

Свариваемость дуплексных сталей для транспорта агрессивных сред, содержащих сероводород и двуокись углерода

Филистеев В.Г.¹, Стеклова Е.О.¹, Березовский А.В.²

¹ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Московская обл., г.о. Ленинский, п. Развилка, Россия,

²УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

v_filisteev@vniigaz.gazprom.ru

Аннотация

Требования к повышению прочностных и служебных свойств сталей, работающих в агрессивных средах, приводит к поиску для внедрения в промышленность новых видов сталей. Наиболее перспективным материалом для ряда отраслей промышленности могут стать двухфазные (дуплексные) аустенитно-ферритные стали, интерес к которым возрос благодаря усовершенствованию технологии их производства, когда производители получили возможность более точно регулировать содержание в металле азота.

Для оценки возможности применения дуплексных сталей при изготовлении конструкций, эксплуатирующихся в агрессивных средах, необходимы исследования свариваемости указанных сталей и коррозионной стойкости сварных соединений, в том числе против сероводородного растрескивания под напряжением (СРН), водородного растрескивания (ВР), стойкости к межкристаллитной (МКК) и ножевой коррозии (НК) и питтинговой коррозии.

Материалы и методы

Для оценки возможности применения дуплексных сталей при изготовлении конструкций, эксплуатирующихся в агрессивных средах, необходимы исследования свариваемости указанных сталей и коррозионной стойкости сварных соединений, в том числе против сероводородного растрескивания под напряжением (СРН), водородного

растрескивания (ВР), стойкости к межкристаллитной (МКК) и ножевой (НК) коррозии и питтинговой коррозии.

Ключевые слова

свариваемость дуплексных сталей, транспорт агрессивных сред, сварочные материалы, параметры сварки

Для цитирования

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. DOI: 10.24412/2076-6785-2023-2-70-75

Поступила в редакцию: 04.04.2023

PIPELINE

UDC 621.791.01 | Original Paper

Weldability of duplex steels for the transport of aggressive media containing hydrogen sulfide and carbon dioxide

Filisteev V.G.¹, Steklova E.O.¹, Berezovsky A.V.²

¹Gazprom "VNIIGAZ" LLC, Moscow Region, Leninsky district, Razvilka, Russia,

²Ural federal university named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

v_filisteev@vniigaz.gazprom.ru

Abstract

The industry looks for new steel types, as requirements for steel strength properties in corrosion environment are becoming more stringent. Duplex stainless steels have a chance to become the most advantageous material for a number of industries. The technical interest in these alloys is due to the improvement of steel production technology, as producers found an opportunity to control nitrogen content more precisely. The paper highlights a need to study joints weldability and corrosion resistance to hydrogen sulfide stress cracking (HSC), hydrogen cracking (HC), intercrystalline Corrosion (ICC), knife-line attack (KLA), and pitting corrosion to assess the possibility of using duplex steels in the production of structures designed for operation in corrosion environment.

Materials and methods

To assess the possibility of using duplex steels in the manufacture of structures operated in aggressive environments, it is necessary to study the weldability of these steels and the corrosion resistance of welded joints, including against hydrogen sulfide stress cracking, hydrogen

cracking, resistance to intercrystalline and knife corrosion and pitting corrosion.

Keywords

weldability of duplex steels, transmission of corrosion media, welding materials, welding parameters

For citation

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). DOI: 10.24412/2076-6785-2023-2-70-75

Received: 04.04.2023

Свариваемость — свойство металлов или сочетания металлов образовывать при установленной технологии сварки соединения, отвечающее требованиям, обусловленным конструкцией и эксплуатацией изделия [1, 2].

В данной статье рассмотрены способы и режимы сварки, рекомендуемые сварочные материалы, рекомендуемые разделки кромок труб из дуплексных сталей.

Для рассмотрения выбраны дуплексные стали, которые имеют относительно высокие пределы текучести и прочности при удовлетворительных пластичности и ударной вязкости и хорошую свариваемость. Это позволяет сократить удельный расход металла при изготовлении конструкций, рассчитываемых на прочность, благодаря уменьшению толщины листа.

Свойства сварных соединений дуплексных нержавеющей сталей не должны отличаться от свойств основного металла, который назначен в соответствии с техническими требованиями к эксплуатации сварной конструкции. Сварное соединение должно обладать мелкозернистой структурой с содержанием аустенитной и ферритной фаз примерно в одинаковом количестве и с минимальным количеством интерметаллидных дисперсных включений.

Благодаря мелкозернистой структуре, представляющей собой смесь аустенита с большой долей феррита, сопротивляемость шва и околшовоной зоны (ОШЗ) образованию горячих трещин (ГТ) при сварке дуплексных сталей значительно выше, чем у однофазных аустенитных сталей. При сварке дуплексных сталей феррит является ведущей фазой при кристаллизации. Но при продолжительном пребывании в диапазоне температур выше сольвуса феррита (1 300 °С), когда сталь полностью ферритная (временная область II на рис. 1), происходит активный рост зерна феррита, основной причиной данного роста является отсутствие аустенитной фазы, тормозящей рост [3]. В связи с тем, что размер ферритного зерна существенно влияет на ударную вязкость и другие пластические свойства, следует уменьшить время пребывания дуплексной стали в полностью ферритной области. Один из способов временного снижения — это управление тепловложением при сварке; но наиболее эффективный способ — это выбор стали с химическим составом, при котором снижается значение $Cr_{ЭК}/Ni_{ЭК}$, что способствует подъему линии сольвуса феррита (рис. 1). При этом необходимо учесть, что при значительном снижении значения $Cr_{ЭК}/Ni_{ЭК}$ увеличивается склонность к образованию кристаллизационного растрескивания сварного шва при сварке (рис. 2).

При охлаждении ниже сольвуса феррита (временная область III (рис. 1)) начинают образовываться и расти аустенитные зерна и происходит превращение феррита в аустенит. Кроме того, в температурном диапазоне ниже сольвуса феррита до 1040 °С азот более растворим в аустените, чем в феррите, и диффундирует из феррита в аустенит.

Более высокие скорости охлаждения в указанном температурном диапазоне способствуют образованию стали с ферритной структурой и высоким содержанием азота в феррите, так как аустенит не полностью выделится из феррита, а азот в меньшем количестве перейдет из феррита в аустенит и впоследствии выпадет в виде нитридов хрома Cr_2N .

Пределы прочности и текучести в дуплексных сталях достигают максимума при

равном содержании в сварных швах аустенитной и ферритной фаз.

Дуплексные нержавеющей стали из-за высокого содержания феррита чувствительны к охрупчиванию при температуре 475 °С, а при температурах выше 538 °С может произойти превращение части ферритной фазы в сигма-фазу. Из-за большого количества феррита эти материалы демонстрируют характеристики перехода от вязкого к хрупкому ударному излому при температурах от -45 °С, что приводит к снижению ударной вязкости сварного шва и зоны термического влияния (ЗТВ). Рекомендуемый диапазон рабочих температур для этих сплавов обычно составляет от -40 до 260 °С [3, 4].

При сварке первичная кристаллизация происходит в виде дельта-феррита (δ — феррит) (рис. 3), что делает эти сплавы устойчивыми к горячему растрескиванию. Когда температура шва и высокотемпературных участков ЗТВ падает ниже сольвуса феррита, частичное превращение в аустенит начинается на границах ферритных зерен, а затем продолжается межкристаллитно (рис. 1). По завершении цикла охлаждения образуется микроструктура с крупными ферритными зернами, окруженными непрерывной сетью аустенита. Внутри зерен также происходит преобразование аустенита. Процентное содержание феррита и аустенита в микроструктуре металла сварного шва дуплексных сталей можно оценить, используя диаграмму состояния WRC-1992 по аналогии с расчетами для аустенитных нержавеющей сталей.

Природа дальнейшего ферритно-аустенитного превращения зависит как от химического состава металла, так и от скорости его охлаждения. Микроструктура, состав и свойства металла сварного шва в основном определяются использованием соответствующего присадочного металла. Присадочные металлы, разработанные для конкретных дуплексных сплавов, обычно содержат на 2–3 % больше никеля, чем основной металл, что дополнительно способствует преобразованию аустенита, что, в свою очередь, повышает пластичность и ударную вязкость (рис. 4).

При комплексном легировании дуплексных сталей в интервале температур от 1 000 °С и ниже происходит выделение дисперсных частиц в ферритной фазе. Все эти реакции выделений зависят от времени и температуры (рис. 5). Многие подобные выделения, в частности σ -, χ - и α' -фазы, а также нитриды хрома охрупчивают дуплексные стали — и их следует избегать. Следовательно, повышенное содержание хрома, молибдена и вольфрама ускоряет образование выделений, в частности σ -фазы [5]. Такое потенциальное охрупчивание особенно заметно при многопроходной сварке.

Интенсивный нагрев и последующие циклы быстрого охлаждения, присущие процессу сварки, вызывают микроструктурные изменения, выделения (или 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 физическими и коррозионными свойствами [6]. Обычные термические циклы сварки, как правило, слишком коротки для любого вредного образования σ -фазы или охрупчивания до 475 °С.

Для сохранения исходного уровня аустенита при сварке дуплексных нержавеющей сталей, а также пластических

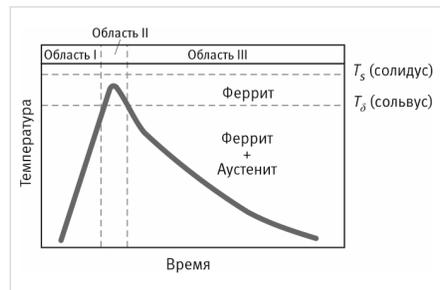


Рис. 1. Термический цикл дуплексной нержавеющей стали с высоким значением $Cr_{ЭК}/Ni_{ЭК}$: область I — превращение аустенита в феррит и растворение дисперсных выделений; область II — полностью ферритная структура и рост зерна; область III — восстановление аустенита и выпадение дисперсных выделений (карбидов и нитридов)



Рис. 2. Зависимость склонности сварных соединений к кристаллизационным трещинам от значения $Cr_{ЭК}/Ni_{ЭК}$

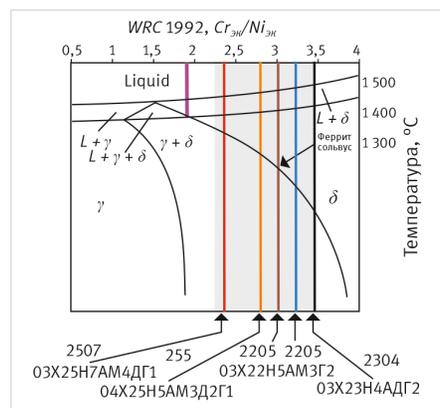


Рис. 3. Область повышенных температур псевдобинарной фазовой диаграммы для дуплексных нержавеющей сталей. Выделенная область представляет диапазон широко используемых сплавов

и коррозионно-стойких свойств рекомендуется применять стали с содержанием углерода не более 0,03 %, предельно снижать погонную энергию при сварке, использовать сварочные материалы, обеспечивающие одинаковые механические и коррозионно-стойкие свойства сварных соединений и основного металла, для повышения пластичности сварных соединений выполнить закалку от 1050 °С.

При выполнении указанных рекомендаций обеспечивается достаточная свариваемость дуплексных нержавеющих сталей.

Дуплексные стали отличаются повышенной склонностью к росту зерна в зоне термического влияния при воздействии сварочного термического цикла (рис. 6) [3]. Наряду с ростом ферритных зерен возрастает общее количество феррита. Последующим быстрым охлаждением фиксируется образовавшаяся структура. Размеры зерна и количество феррита, а также ширина зоны перегрева зависят от погонной энергии сварки, соотношения структурных составляющих в исходном состоянии и чувствительности стали к перегреву [7].

Дуплексные стали можно сваривать ручной, механизированной электродуговой и другими способами сварки. Предпочтительнее

способы сварки с невысокими погонными энергиями. Рекомендованные значения погонной энергии при сварке дуплексных сталей типа 08X22H6 (SAF 2205) от 0,50 до 2,50 кДж/мм, для более легированных супердуплексных сталей типа SAF 2507 от 0,50 до 1,50 кДж/мм [3, 5]. Если сварное соединение остывает слишком медленно из-за избыточной погонной энергии и его температура в течение долгого времени остается в промежутке от 700 до 800 °С, то выделяется σ -фаза, что снижает ударную вязкость. С другой стороны, если скорость остывания сварного соединения излишне велика из-за слишком низкой погонной энергии, в околосварочной зоне близко к сварочному шву выделяется нитрид хрома — и в результате формируется слой с низким содержанием хрома. Это приводит к снижению сопротивления коррозии.

При выборе способа сварки необходимо учитывать химический состав дуплексной стали, толщину стенки труб и величину погонной энергии. Наименьшая погонная энергия достигается при применении способа ручной аргодуговой сварки (РАД), а наиболее высокое значение погонной энергии — при автоматической сварке под слоем флюса (АФ).

Расчет погонной энергии ($q_{П}$) осуществляется по формуле [8]:

$$q_{П} = 60 \times I_{СВ} \times U_{Д} \times \eta_{Э} / V_{СВ} \times 1000 \text{ кДж/мм},$$

где $V_{СВ}$ — скорость сварки, мм/мин; $\eta_{Э}$ — эффективный КПД процесса нагрева.

Значения эффективного КПД ($\eta_{Э}$) процесса нагрева [7, 8] для разных способов сварки приведены в таблице 1.

Сварочные материалы для стандартных дуплексных и супердуплексных сталей разрабатываются так, чтобы наплавленный металл гарантированно имел минимально необходимые прочностные и коррозионные характеристики. Микроструктура, состав и свойства металла сварного шва в основном определяются использованием соответствующего присадочного металла. Присадочные металлы, разработанные для конкретных дуплексных сплавов, обычно содержат на 2–3 % больше никеля, чем основной металл, что дополнительно способствует преобразованию аустенита, что, в свою очередь, повышает пластичность и ударную вязкость.

Сварочные материалы и механические свойства сварных соединений дуплексных (аустенитно-ферритных) сталей [9] приведены в таблице 2.

Подготовка кромок должна обеспечивать полное проплавление с минимальным риском прожога. Как правило, при сварке дуплексных сталей разделка кромок должна быть шире, чем для стандартных аустенитных нержавеющих сталей. Для выполнения корневого шва рекомендуется метод РАД. Подготовка кромок под все виды сварки производится механическим способом, чтобы исключить на данном этапе возникновение зон термического влияния, снижающих регламентированные свойства сварных соединений [7].

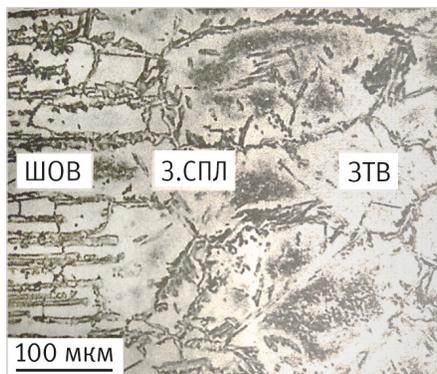


Рис. 4. Микроструктура аустенитно-ферритной стали в металле шва, в зоне сплавления и в зоне термического влияния
Fig. 4. Microstructure of austenitic-ferritic steel in the weld metal, in the fusion zone and in the zone of thermal influence

Табл. 1. Влияние способа сварки на значения эффективного КПД
Tab. 1. Influence of the welding method on the values of effective efficiency factor

| Способ сварки | Эффективный КПД ($\eta_{Э}$) процесса нагрева |
|--|---|
| Автоматическая сварка под слоем флюса | 0,8–0,95 |
| Ручная дуговая сварка | 0,7–0,85 |
| Механизированная сварка плавящимся электродом в среде активных газов | 0,7–0,8 |
| Ручная аргодуговая сварка | 0,64–0,75 |

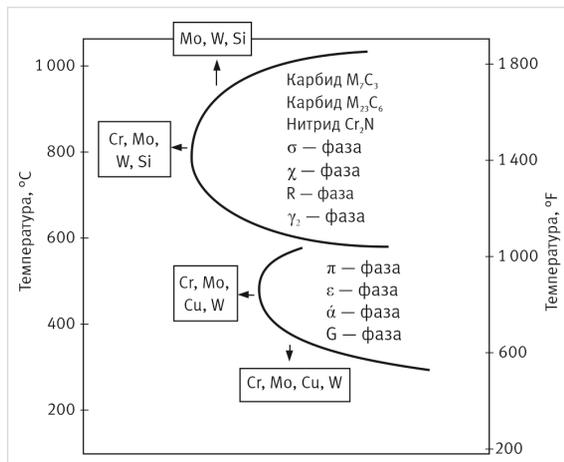


Рис. 5. Образование выделений в дуплексных нержавеющих сталях
Fig. 5. Formation of secretions in duplex stainless steels

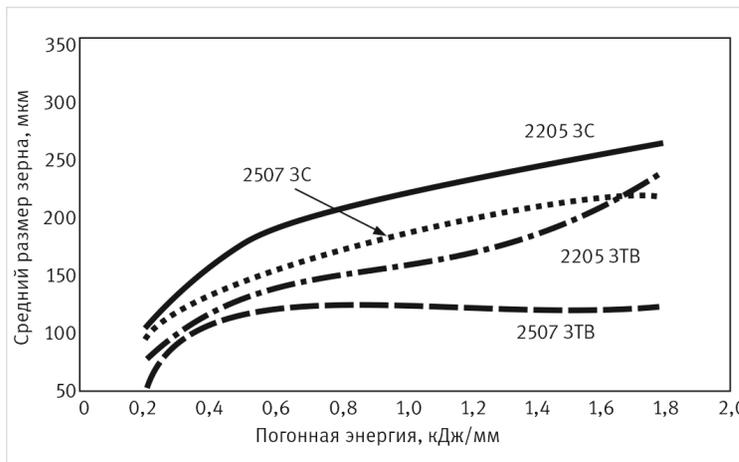


Рис. 6. Влияние погонной энергии на рост зерна феррита (время пребывания металла выше температуры ферритного превращения): ЗС — зона сплавления; ЗТВ — зона термического влияния [3]
Fig. 6. The effect of linear energy on the growth of ferrite grains (the residence time of the metal above the temperature of ferritic transformation): MZ — molten zone; HAZ — heat activated zone [3]

Табл. 2. Влияние способа сварки и некоторых сварочных материалов на свойства сварных соединений дуплексных сталей

Tab. 2. Influence of the welding method and some welding materials on the properties of duplex steel welded joints

| Марка стали / тип | Сварочные материалы | $\sigma_{0,2}$, МПа | σ_B , МПа | δ , % |
|----------------------------------|--|----------------------|------------------|--------------|
| Ручная дуговая сварка | | | | |
| 08X22H6T | ЦЛ-11 | 440 | 730 | 29 |
| | АНВ-23 | 470 | 690 | 25 |
| SAF 2205 / 02X22H5AM3Г | OK 67.50 (03X23H9M3AГ) | 691 | 820 | 25 |
| | OK 67.55 | 650 | 800 | 28 |
| 08X21H6M2T | АНВ-36 | 450 | 660 | 39 |
| | НЖ-13 | 470 | 720 | 29 |
| SAF 2507 / 02X25H7AM4 | OK 68.53 | 700 | 850 | 30 |
| | OK 68.55 | 700 | 900 | 28 |
| Ручная аргонодуговая сварка | | | | |
| 08X22H6T | Проволока Св-06X21H7БТ | 420 | 800 | 35 |
| | Проволока Св-03X21H10AГ5 | 500 | 710 | 30 |
| SAF 2205 / 02X22H5AM3Г | OK Tigrod 2209 (03X22H9M3AГ2) | 600 | 725 | 28 |
| 08X21H6M2T | Проволока Св-06X20H11M3ТБ | 420 | 720 | 26 |
| | Проволока Св-08X19H10Б | 340 | 810 | 46 |
| SAF 2507 / 02X25H7AM4 | OK Tigrod 2509 (02X25H9M4B) | 670 | 850 | 30 |
| Автоматическая сварка под флюсом | | | | |
| 08X22H6T | Проволока Св-06X21H7БТ, флюс АН-26 | 420 | 800 | 35 |
| | Проволока Св-03X21H10AГ5, флюс АНК-45 | 500 | 710 | 30 |
| SAF 2205 / 02X22H5AM3Г | Проволока OK Autrod 2209, флюс OK Flux 10.93 | 630 | 780 | 28 |
| 08X21H6M2T | Проволока Св-06X20H11M3ТБ, флюс АН-26 | 420 | 720 | 26 |
| | Проволока Св-08X19H10Б, флюс АН-26 | 340 | 810 | 46 |
| SAF 2507 / 02X25H7AM4 | Проволока OK Autrod 2509, флюс OK Flux 10.94 | 626 | 830 | 28 |

Режимы сварки рекомендуется назначать исходя из оптимального тепловложения при дуговой сварке в зависимости от степени легирования и с учетом толщины стенки основного металла (табл. 3) [10].

На практике дуплексные сплавы обычно устойчивы к горячему растрескиванию при кристаллизации сварного шва. По всей видимости, это связано с тем, что они имеют относительно низкий уровень примесей — и вероятность образования сплошных зернограничных жидких пленок невелика [5]. Поскольку на склонность к горячему растрескиванию также влияет форма валика сварного шва, рекомендуется избегать узкощелевой разделки при сварке, высокого сварочного тока и высокой скорости сварки. Рекомендуемые виды разделки кромок приведены на рисунках 7 и 8.

Предварительный подогрев дуплексной нержавеющей стали перед сваркой обычно не требуется. Небольшой подогрев до температуры окружающей среды может быть рассмотрен для основного металла, для устранения образования конденсата или для просушки соединения перед сваркой. В тех случаях, когда свариваются толстостенные профили, может быть целесообразным предварительный подогрев до 150 °С. Рекомендуется максимальная межслойная температура до 150 °С, чтобы избежать медленного охлаждения в критических диапазонах температур. Величина межслойной температуры зависит от состава основного металла и может быть увеличена по рекомендации разработчиков стали. В случаях, когда будет использоваться послесварочный отжиг на твердый раствор, нет необходимости в ограничении межслойной температуры.

Табл. 3. Рекомендуемые режимы сварки дуплексных сталей

Tab. 3. Recommended welding modes for duplex steels

| Способ сварки | Диаметр электрода, мм | Скорость сварки, мм/мин | Сила тока, А | Напряжение, В |
|---------------|-----------------------|-------------------------|--------------|---------------|
| РД | 3,2 | не менее 60 | 70–100 | 20–23 |
| РАД | проволока 1,6 | не менее 60 | 50–80 | 10–11 |
| АФ | проволока 4,0 | не менее 60 | 520–550 | 32–34 |

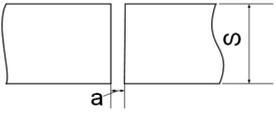
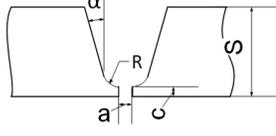
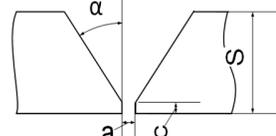
| | | | | | | |
|---|--------------|--------------------------------|--------------|----------------------------|----------------------------|---|
| Способ сварки | S, мм | α, мм | | | |  |
| | РД | ≤ 3 | 1–2 | | | |
| РАД | ≤ 3 | 0–2 | | | |  |
| Способ сварки | S, мм | a, мм | c, мм | R, мм | α | |
| РД | >12 | 1–2 | 2–3 | 6 | 15° | |
| РАД | >6 | 1–2 | 0–2 | 6–8 | 15° | |
| АФ* | >10 | 1–2 | 1–3 | 6–8 | 15° | |
| Способ сварки | S, мм | a, мм | c, мм | α | | |
| | РД | 3–15 | 2–3 | 1–2 | 35° ⁵ | |
| | РАД | 2,5–8 | 2–3 | 1–2 | 35° ⁵ | |
| | АФ* | 4–12 | 2–3 | 1–2 | 45° ⁵ | |
| *Корневой слой шва способом РАД, РД. | | | | | | |
|  | | | | | | |

Рис. 7. Разделка кромок для односторонней сварки стыковых сварных соединений:

а — без разделки кромок; б — U-образная разделка кромок; в — V-образная разделка кромок
Fig. 7. Finishing edges for on-sided welding of butt welded joints: а — without finishing edges; б — U-shaped finishing edges; в — V-shaped finishing edges

Послесварочная термообработка обычно не требуется и не рекомендуется. Сварные соединения при наличии значительных сварочных напряжений или превращений, приводящих к низкой коррозионной стойкости и пластичности, или при нарушениях рекомендованной технологии сварки должны подвергаться послесварочной термообработке с отжигом на твердый раствор. Ремонтируемые сваркой отливки из дуплексных сталей также подвергают отжигу. Такая термообработка поможет восстановить желаемый фазовый баланс во всей области сварного шва. Требуемая термическая обработка: нагрев до 1 050–1 100 °С (иногда до 1 150 °С) с последующей закалкой в воду или на воздухе, что, однако, бывает сложно выполнить для большинства сварных соединений.

Поскольку дуплексные стали имеют очень низкий предел текучести при температурах отжига, может потребоваться специальная оснастка для предотвращения их деформации в процессе такого нагрева.

Итоги

Обеспечить свариваемость дуплексных нержавеющих сталей, представляющих собой сплавы типа *Fe-Cr-Ni-Mo-N*, возможно при верном выборе присадочного материала в соответствии с требованиями к эксплуатации сварного соединения и применяя способы сварки с невысокими погонными энергиями.

Выводы

- Установлено, что коррозионно-стойкие дуплексные стали и их сварные соединения целесообразно использовать при температурах от -40 до 260 °С.
- При сварке допустимыми способами, как правило, не требуется предварительный подогрев или послесварочная термообработка. Отжиг готовых сварных конструкций назначается только после сварки литых или толстостенных деталей путем их нагрева до 1 050–1 100 °С (1 150 °С) с последующим охлаждением в воду или на воздухе.
- Погонную энергию сварки соединений следует ограничивать в пределах от 0,5 до 1,5 кДж/мм для супердуплексных сталей и от 0,5 до 2,5 кДж/мм для прочих дуплексных сталей.
- Применяемые сварочные (присадочные) материалы, как правило, имеют избыточное легирование никелем по сравнению с основным металлом, чтобы обеспечить оптимальный баланс феррита и аустенита, когда конструкция будет

| Способ сварки | S, мм | a, мм |
|---------------|-------|-------|
| РД | 3–4 | 1,5–3 |
| РАД | 3–4 | 1,5–3 |

| Способ сварки | S, мм | a, мм | c, мм | α |
|---------------|-------|-------|-------|----------|
| РД | >10 | 1,5–3 | 1–3 | 35° |
| РАД | >10 | 1,5–3 | 1–3 | 35° |
| АФ | >10 | 0 | 3–5 | 45° |

| Способ сварки | S, мм | a, мм | c, мм | R, мм | α |
|---------------|-------|-------|-------|-------|----------|
| РД | >25 | 1–3 | 1–3 | 6–8 | 15° |
| РАД | >25 | 0 | 3–5 | 6–8 | 15° |

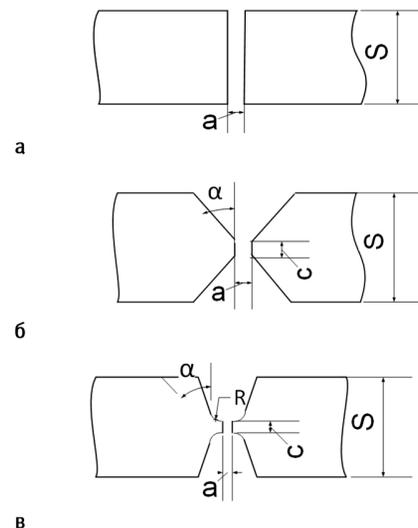


Рис. 8. Разделка кромок для двусторонней сварки стыковых сварных соединений: а — без разделки кромок; б — X-образная разделка кромок; в — X-образная разделка кромок с двумя U-образными скосами

Fig. 8. Finishing edges for double-sided welding of butt welded joints: a — without finishing edges; б — X-shaped finishing edges; в — X-shaped finishing edges with two U-shaped bevels

использоваться в состоянии после сварки. Если предполагается послесварочная термическая обработка в виде отжига, то допускается применять присадочные материалы, состав которых соответствует составу основного металла. Использование материалов чисто аустенитного типа может привести к появлению кристаллизационных трещин в шве и локальному снижению коррозионной стойкости сварного соединения.

Литература

1. Макаров Э.Л., Якушин Б.Ф. Теория свариваемости сталей и сплавов. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. 549 с.
2. ГОСТ 29273-92. Свариваемость. Определение. М.: Издательство стандартов, 2004.
3. Липпольд Д. Металлургия сварки и свариваемость нержавеющих сталей. СПб.: Политехнический университет, 2011. 467 с.
4. Металлы и сплавы. СПб.: Профессионал, Мир и семья, 2003. 1066 с.
5. Березовская В.В., Березовский А.В. Коррозионностойкие стали и сплавы. Екатеринбург: Уральский университет, 2019. 244 с.
6. Еремин Е.Н. Свариваемость сталей. Омск: ОмГТУ, 2005. 160 с.
7. Макаров Э.Л. Сварка и свариваемые материалы. Свариваемость материалов. Т. 1. М.: Металлургия, 1991, 528 с.
8. Банников Е.А. Сварка. М.: АСТ, 2014. 430 с.
9. Куликов В.П. Технология сварки плавлением и термической резки. Минск: Новое знание; М.: ИНФРА-М, 2016. 463 с.
10. ОСТ 26.260.3-2001 Сварка в химическом машиностроении. Основные положения. ОАО «НИИХИММАШ», 2001. 178 с.

ENGLISH

Results

It is possible to ensure the weldability of duplex stainless steels, which are Fe-Cr-Ni-Mo-N alloys, with the right choice of filler material in accordance with the requirements for the operation of the welded joint and using welding methods with low linear energies.

Conclusions

- It has been established that corrosion-resistant duplex steels and their welded joints should be used at temperatures from -40 to 260 °С.
- When welding by acceptable methods, as a rule, preheating or post-welding heat treatment is not required. Annealing of finished welded structures is prescribed only after welding cast or thick-walled parts by heating them to 1 050–1 100 °С (1 150 °С), followed by cooling

in water or in air.

- The linear welding energy of joints should be limited in the range from 0,5 to 1,5 for super duplex steels and from 0,5 to 2,5 kJ/mm for other duplex steels.
- The welding (additive) materials used, as a rule, have excessive nickel alloying compared to the base metal in order to ensure an optimal balance of ferrite and austenite when the structure is used in the post-welding state. If post-welding heat treatment in the form of annealing is assumed, then it is allowed to use additive materials whose composition corresponds to the composition of the base metal. The use of purely austenitic materials can lead to the appearance of crystallization cracks in the seam and a local decrease in the corrosion resistance of the welded joint.

References

1. Makarov E.L., Yakushin B.F. Theory of weldability of steels and alloys. Moscow: Publishing house of MSTU im. N.E. Bauman, 2018, 549 p. (In Russ).
2. GOST 29273-92. Weldability. Definition. M.: Publishing House of Standards, 2004. (In Russ).
3. Lippold D. Metallurgy of welding and weldability of stainless steels. St. Petersburg: Polytechnic University, 2011, 467 p. (In Russ).
4. Metals and alloys. St. Petersburg: Professional, Mir i Semya, 2003, 1066 p. (In Russ).
5. Berezovskaya V.V., Berezovsky A.V. Corrosion-resistant steels and alloys. Yekaterinburg: Ural University Publishing House, 2019, 244 p. (In Russ).
6. Eremin E.N. Weldability of steels. Omsk: Omsk State Technical University, 2005, 160 p. (In Russ).
7. Makarov E.L. Welding and materials to be welded. Weldability of materials. Vol. 1. M.: Metallurgy, 1991, 528 p. (In Russ).
8. Bannikov E.A. Welding. M.: AST, 2014, 430 p. (In Russ).
9. Kulikov V.P. Technology of fusion welding and thermal cutting. Minsk: New Knowledge; Moscow: INFRA-M, 2016, 463 p. (In Russ).
10. OST 26.260.3-2001 Welding in chemical engineering. The main provisions. "NIHIMMASH" JSC, 2001, 178 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, УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

Стеклова Елена Олеговна, 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

Steklova Elena Olegovna, 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

ООО «Выставочная компания
Сибэкспосервис»

Экспо SERVICE
www.ses.net.ru



Шестнадцатая межрегиональная специализированная выставка
НИЖНЕВАРТОВСК. НЕФТЬ. ГАЗ. ТЭК
НИЖНЕВАРТОВСК, 4–5 октября 2023



Тринадцатая межрегиональная специализированная выставка
САХАПРОМЭКСПО – 2023
ЯКУТСК, 25–26 октября 2023

+7 (383) 335 63 50
vkases@yandex.ru
www.ses.net.ru

**ЭКСПОЗИЦИЯ
НЕФТЬ ГАЗ**

Генеральный информационный партнер