродом марки ЭВЧ по ГОСТ 23949-80 с применением сварочной проволоки (прутка) диаметром 2,4 мм марки ОК Tigrod 2509 с повышенным содержанием никеля по сравнению с основным металлом, в среде защитного газа аргон высшего сорта по ГОСТ 10157-79.

Механические испытания сварных соединений выполняли в соответствии с ГОСТ 6996 «Методы определения механических свойств», испытания на питтинговую коррозию проводили по ГОСТ 9.912-89 и ASTM G 48-00. Свойства образцов оценивали в соответствии с СТО Газпром 2-3.7-050-2006.

Ключевые слова

дуплексные нержавеющие стали, сварочный термический цикл, механические свойства, δ -феррит, питтинговая коррозия

Для цитирования

Филистеев В.Г., Садыков А.А., Березовский А.В. Механические свойства и коррозионная стойкость сварного соединения труб из супердуплексной стали SAF 2507, выполненного способом РАД с принудительным межслойным охлаждением // Экспозиция Нефть Газ. 2023. № 7. С. 134–140. DOI: 10.24412/2076-6785-2023-7-134-140

Поступила в редакцию: 24.11.2023

PIPELINE

UDC 621.791.01 | Original Paper

Mechanical properties and corrosion resistance of the super duplex steel SAF 2507, pipe weld joint made by the manual tig welding with using forced interlayer cooling

Filisteev V.G.¹, Sadykov A.A.¹, Berezovsky A.V.²

Gazprom "VNIIGAZ" LLC, Moscow, Russia, ²Ural federal university named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia
v_filisteev@vniigaz.gazprom.ru

Abstract

Duplex steels tend to change properties in the zone of thermal influence when exposed to the welding thermal cycle. This study presents the investigation results of the mechanical properties, corrosion-resistance, phase composition and hardness of the base metal, the heat affected zone and the weld metal of super duplex stainless steel SAF 2507 pipes joints $\varnothing 89 \times 15,0$ mated by Manual TIG Welding with the using of forced interlayer cooling.

Materials and methods

The base metals used in this investigation is super duplex steel SAF 2507 Pipes. The pipes of the specified steel grade $\varnothing 89 \text{ mm} \times 15,0 \text{ mm}$ were welded by manual TIG welding using of 2,4 mm OK Tigrod 2509, similar to the base metal chemical composition, with the applying argon protective gas 99,993 %. Mechanical tests of welded joints were performed in accordance with GOST 6996 "Methods for determining

mechanical properties", pitting corrosion tests in accordance with ASTM G 48 A. The properties of the samples were evaluated in accordance with STO Gazprom 2-3.7-050-2006.

Key words

duplex stainless steels, welding thermal cycle, mechanical properties, δ -ferrite, pitting corrosion

For citation

Filisteev V.G., Sadykov A.A., Berezovsky A.V. Mechanical properties and corrosion resistance of the super duplex steel SAF 2507, pipe weld joint made by the manual tig welding with using forced interlayer cooling. Exposition Oil Gas, 2023, issue 7, P. 134–140. (In Russ). DOI: 10.24412/2076-6785-2023-7-134-140

Received: 24.11.2023

Основу микроструктуры duplexных нержавеющих сталей составляют две фазы: аустенит и феррит. Содержание феррита в каждой марке duplexных сталей разное, но обычно в пределах от 40 до 60 %, остальное — аустенит. Приблизительно одинаковое количество каждой фазы неслучайно — именно так обеспечивается более высокая коррозионная стойкость, прочность, ударная вязкость и хорошая свариваемость этих сталей.

Воздействие сварочного термического цикла вызывает в duplexных сталях микроструктурные изменения, выделения нитридов хрома, σ -, χ - и α' -фазы или одновременно и то, и другое, что может повлиять на свойства сварного соединения. Учет влияния термических циклов и различных составов основного и присадочного металла имеет решающее значение для производства сварных соединений с оптимальными механическими свойствами и коррозионной стойкостью [1].

С целью исследования свойств сварных соединений duplexной стали SAF 2507 после воздействия сварочного термического цикла выполнили сварку контрольного сварного соединения (КСС) труб диаметром 89,0 мм с толщиной стенки 15,0 мм.

Подготовку кромок труб перед сваркой произвели с использованием металлорежущего оборудования в соответствии с ГОСТ 16037-80 (рис. 1). Сборку сварного соединения выполняли с применением наружного центратора с зазором между кромками 2,4 мм. Для фиксации свариваемых элементов выполнили три равномерно расположенные по окружности прихватки длиной по 15 мм. К сварке корневого слоя шва приступили с противоположной стороны от третьей прихватки. Сварку выполняли без предварительного подогрева с применением источника питания марки ESAB Heliarc 305 AC/DC при температуре окружающего воздуха 21 °С. Сварку корневого слоя шва выполнили секторами, заваривая участки с противоположных сторон между прихватками, как показано на рисунке 2. Параметры и режимы сварки приведены в таблице 1. При выполнении прихваток и сварки всех слоев шва внутреннюю полость труб заполняли аргоном для защиты внутренней части сварного шва от взаимодействия с окружающим воздухом.

Сварку заполняющих слоев шва старались выполнять с минимальными поперечными колебаниями горелки. Начиная

с пятого слоя сварку каждого слоя выполняли за два прохода, а высота каждого слоя не превышала 2 мм. Для выполнения сварки всего сварного соединения потребовалось выполнить 10 слоев за 16 проходов. После каждого прохода производили охлаждение КСС водой. К сварке каждого последующего прохода приступали при межслойной температуре 40^{+5} °С. Температуру измеряли с помощью бесконтактного инфракрасного термометра (рис. 3) с диапазоном измерения от -30 до +550 °С, погрешность измерения ± 3 °С. Общее время выполнения сварки КСС составило 3 часа 15 минут.

С целью определения скорости сварки и последующего расчета погонной энергии сварки с помощью секундомера измеряли время горения дуги и длину шва, выполненного за данный отрезок времени. Для удобства замера длины шва на одной из катушек по периметру нанесли разметку с шагом в 5 мм (рис. 4).

Для проведения механических испытаний и испытаний на коррозионную стойкость сварное соединение разрезали на образцы в продольном направлении (вдоль оси трубы).

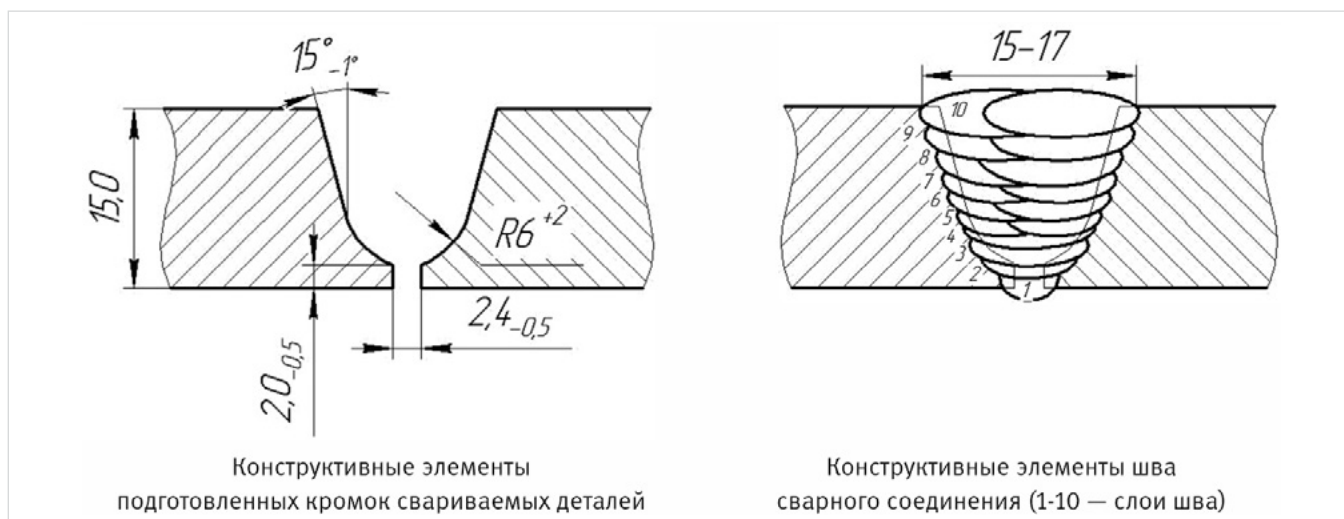


Рис. 1. Эскиз сварного соединения и шва
Fig. 1. Sketch of weld and seam

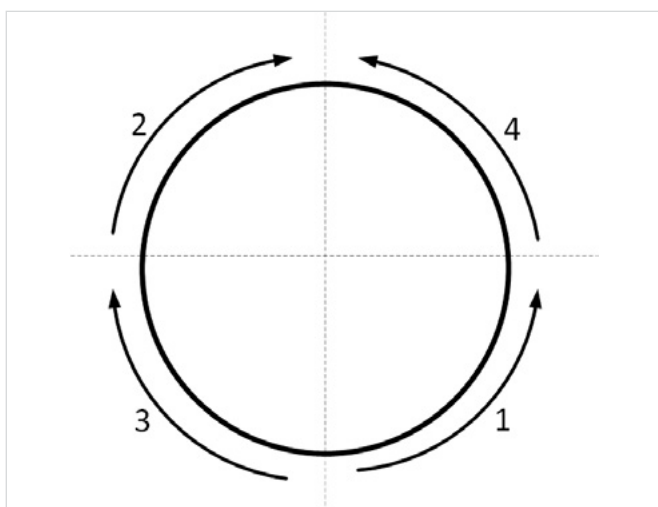


Рис. 2. Расположение и очередность сварки участков корневого слоя шва: 1, 2, 3, 4 — последовательность сварки участков шва
Fig. 2. Location and welding order of sections of the root layer of the joint: 1, 2, 3, 4 — welding sequence of seam sections



Рис. 3. Измерение межслойной температуры
Fig. 3. Interlayer temperature measurement

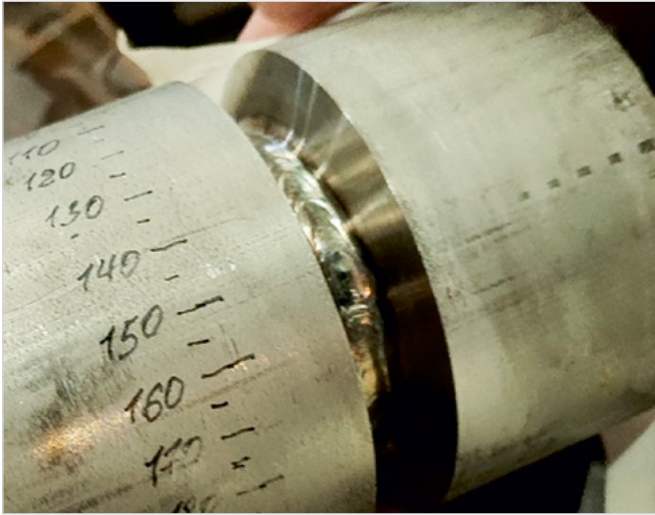


Рис. 4. Разметка с шагом 5 мм по периметру сварного соединения
Fig. 4. Marking in 5 mm increments around the perimeter of the weld

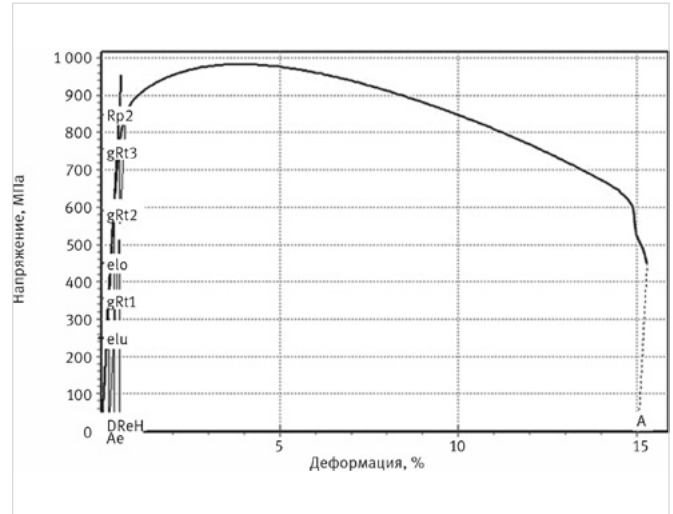


Рис. 5. Диаграмма растяжения образца сварного соединения стали SAF 2507
Fig. 5. Tensile diagram of welded steel joint sample SAF 2507

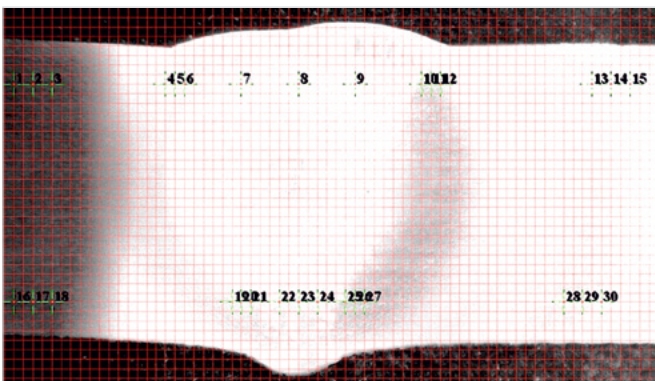


Рис. 6. Схема замера твердости сварного соединения. Цифрами указаны номера точек замера твердости
Fig. 6. Diagram of the measurement of the hardness of the weld. Numbers of the hardness measurement points

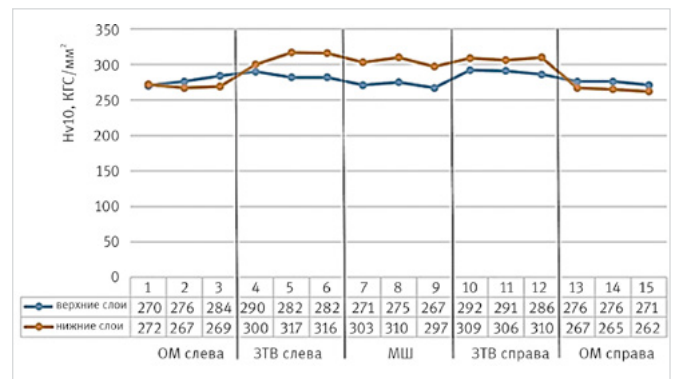


Рис. 7. График изменения твердости в нижних и верхних слоях сварного соединения
Fig. 7. Chart of change of the hardness in the lower and upper layers of the weld

Табл. 1. Параметры режимов сварки
Tab. 1. Parameters of welding modes

Номер слоя	Температура перед сваркой валика, °C	Температура после завершения сварки прохода, °C	Напряжение, В	Сварочный ток, А	Скорость сварки, мм/мин	Погонная энергия сварки, кДж/мм	Примечание
1 (корневой)	21	66	21,0	115	82,0	1,24	
2	35	84	36,0	163	92,73	2,65	
3	28	103	33,0	180	80,0	3,12	
4	27	103	35,0	197	93,0	3,11	
5.1	30	83	32,5	180	112,2	2,19	Слой за два прохода без охлаждения между проходами
5.2	80	146	32,5	180	112,2		
6.1	30	95	32,0	180	113,79	2,13	Слой за два прохода с охлаждением между проходами
6.2	35	87	32,0	180	113,79		
7.1	30	90	32,5	180	112,89	2,18	Слой за два прохода с охлаждением между проходами
7.2	42	87	32,5	180	112,89		
8.1	37	84	32,0	180	114,75	2,10	Слой за два прохода с охлаждением между проходами
8.2	45	105	32,0	180	114,75		
9.1	37	92	32,5	180	122,12	2,01	Слой за два прохода с охлаждением между проходами
9.2	30	102	29,0	157	91,0	2,10	
10.1	37	82	29,0	157	85,36	2,24	Слой за два прохода с охлаждением между проходами
10.2	40	75	30,0	157	116,66	1,70	

Испытания на статическое растяжение сварного соединения проводили на стандартных плоских образцах типа III ГОСТ 6996 с применением сервогидравлической напольной машины LF-TTM 1500 kN со скоростью нагружения образцов не более 15 мм/мин. На рисунке 5 показана диаграмма растяжения образца сварного соединения из дуплексной стали SAF 2507. Полученные при механических испытаниях количественные характеристики механических свойств сварного соединения и допустимые характеристики в соответствии с СТО Газпром 2-3.7-050-2006 приведены в таблице 2. Также в таблице 2 приведены механические характеристики основного металла трубы и нормативные значения наплавленного металла сварочной проволоки ОК Tigrod 2509.

Измерение твердости по Виккерсу (HV10, ГОСТ 2999-75 и ISO 6507) выполнили по ГОСТ 6996, на макрошлифе в нижних и верхних слоях основного металла (ОМ), зоны термического влияния (ЗТВ) и металла шва (МШ) определили по точкам, приведенным на рисунке 6. Измерение твердости металла различных участков сварного соединения произвели с помощью автоматического твердомера Struers Duramin A300.

На рисунке 7 приведен график изменения твердости в нижних и верхних слоях сварного соединения.

Испытания на ударную вязкость проводили на стандартных образцах с острым V-образным надрезом (Шарпи) типа IX по ГОСТ 6996 при температуре образцов -40 °С. Испытания проводили с надрезом по центру сварного шва, по линии сплавления (ЛС) и на участке основного металла на расстоянии 2 мм от ЛС (ЛС+2). Полученные результаты также указаны в таблице 2. График изменения значений ударной вязкости KCV от центра сварного шва к основному металлу приведен на рисунке 8.

Массовую долю содержания легирующих элементов в МШ и ОМ определяли с применением напольной модели спектрометра оптико-эмиссионного Q8 MAGELLAN.

Химический состав и значение PRE (эквивалентное число сопротивления точечной коррозии) супердуплексной стали SAF 2507, сварочной проволоки ОК Tigrod 2509 и металла сварного шва приведен в таблице 3.

Стойкость к точечной коррозии в нержавеющих сталях PRE была рассчитана в соответствии с СТО Газпром 2-3.7-050-2006, в зависимости от количества определенных элементов (Cr, Mo и N) содержащихся в стали, согласно приведенному уравнению (1) [4]:

$$PRE = [\%Cr] + 3,3[\%Mo] + 16 [\%N]. \quad (1)$$

Микроструктурный количественный анализ содержания δ -феррита выполнили в соответствии с ГОСТ 8233 и ASTM E562 путем систематического подсчета точек вручную на образцах при 500-кратном увеличении. Этот метод испытаний основан на стереологическом принципе, согласно которому используется сетка с несколькими регулярно расположенными точками, систематически размещенная поверх изображения микроструктуры. Исследование микроструктуры проводили в трех зонах, показанных на макрошлифе рисунка 9.

Количество δ -феррита определили как среднее арифметическое значение, полученное при рассмотрении пяти полей в каждой зоне сварного соединения. Снимки полей микроструктур МШ, ЗТВ, ОМ с нанесенной сеткой поверх снимка приведены на рисунках 10 а–в соответственно. Полученные значения содержания δ -феррита приведены в таблице 4.

Испытания на питтинговую коррозию проводились в соответствии с методикой ГОСТ 9.912-89 Единая система защиты от коррозии и старения. Стали и сплавы коррозионностойкие. Методы ускоренных испытаний на стойкость к питтинговой коррозии, ASTM G48 Стандартные методы испытаний нержавеющей стали и родственных сплавов на коррозионную стойкость с использованием растворов хлористого железа Метод А.

Метод А предназначен для определения относительной стойкости к питтинговой коррозии нержавеющих сталей и хромосодержащих сплавов на основе никеля. Испытания проводили с погружением пяти образцов в 10%-й раствор железа трихлорида гексагидрата $FeCl_3 \times 6H_2O$ (6%-ный — в пересчете на безводную соль $FeCl_3$) на 72 часа при температуре 35 °С. Суммарная площадь поверхностей образцов составила 75,22 см², а суммарная масса образцов до испытания была равна 65,84566 граммов. После испытаний суммарная масса образцов была равна 65,83948 грамма,

Табл. 2. Механические характеристики сварного соединения, основного металла трубы и нормативные значения наплавленного металла сварочной проволоки ОК Tigrod 2509
Tab. 2. Mechanical characteristics of welded joint, main metal pipe and standard values of welded metal welding wire OK Tigrod 2509

Механические свойства	Предел прочности, σ_b , МПа	Предел текучести, σ_m , МПа	Относительное удлинение, σ , %	Ударная вязкость, KCV ⁴⁰ , Дж/см ²		
				МШ	ЛС	ЛС+2
Сварное соединение	984	849	59,6	239	250	125
SAF 2507	730–930	≥530	≥25		125	
ОК Tigrod 2509	850	670	30		143	
СТО Газпром 2-3.7-050-2006	≥750	≥675	≥15		≥56	



Рис. 8. График изменения ударной вязкости KCV: МШ — металл шва, ЛС — линия сплавления, ЛС+2 — основной металл на расстоянии 2 мм от линии сплавления
Fig. 8. Impact viscosity change graph KCV: МШ — seam metal, ЛС — alloy line, ЛС+2 — base metal at a distance of 2 mm from the alloying line

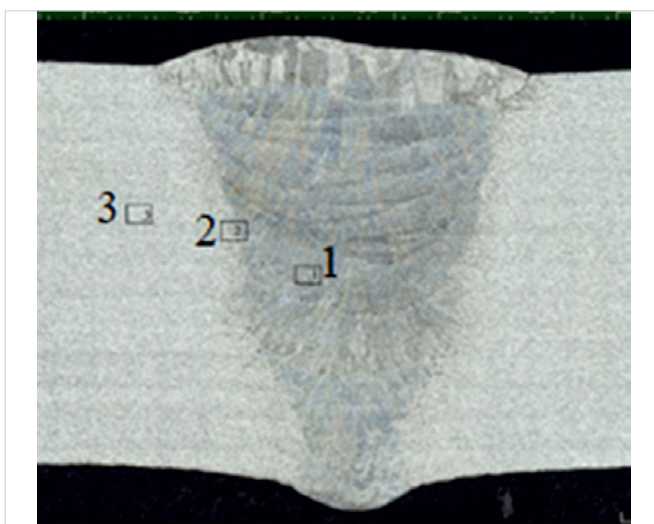


Рис. 9. Макроструктура поперечного сечения образца с выделенными зонами для анализа микроструктуры: 1 — МШ (металл шва), 2 — ЗТВ (зона термического влияния — участок сплавления), 3 — ОМ (основной металл)
Fig. 9. Macrostructure of the cross section of the sample with dedicated zones for microstructure analysis: 1 — seam metal; 2 — thermal influence zone — fusion site; 3 — base metal

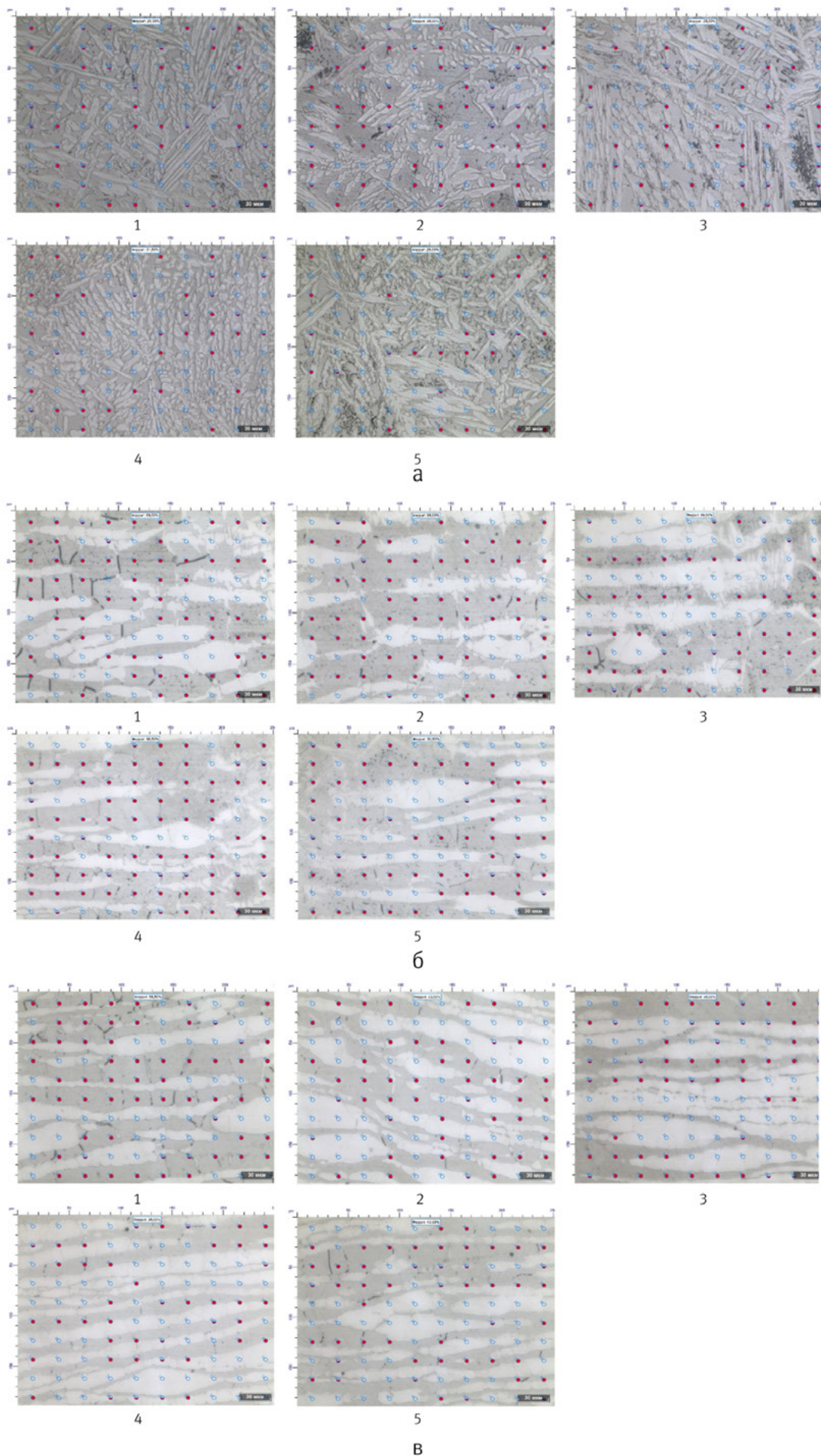


Рис. 10. Снимки полей микроструктур: а – МШ (×500); б – ЗТВ (×500); в – ОМ (×500)
 Fig. 10. Images of microstructure fields: а – seam metal (×500); б – thermal influence zone – fusion site (×500); в – base metal (×500)

Табл. 3. Химический состав супердуплексной стали SAF 2507 и сварочной проволоки ОК Tigrod 2509
Tab. 3. Chemical composition of superduplex steel SAF 2507 and welding wire OK Tigrod 2509

Содержание химических элементов*, %	C	Cr	Mn	Si	N	Ni	Mo	S	P	PRE
SAF 2507	≤0,02	24,25	0,47	0,15	0,245	7,37	4,16	0,005	0,016	41,89
ОК Tigrod 2509	≤0,01	25,2	≤0,4	≤0,4	0,27	9,4	4,00	-	-	42,72
Металл сварного шва	0,012	24,72	0,4	0,4	0,27	9,44	4,00	0,0053	0,014	42,24

* указано нормативное (по данным открытых источников) содержание химических элементов сварочной проволоки, для основного металла и металла сварного шва указано фактическое содержание химических элементов

Табл. 4. Количество δ-феррита в зонах МШ, ЗТВ и ОМ, %
Tab. 4. Quantity of δ-ferrite in zones MW, ZV and OM, %

Зона исследования	Номер поля						Среднее по полям	Допустимые значения по СТО Газпром 2-3.7-050-2006
	1	2	3	4	5			
МШ	29	48	28	31	25	32,2	35 – 65	
ЗТВ	59	58	49,5	68,5	53,5	57,5	35 – 65	
ОМ	58,5	43	46	38	43	45,7	35 – 55	

следовательно, потеря массы образцов составила 0,00618 грамма. Средняя условная скорость питтинговой коррозии (V_m), рассчитанная по ниже приведённой формуле (2) [5, 6], соответствует 0,0114 г/м²·час, а максимальная глубина питтинга равна 0,118 мм:

$$V_m = \frac{\Delta m}{S \times t} \times 10^4 (2)$$

где Δm – суммарная потеря массы образцов, г; S – суммарная площадь поверхности образцов, см²; t – продолжительность испытания, час.

Итоги

Механические и коррозионностойкие свойства сварного соединения, выполненного с применением технологии ручной аргоно-дуговой сварки труб \varnothing 89×15,0 мм из супердуплексной стали SAF 2507 с принудительным межслойным охлаждением соответствуют СТО Газпром 2-3.7-050-2006.

Выводы

1. По результатам анализа значений погонной энергии сварки каждого слоя (таблица 1) установлено, что максимальные значения зафиксированы при сварке третьего и четвертого слоев сварного шва и равны 3,12 и 3,11 кДж/мм соответственно. При сварке последующих слоев наблюдалось снижение погонной энергии. Это связано с тем, что начиная с пятого слоя сварку выполняли по схеме слой за два прохода, что позволило уменьшить амплитуду поперечных колебаний и увеличить скорость сварки. Но даже при сварке по указанной схеме среднее значение погонной энергии получили равным 2,23 кДж/мм, при этом для супердуплексных сталей рекомендуемое в пределах от 0,5 до 1,5 кДж/мм [7]. На увеличение среднего значения погонной энергии повлияло применение сварочной проволоки (прутка) диаметром 2,4 мм при рекомендованном диаметре 1,6 мм [7], что повлекло увеличение сварочного тока для гарантированного расплавления

сварочной проволоки и сплавления с основным металлом.

2. Продолжительное время сварки (3 часа 15 минут) КСС \varnothing 89×15,0 связано с выполнением принудительного охлаждения после каждого прохода с целью снизить временной интервал пребывания ЗТВ в диапазоне температур от 1000 до 300 °С, в котором происходит выделение дисперсных частиц в ферритной фазе [7].
3. Полученные значения твердости сварного соединения в областях ОМ-ЗТВМШ соответствуют требованиям СТО Газпром 2-3.7-050-2006, а именно не более 330 HV10 для ОМ и не более 350 HV10 для МШ и ЗТВ. При этом по графику изменения твердости (рис. 7) наименьшее значение зафиксировано в области ОМ (271 HV10). По графику также заметно, что значения твердости в нижних слоях области ЗТВ и МШ выше, чем в верхних. Более того, самое высокое значение твердости 317 HV10 имеет место в нижнем слое области ЗТВ, это доказывает, что многократное воздействие сварочного термического цикла, которому наиболее подвержена область ЗТВ в нижних слоях, способствует повышению твердости.
4. Наибольшее значение ударной вязкости в области ЗТВ является нормальным для супердуплексных сталей из-за наличия обеих фаз (α и γ). Присутствие в матрице двух этих фаз вместе обеспечивает хорошие эластичные и пластичные свойства, которые отражают отличные уровни поглощенной энергии. Также стоит иметь в виду, что микроструктуры после сварки зависят от скорости охлаждения. При высокой локализованной теплопередаче, из-за температуры между слоями не более 40 °С, происходило образование зерен α -фазы малым размером [7] с высокой ударной вязкостью и присутствием γ -фазы в количестве не менее 40 %, которая предотвращает распространение трещин, возникающих в α -фазе [8].
5. При микроструктурном анализе содержания δ -феррита в сварном шве выявлено, что его значение (32,2 %) ниже установленного значения (35 %) по СТО Газпром

2-3.7-050-2006. На повышенное содержание аустенитной фазы в металле шва главным образом повлияло применение сварочной проволоки (прутка) ОК Tigrod 2509 с повышенным содержанием никеля по сравнению с основным металлом.

6. Расчетное значение PRE (более 40 %) свидетельствует о высокой коррозионной стойкости сварного соединения из стали SAF 2507. Потеря массы металла при испытаниях сварного соединения на питтинговую коррозию за 72 часа составила 0,82159 г/м² при допустимом 4 г/м² за 24 часа по СТО Газпром 2-3.7-050-2006, что также подтверждает высокую коррозионную стойкость сварных соединений, стали SAF 2507 по представленной технологии.

Литература

1. Макаров Э.Л., Якушин Б.Ф. Теория свариваемости сталей и сплавов. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 487 с.
2. Банников Е.А. Сварка. М.: АСТ, 2014. 305 с.
3. Сварка и свариваемые материалы. Справочник в 3-х томах. Т. 1. Свариваемость материалов. М.: Металлургия, 1991, 528 с.
4. СТО Газпром 2-3.7-050-2006 Подводные трубопроводные системы.
5. ГОСТ 9.912-89 Единая система защиты от коррозии и старения. Стали и сплавы коррозионностойкие. Методы ускоренных испытаний на стойкость к питтинговой коррозии.
6. Березовская В.В., Березовский А.В. Коррозионностойкие стали и сплавы. Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2019. 244 с.
7. Филистеев В.Г., Стеклова Е.О., Березовский А.В. Свариваемость дуплексных сталей для транспорта агрессивных сред, содержащих сероводород и двуокись углерода // Экспозиция Нефть Газ. 2023. № 2. С. 70–75.
8. Липпольд Д. Металлургия сварки и свариваемость нержавеющей стали. СПб.: Издательство Политехнического университета, 2011. 467 с.

Results

The mechanical and corrosion-resistant properties of the joint made using the technology of manual argon arc welding (MIG) with forced interlayer cooling of super duplex steel SAF 2507 pipes $\varnothing 89 \times 15,0$ mm correspond to STO Gazprom 2-3.7-050-2006.

Conclusions

1. According to the results of the analysis of the values of the linear welding energy of each layer (tab. 1), it was found that the maximum values are fixed when welding 3 and 4 layers of the weld and are equal to 3,12 and 3,11 kJ /mm, respectively. When welding subsequent layers, a decrease in linear energy was observed. This is due to the fact that starting from the fifth layer, welding was performed according to the two-pass layer scheme, which made it possible to reduce the amplitude of transverse vibrations and increase the welding speed. But even when welding according to the specified scheme, the average value of the linear energy was equal to 2,23 kJ/mm, while for super duplex steels the recommended value is in the range from 0,5 to 1,5 kJ/mm [7]. The increase in the average value of the running energy was influenced by the use of a welding wire (rod) with a diameter of 2,4 mm, with a recommended diameter of 1,6 mm [7], which led to an increase in the welding current for guaranteed melting of the welding wire and fusion with the base metal.
2. Long welding time (3 hours 15 minutes) KSS $\varnothing 89 \times 15,0$ is associated with the implementation of forced cooling after each pass in order to reduce the time interval of the stay of the ZTV in the temperature range from 1000 to 300 °C in which the release of dispersed particles occurs in the ferritic phase [7].
3. The obtained values of the hardness of the welded joint in the areas of OM-ZTV-MSH comply with the requirements of STO Gazprom 2-3.7-050-2006, namely, no more than 330 HV10 for OM and no more than 350 HV10 for MS and ZTV. At the same time, according to the hardness change graph (fig. 7), the lowest value is recorded in the OHMS region (271 HV10). According to the graph, it is also noticeable that the hardness values in the lower layers of the ZTV and MS region are higher than in the upper ones. Moreover, the highest hardness value of 317 HV10 occurs in the lower layer of the ZTV region, which proves that repeated exposure to the welding thermal cycle, to which the ZTV region in the lower layers is most susceptible, contributes to an increase in hardness.
4. The highest value of impact strength in the area of ZTV is normal for super duplex steels due to the presence of both phases (α and γ). The presence of these two phases in the matrix together provides good elastic and plastic properties that reflect excellent levels of absorbed energy. It is also worth bearing in mind that the microstructures after welding depend on the cooling rate. With high localized heat transfer, due to the temperature between the layers of no more than 40 °C, the formation of small-sized α -phase grains [7] with high impact strength and the presence of a γ -phase in an amount of at least 40 %, which prevents the propagation of cracks arising in the α -phase [8].
5. During microstructural analysis of the content of δ -ferrite in the weld, it was revealed that its value (32,2 %) is lower than the set value (35%) according to STO Gazprom 2-3.7-050-2006. The increased content of the austenitic phase in the weld metal was mainly influenced by the use of OK Tigrod 2509 welding wire (rod) with an increased nickel content compared to the base metal.
6. The calculated value of PRE (more than 40 %) indicates a high corrosion resistance of the welded joint made of SAF 2507 steel. The loss of metal mass during testing of the welded joint for pitting corrosion in 72 hours was 0,82159 g/m² with an acceptable 4 g/m² in 24 hours according to the Gazprom 2-3.7-050-2006 service station, which also confirms the high corrosion resistance of welded joints, SAF 2507 steel according to the presented technology.

References

1. Makarov E.L., Yakushin B.F.; edited by Makarov E.L. Theory of weldability of steels and alloys. Moscow: Publishing house of MSTU, 2014. 487 p. (In Russ).
2. Bannikov E.A. Welding. AST Publishing House, 2014, 305 p. (In Russ).
3. Welding and materials to be welded: In 3 Vol. Vol. 1. Weldability of materials. M.: Metallurgy, 1991, 528 p. (In Russ).
4. STO Gazprom 2-3.7-050-2006 Underwater pipeline systems. (In Russ).
5. GOST 9.912-89 Unified system of protection against corrosion and aging. Steels and alloys are corrosion resistant. Methods of accelerated tests for resistance to pitting corrosion. (In Russ).
6. Berezovskaya V.V., Berezovsky A.V. Corrosion-resistant steels and alloys. Ekaterinburg: UrFU Publishing House, 2019, 244 p. (In Russ).
7. Filisteev V.G., Steklova E.O., Berezovsky A.V. Weldability of duplex steels for the transport of aggressive media containing hydrogen sulfide and carbon dioxide. Exposition Oil Gas, 2023, issue 2, P. 70–75. (In Russ).
8. Lippold D. Metallurgy of welding and weldability of stainless steels. St. Petersburg: Publishing house of the Polytechnic University, 2011, 467 p. (In Russ).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Филистеев Виктор Геннадьевич, начальник лаборатории инжиниринговых работ и услуг Корпоративного научно-технического центра сварки и контроля сварных соединений ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Московская обл., г.о. Ленинский, п. Развилка, Россия

Для контактов: v_filisteev@vniigaz.gazprom.ru

Березовский Александр Владимирович, к.т.н., доцент кафедры «Технология сварочного производства», ФГАОУ ВО «УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, Россия

Садыков Алексей Александрович, главный специалист лаборатории инжиниринговых работ и услуг Корпоративного научно-технического центра сварки и контроля сварных соединений ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Московская обл., г.о. Ленинский, п. Развилка, Россия

Filisteev Viktor Gennadievich, head of the laboratory for engineering works and services of the corporate scientific and technical center for welding and welded joint inspection of Gazprom VNIIGAZ LLC, Moscow Region, Leninsky district, Razvilka, Russia
Corresponding author: v_filisteev@vniigaz.gazprom.ru

Berezovsky Alexander Vladimirovich, candidate of technical sciences, associate professor of the department of welding production technology, Ural federal university named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

Sadykov Alexey Alexandrovich, chief specialist of the laboratory of engineering works and services of the corporate scientific and technical center for welding and inspection of welded joints of Gazprom VNIIGAZ LLC, Moscow Region, Leninsky district, Razvilka, Russia