

Канд. техн. наук Савонов Ю. М., канд. техн. наук Александров О. Г.,
канд. техн. наук Осипов М. Ю., канд. техн. наук Андрущенко М. І.

Запорізький національний технічний університет, м. Запоріжжя

КОРОЗІЙНА СТІЙКІСТЬ І ТЕРМІН СЛУЖБИ УСТАТКУВАННЯ, ЩО ЕКСПЛУАТУЄТЬСЯ В ЛУЖНИХ РОЗЧИНАХ (ОГЛЯД)

Мета роботи. Розробка технологічного процесу зварювання і контролю якості трубопроводів для підвищення надійності роботи і терміну їх служби в агресивних середовищах.

Методи дослідження. Результати отримані із застосуванням електрохімічних досліджень наплавленого металу і зварних швів нержавіючих сталей, металографічного аналізу мікроструктур зруйнованих ділянок реальних трубопроводів.

Отримані результати. Висвітлено питання корозійної поведінки зварних швів обладнання з нержавіючої сталі 12X18H10T в лужних розчинах. Розглянуто основні види корозійного пошкодження зварного обладнання в агресивних середовищах. Наведено зварювальні матеріали, що забезпечують високу корозійну стійкість наплавленого металу зварних швів.

Наукова новизна. Устаткування зі сталі 12X18H10T, яке експлуатується в лужних середовищах може піддаватися корозійному руйнуванню по зварним з'єднанням: виборчій корозії металу шва і корозійному розтріскуванню. Електрохімічні дослідження показали, що корозія зварних з'єднань сталі 12X18H10T в лужних розчинах проходить в пасивній ділянці, тому основним видом руйнувань є корозійне розтріскування, обумовлене наявністю залишкових напружень.

Практична цінність. На основі проведеного аналізу характеру руйнувань обрані зварювальні матеріали, рекомендовані режими виконання зварних з'єднань, а також методика подальшої термічної обробки зварних швів з метою зняття залишкових напруг і збільшення терміну служби технологічного обладнання.

Ключові слова: зварне з'єднання, сталь 12X18H10T, корозійне розтріскування, термічна обробка, наплавлений метал.

1 Загальні положення

В целюлозно – паперовій промисловості найбільш широко використовується сульфатний спосіб отримання целюлози. В основі сульфатного методу лежить застосування лужних розчинів для виділення целюлози з деревини або іншої рослинної сировини. Так, початковий технологічний розчин «білий луг» містить близько 40–75 г/л NaOH, 25 г/л N₂S, 10 г/л Na₂CO₃, 2–4 г/л Na₂SO₄. У процесі варіння розчин насичується продуктами переробки деревини, перетворюючись у, так званий, «чорний луг», значно меншої агресивності. Температура у варильному котлі змінюється від 70 °С до 170 °С, тиск підтримується 1,0–1,2 МПа, щоб уникнути закипання розчину.

Для виробництва сульфатної целюлози застосовують установки безперервної дії з добовою продуктивністю 400–500 т і 800–900 т, які виготовлені зі сталі 12X18H10T або двошарової сталі з неіржавним плакувальним шаром. Варильні котли, трубопроводи піддаються періодичній промивці соляною кислотою для видалення накипу. Загальний час промивки досягає 50–60 годин на рік. Експлуатація котлів показала, що лужне середовище і соляна кислота можуть викликати сильні пошкодження стінок і зварних з'єднань устаткування.

Руйнування котлів, що мали місце, трубопроводів, пропарювальних камер тощо поставили завдання розробки корозійностійких матеріалів і технології зварювання сталі 12X18H10T стосовно виготовлення і ремонту устаткування для виробництва сульфатної целюлози.

Проблема корозії металів в лугах відома з часів винаходу паровозів. Тоді спроби інтенсифікувати роботу котлів привели до «лужної крихкості» - різновиду корозійного розтріскування сталі. Найбільше корозійне розтріскування виявилось в содовій і глиноземній промисловості. На початку 60-х років мали місце аварійні руйнування на Каменськ-Уральському і Богословському алюмінієвих комбінатах.

У період 70–80-х років зусиллями зарубіжних, в основному японських і вітчизняних дослідників [1–5], були встановлені основні закономірності корозійної і електрохімічної поведінки металів, стопів і сталей в лужних розчинах при високих температурах і концентраціях ((30–75) % NaOH, $t = 130–140$ °С). Було показано, що характер корозійних процесів великою мірою залежить від корозійного потенціалу середовища. В концентрованих розчинах NaOH при температурі кипіння практично всі метали і стопи, за винятком високохромистих (більше 30 % хрому), піддаються активному

розчиненню. В цих умовах тільки нікель завдяки термодинамічній стійкості має високу корозійну стійкість [2, 5].

Також було виявлено, що навіть при інтенсивній теплопередачі від стінки котла до розчину при нагріві сталій потенціал корозії зміщується в пасивну область [4] з утворенням на поверхні металу захисної оксидної плівки. Швидкість встановлення пасивного стану в сильному ступені залежить від хімічного складу сталі.

Корозія металів в лужних середовищах підпорядковується тим же закономірностям, що і в кислих [3–5]. При прогнозуванні корозійної поведінки основного металу 12X18H10T і зварних з'єднань в лужних розчинах важливе значення має сталій потенціал корозії. Характер можливих корозійних руйнувань залежить, насамперед, від величини і характеру зміни в часі потенціалу корозії (рис. 1).

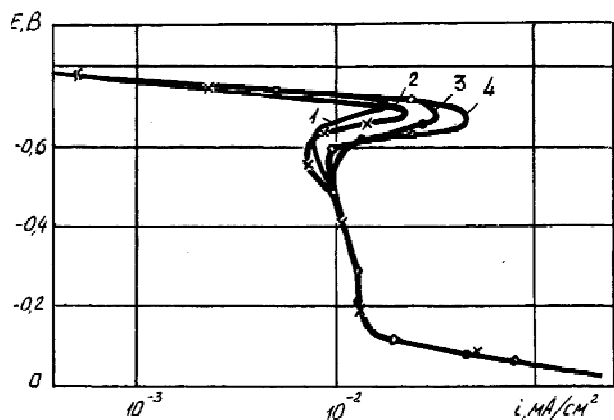


Рис. 1. Анодні потенціодинамічні криві зварних з'єднань сталі 08X18H10T в 3 % NaOH при 9 °С:

1 – основний метал; 2 – зварні з'єднання, електрод ЦЛ-4; 3 – зварні з'єднання, електрод ОЗЛ-8; 4 – зварні з'єднання, електрод ЦЛ-4

Величина потенціалу корозії залежить, насамперед, від концентрації і температури лужного розчину (рис. 2).

Потенціал корозії розчинів їдкого натру з концентрацією менше 30% при будь-яких температурах розташовується в інтервалі (-0,2, -0,4) В, який знаходиться в пасивній області на анодній поляризаційній кривій сталі 12X18H10T, що знято в розчині, який по складу і концентрації їдкого натру відповідає білому щелоку (рис. 3).

Величина потенціалу корозії, що встановився, залежить від складу і структури зварних з'єднань і напруженого стану металу [3].

2 Умови роботи трубопроводів із сталі 12X18H10T

При варінні целюлози сульфатним способом деревна тріска обробляється розчином білого лугу, що містить в якості активного варильного реагенту суміш з 3–4 частин їдкого натру і однієї частини сульфиду натрію (NaOH + Na₂S). В процесі варіння тріска насичується

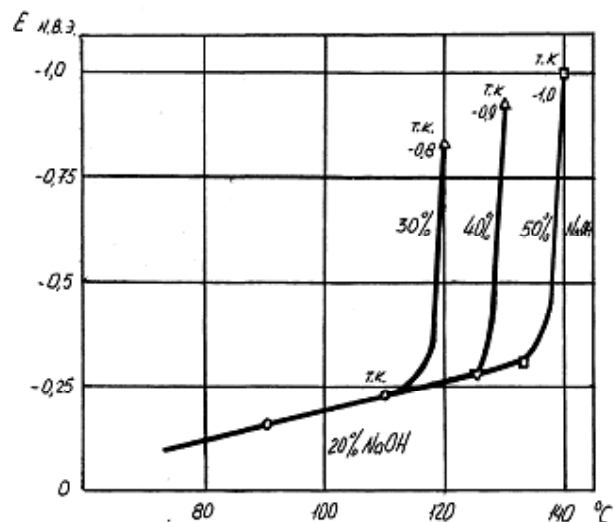


Рис. 2. Залежність потенціалу корозії сталі 12X18H10T від температури і концентрації NaOH



Рис. 3. Залежність потенціалу корозії в 30 % NaOH при 903 ° від часу: 1 – сталь 08X18H10T; 2 – зварне з'єднання (електрод ОЗЛ-8)

ся варильним щелоком, внаслідок чого лігнін переходить в розчинний стан.

Целюлозна маса, що охолоджується чорним щелоком, який надходить до котла, до температури 100–120 °С, видувається з нижньої частини котла.

Живильний трубопровід працює в умовах корозійної дії варильного щелока з рН 13, що містить, окрім їдкого натру і сірчистого натрію, сульфат натрію, соду (NaOH, Na₂S, Na₂SO₄, NaCO₃) і продукти гідролізу деревини.

Виготовлений для варіння білий луг є промисловим розчином такого складу, г/л : Na₂S–25; Na₂SO₄ – 2–4; Na₂CO₃ – 10. Температура циркулюючого лугу досягає (115–120) °С. Тиск в трубопроводі за умовами вироб-

ництва періодично змінюється від 0,14 МПа до 1,2 МПа.

Періодично для видалення відкладень трубопроводу промивають 0,1% -ним розчином соляної кислоти, яка інгібувана уротропіном.

Устаткування безперервного варіння целюлози продуктивністю від 300 до 840 т/добу використовуються на багатьох целюлозно-паперових комбінатах і лісопромислових комплексах.

3 Характер руйнування живильних трубопроводів

При експлуатації установок безперервного варіння целюлози живильні трубопроводи схильні до руйнувань, які, як правило, локалізуються в зоні зварних з'єднань труб. Інтенсивність руйнування може бути різною – від свищів і тріщин біля зварних швів до утворення наскрізних тріщин і розривів трубопроводів.

Живильні трубопроводи Котласського і Архангельського ЦПК виготовлені зі зварних труб діаметром 312×5 мм. Матеріал труб – хромонікелева аустенітна сталь марки 2333 за шведським стандартом, що відповідає сталі типу 12X18H10 за ГОСТ 5632-72. Зварні з'єднання виконані автоматичним зварюванням за один прохід із застосуванням хромонікелевого присадного дроту, що містить 0,06% С, 17–19% Cr, 9–11% Ni, що відповідає зварювальному дроту марки Св-06Х19Н9 за ГОСТ 2246-70. Внаплавленому металі зварних швів Котласського ЦПК додатково є молибден. Хімічний склад основного металу і зварних швів наведено в табл. 1.

Руйнування зварного з'єднання відбувається в результаті механічного розриву труби по наплавленому металу внаслідок того, що робоча напруга перевищила механічну міцність ослабленої корозією ділянки.

Основний метал труб мав рівноважну структуру аустеніту з окремими включеннями фериту, наплавлений – аустенітно-ферритну зі змістом фериту близько 10%. Корозійному руйнуванню піддаються переважно

метал шва дельта-фериту.

Особливості механізму корозійних руйнувань зварних з'єднань сталі Х18Н10Т в лужних середовищах обумовлені, по-перше: наявністю одночасно двох фаз: аустеніту і фериту, що мають градієнт вмісту хрому та нікелю, і, по-друге: різними обсягами, які займають ці фази в металі. Наявність молибдену в металі шва негативно позначається на його корозійній стійкості в 65% -ній киплячій азотній кислоті і призводить до посилення виборчої корозії.

Стійкість наплавленого металу з 17% хрому в умовах впливу лугу знаходиться в обернено пропорційній залежності від вмісту нікелю: чим вище вміст нікелю, тим менше швидкість корозії. Характерно, що наплавлений метал, близький за складом до фериту, має більш високу швидкість корозії, ніж той, що містить до 15% нікелю. Швидкість корозії металу труб складала в цих умовах 0,275 г/(м² год).

Виборча корозія металу шва зварних трубопроводів із сталі 12Х18Н10 пов'язана з тим, що ферит, що містить в порівнянні з аустенітом менше нікелю, є анодом і внаслідок малої поверхні контакту інтенсивно розчиняється в міцних лужних розчинах. Присутність молибдену в шві інтенсифікує процес виборчої корозії. Причина переважної локалізації корозії у лінії сплаву полягає в концентрації напруги в місцях переходу від основного металу до більшої його товщини в районі шва.

Головною причиною руйнування поживних трубопроводів є корозійне розтріскування, яке виникає внаслідок спільної дії залишкових зварювальних напружень і варильного щелока. Аустенітні хромонікелеві сталі, як відомо, дуже схильні до корозійного розтріскування в розчинах хлоридів і лугів [1, 4]. Руйнування в цьому випадку настає без видимих слідів корозії. Швидкість розвитку корозійних тріщин залежно від агресивності середовища, величини залишкової і робочої напруги

Таблиця 1 – Хімічний склад основного металу і зварних швів трубопроводів зі сталі 2333 за шведським стандартом

Ділянка трубопроводу	Тип металу	Хімічний склад, %							
		C	Si	Mn	Cr	Ni	Ti	S	P
Котласського ЦПК	Основний наплавлений	0,05	0,49	0,93	17,1	10,2	сл.	0,013	0,029
		0,05	0,48	0,96	17,4	10,6	сл.	0,023	0,020
Архангельського ЦПК	Основний наплавлений	0,06	0,47	1,49	18,5	9,0	сл.	0,017	0,022
		0,06	0,46	1,3	18,0	10,4	сл.	0,020	0,027

Таблиця 2 – Корозійна стійкість наплавленого металу в киплячому 55% -му розчині NaOH

Наплавлений метал		Хімічний склад, %		Швидкість корозії, г/(м ² год)	
№ виплавки	Тип	Cr	Ni	Швидкість корозії, г/(м ² год)	
				I цикл	II цикл
1.	X17	16,40	–	2,180	9,370
2.	X17H5	17,16	4,80	10,850	2,510
3.	X17H6	16,68	5,89	6,550	2,560
4.	X17H8	17,64	7,62	0,563	1,132
5.	X16H15	16,37	14,61	0,331	0,460
6.	X21H5	21,36	5,00	4,670	1,355
7.	X21H18	21,36	18,00	0,447	0,49

може змінюватися в широких межах – від декількох годин до декількох років. Руйнування характеризується несподіваністю. На зварних з'єднаннях трубопроводу виявляються численні корозійні тріщини, розташовані як у безпосередній близькості від лінії сплаву, так і на інших ділянках зони термічного впливу шва (рис. 4).

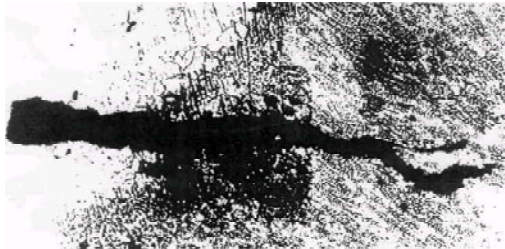


Рис. 4. Корозійне розтріскування зварних з'єднань трубопроводу

Корозійне розтріскування призводить до руйнування труби вздовж лінії сплавлення по шву, що з'єднує метал труби і латки, причому тріщина поширилася на значну відстань в основний метал.

Основний метал труби – хромонікелева сталь типу 12Х18Н10 має високу корозійну стійкість в промислових середовищах сульфатного виробництва целюлози.

Корозійне розтріскування обумовлюється величиною робочого і залишкових напружень у діючих трубопроводах.

Величина напружень, що виникають в стінці труб від робочого тиску, знаходиться на рівні 30–50 МПа. Розташування корозійних тріщин на зварних з'єднаннях труб, знаходиться у відповідності з характером розподілу залишкових напружень. Відзначається локалізація корозійних тріщин в місцях дефектів зварювання та концентраторів напружень (перехід від основного до наплавленого металу, непровари).

Основною причиною корозійного розтріскування зварних трубопроводів є залишкові напруги. Уникнути корозійного розтріскування можна шляхом застосування безшовних труб замість зварних та застосування більш коррозійностійкого матеріалу, а також термічної обробки монтажних стиків для зняття залишкових напруг після зварювання.

4 Технологія виготовлення та ремонту трубопроводів

При виборі труб для виготовлення поживних трубопроводів необхідно, щоб основний метал мав такі властивості:

- 1) висока корозійна стійкість проти загальної і виборчої корозії в промислових середовищах;
- 2) стійкість проти контактної корозії в місцях з'єднання з живильником високого тиску і варильним котлом;
- 3) висока корозійна стійкість до корозійного розтріскування; гарна зварюваність і здатність до деформації у холодному і гарячому стані.

Найкраще зазначеним вимогам відповідають труби з хромонікелевої нержавіючої сталі за ГОСТ 5632-72.

Промисловістю випускається широкий асортимент труб з хромонікелевих нержавіючих сталей.

Структура сталі залежить від співвідношення між основними елементами, що легують – хромом і нікелем.

Аустенітна сталь містить 12–26 % хрому, 8–25 % нікелю, 0,03–0,15 % вуглецю і до 2 % марганцю.

Аустенітно-феритна сталь містить до 30 % хрому, 4–6 % нікелю і не більше 0,10 % вуглецю.

Хром додає нержавіючій сталі високу корозійну стійкість, впливає на мікроструктуру сталі та зварюваність. Нікель забезпечує одержання аустенітної структури, підвищує корозійну стійкість сталі в лужних середовищах, додає сталі в'язкість, пластичність і деформованість в гарячому стані. Високий вміст нікелю ускладнює зварювання внаслідок утворення гарячих тріщин.

Марганець поліпшує оброблюваність сталі в гарячому стані і сприяє утворенню аустенітної структури, але знижує корозійну стійкість. Молібден знижує, а титан і ніобій підвищують корозійну стійкість сталі.

Найбільш широке поширення знаходять сталі 08Х18Н10Т і 12Х18Н10Т.

4.1 Особливості зварювання хромонікелевих нержавіючих сталей

При зварюванні хромонікелевих аустенітних нержавіючих сталей не можна допускати перегрів і багаторазовий нагрів зварних з'єднань. Зварювання необхідно виконувати при найменшій погонній енергії та з максимально можливою швидкістю.

Низька теплопровідність аустенітних сталей обумовлює велике короблення зварних конструкцій і сприяє створенню в стиках труб значних залишкових напруг, тому необхідно прагнути до одностороннього зварювання швами симетричного перерізу при наскрізному проплавленні кромки. Для зменшення залишкових деформацій і механічних напруг, а також для уникнення гарячих (кристалізаційних) тріщин електродугове зварювання аустенітних сталей необхідно здійснювати при малих токах електродами діаметром не більше 4 мм. Ретельно заварювати кратер при обриві дуги, застосувати раціональне розділення кромки. Шви виконувати у вигляді валиків малого перетину.

Оскільки зварні трубопроводи працюють в умовах впливу агресивного середовища, важливо забезпечити сталість фазового та хімічного складу шва. Корозійна стійкість зварних з'єднань аустенітних сталей великою мірою залежить від стану їх поверхні. Необхідно забезпечувати шви з гладкою малолускатою поверхнею, наскрізним рівномірним проплавленням кореня шва і плавним переходом від основного до наплавленого металів. В іншому випадку всі нерівності можуть послужити осередком виборчої корозії або концентратором напружень при корозійному розтріскуванні. Не

можна допускати пошкодження поверхні сталі і зварних швів.

Категорично забороняється порушувати дугу на основному металі труби, а не на шві.

Необхідно забезпечити щільний контакт при кріпленні зварювального кабелю до труби, щоб уникнути підгоряння і підплавлення аустенітної сталі, що може призвести до виникнення осередків корозії. З цієї ж причини слід вживати заходи проти попадання бризок присадного металу на основний метал труби.

Підгонка і правка труб з аустенітної сталі в холодному стані не рекомендується, оскільки далі це може послужити причиною корозійного розтріскування наклепаних ділянок. Для зняття наклепа і залишкових напружень необхідно проводити термічну обробку зварних стиків – аустенізацію нагріванням до температури 1050–1100 °С.

Одним з найбільш дієвих методів боротьби з гарячими тріщинами є застосування електродів, що дають наплавлений метал з дельта-феритом в структурі шва. Однак при контакті з агресивними промисловими середовищами целюлозно-паперового виробництва шви з дельта-феритом піддаються вибіркової корозії. Тому вміст дельта-фериту в зварних швах поживних трубопроводів повинен бути виключеним або обмеженим. Це досягається раціональним вибором електродів для зварювання та наступною термічною обробкою зварних стиків.

При дуговому зварюванні дуже важливо дотримувати коротку дугу, при цьому зменшуються окислення хрому і азотизація зварюваної ванни, що сприятливо впливає на стійкість шва проти тріщин.

Дугове зварювання якісними електродами – найбільш маневрений і зручний засіб в умовах монтажу або ремонту трубопроводів. Зварювання неплав-

ким вольфрамовим електродом в середовищі аргону рекомендується для виконання кореневого шва в обробленні труб. При цьому найбільш легко забезпечити повне проплавлення кореня шва і хороше формування зворотного валика при зварюванні на вазі, без підкладних кілець.

Вибір електродів для зварювання труб з аустенітних хромонікелевих сталей має особливе значення у зв'язку з тим, що наплавлений метал зварних швів у технологічних середовищах піддається виборчій корозії.

Для зварювання сталей типу 12Х18Н10Т розроблено велику кількість однотипних електродів [8, 10]. Основні відомості про електроди для зварювання аустенітних сталей, хімічний склад і механічні властивості наплавленого металу наведені в табл. 3–5.

Стосовно умов роботи поживних трубопроводів зі сталі 12Х18Н10Т, найбільш раціонально застосовувати електроди типу ЕА-1Б (ЦЛ-11, ОЗЛ-7) (табл. 3–5). Метал, що наплавлений цими електродами, і зварні з'єднання мають високу корозійну стійкість як в лужних, так і в кислотних розчинах (5 %-ний НСl, 65 %-ний HNO₃) (табл. 6), а також в реальних експлуатаційних умовах (табл. 7).

Електроди типу ЕА-1М2 (ЦЛ-4, ЕА-400/10У) дають наплавлений метал з низькою загальною корозійною стійкістю в лужних розчинах і особливо низькою стійкістю проти виборчої корозії, що пов'язано з присутністю в наплавленому металі молібдену.

Для зварювання труб, що експлуатуються при підвищених швидкостях потоку, високих температурах та концентраціях луку, можна застосовувати електроди типу ЕА-2Б (ЦЛ-9, ОЗЛ-8), які забезпечують у наплавленому металі підвищений вміст нікелю, або електроди типу ЕА-2Г6 (АНВ-17, ОЗЛ-9А), що дають чистоаустенітний наплавлений метал.

Таблиця 3 – Марки та типи електродів для зварювання корозійностійких сталей

Марка електроду	Тип електроду	Марка зварювального дроту	Склад наплавленого металу		
			за маркою сталі	за вмістом фериту, %	
ОЗЛ-14	ЭА-1	Св-02Х19Н9	04Х20Н9	04Х20Н9	6–10
ОЗЛ-8	ЭА-1а	Св-04Х19Н9	08Х19Н9С	12Х20Н9Б	3,5–8,5
Л-39	ЭА-1а	Св-06Х19Н9Т	09Х19Н9СБ	08Х20Н9Б	2,5–7,0
ЦЛ-11	ЭА-1Б	Св-08Х19Н10Б	08Х19Н9СБ	09Х19Н9Б	2,5–7,0
Л-38М	ЭА-1Б	Св-08Х19Н10Б	09Х19Н10Б		3,0–5,0
ОЗЛ-7	ЭА-1Б	Св-02Х19Н9	07Х18Н10М3Ф		5,0–10
Л-40М	ЭА-1Б	Св-04Х19Н9	08Х19Н9М2		2,5–5,0
ЦТ-15	ЭА-1Ба	Св-08Х19Н10Б	07Х18Н10М2Б		2,5–4,5
ЗИО-3	ЭА-1Ба	Св-08Х19Н10Б	08Х19Н10М2Б		2,0–5,0
ЭА-400/10У ЦЛ-4	ЭА-1М2	Св-4Х19Н11М3	12Х21Н11Б	07Х24Н12	5,0–12,0
НЖ-13	ЭА-1М2	Св-06Х19Н9Т	20Х25Н16Г7		2,5–10
ЭА-606/11 ЦЛ-9	ЭА-1М2Б	Св-4Х19Н11М3	20Х25Н16Г7		4,0–8,0
ЗИО-8	1М2Б ЭА-2Б	Св-4Х19Н11М3			2,0–8,0
ОЗЛ-9А АНВ-17	ЭА-2	Св-07Х25Н13			>2,5
	ЭА-2Г6	Св-07Х25Н13			2,5–5,0
	ЭА-2Г6	Св-25Х25Н16Г7			Немає
		Св-25Х25Н16Г7			»

Таблиця 4 – Механічні властивості наплавленого металу

Марка електроду	σ_s , МПа	σ_b , МПа	δ , %	φ , %	КСУ, $\frac{Дж}{см^2}$	φ , град
ОЗЛ-8	350	600	36	30	12	180
ЦЛ-11	360	600	24	60	7	–
ЗИО-3	–	600	24	–	7	180
ЕА-400/10У	350	550	25	–	9	160
НЖ-13	450	600	26	–	10	–

Таблиця 5 – Хімічний склад наплавленого металу

Марка електроду	Вміст хімічних елементів, %							
	С	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Інші елементи
				не більше				
ОЗЛ-14	0,04	1,50	0,9	0,020	0,030	20,5	8,8	–
ОЗЛ-8	0,08	1,40	0,6	0,020	0,030	20,0	9,8	–
Л-39	0,08	1,95	1,1	0,012	0,012	18,5	8,5	–
ЦЛ-11	0,12	1,60	1,0	0,020	0,030	20,0	9,5	1,0 Nb
Л-38Л	0,09	1,30	1,4	0,012	0,020	18,5	8,5	1,0 Nb
ОЗЛ-7	0,08	1,50	0,85	0,020	0,030	20,0	9,0	0,95 Nb
Л-40М	0,08	1,30	1,2	0,012	0,020	18,5	8,5	0,90 Nb
ЦТ-15	0,09	1,90	0,35	0,014	0,026	19,0	9,4	0,80 Nb
ЗИО-3	0,09	1,80	0,55	0,035	0,035	18,5	10,0	0,90 Nb
ЕА-400/10У	0,07	2,40	0,48	0,025	0,025	18,0	10,5	2,5 Mo; 0,5 V
ЦЛ-4	0,08	2,0	0,50	0,020	0,030	18,5	9,2	2,3 Mo
НЖ-13	0,07	1,4	0,80	0,020	0,035	18,2	10,2	2,4 Mo; 0,8 Nb
ЕА-606/11	0,08	1,2	1,3	0,016	0,010	18,0	8,6	2,0 V
ЦЛ-9	0,12	1,6	0,65	0,035	0,035	21,0	11,2	0,8 Nb
ЗИО-8	0,07	1,9	0,55	0,035	0,035	24,0	12,6	–
АНВ-17	0,22	6,5	0,35	0,020	0,035	24,5	16,0	–

Таблиця 6 – Корозійна стійкість наплавленого металу

Марка електроду	Швидкість корозії в розчинах, г/(м ² год)			Марка електроду	Швидкість корозії в розчинах, г/(м ² год)		
	30 % NaOH	5 % HCl	65 % HNO ₃		30 % NaOH	5 % HCl	65 % HNO ₃
ОЗЛ-8	0,690	15,555	0,783	ЕА-606/11	1,07	52,394	9,470
ЦЛ-11	0,590	20,644	0,556	ЦЛ-9	0,127	31,627	0,405
ЦТ-15	0,451	22,040	0,434	АНВ-17	0,048	0,111	0,555
ЕА-400/10У	0,690	3,542	3,090	ОЗЛ-9А	0,017	8,525	1,250
ЦЛ-4	1,800	4,329	5,660	ЭА-395/5	0,020	0,123	4,40
НЖ-13	0,293	9,016	1,490				

Таблиця 7 – Корозійна стійкість зразків основного і наплавленого металу при натурних випробуваннях

Метал (марка електроду)	Швидкість корозії г/(м ² год)
Сталь 12Х18Н10Т	0,0253
наплавлений метал	
08Х20Н9 (ОЗЛ – 8)	0,0214
12Х20Н9Г2Б (ЦЛ – 11)	0,0109
09Х19Н10Г2Б (ЗИО – 3)	0,0175
07Х18Н10М2Б (НЖ – 13)	0,0118
10Х25Н13Г2 (ОЗЛ – 6)	0,0093

4.2 Технологія підготовки та зварювання

Різання труб з аустенітних сталей можна здійснювати електродуговим, повітрянодуговим або плазмодуговим способами з подальшою механічною обробкою обрізаного кінця на довжину 10–15 мм з метою повного видалення металу, який було піддано термічному впливу.

Зняття фасок на торцях труб товщиною до 10 мм можна виконувати абразивними колами за допомогою електрошліфувальних машинок.

Обробляти кромки труб великої товщини під зварювання необхідно на токарному верстаті.

Для очищення кромок і прилеглих до них поверхонь труб від іржі та інших забруднень застосовують також фіброві диски з абразивним порошком і сталеві щітки, які насаджені на вал пневмодрелі або електрошліфувальної машинки.

Для отримання зварних з'єднань високої якості особливо увагу слід приділяти правильній стиковці труб по внутрішньому діаметру.

Стики трубопроводів збираються в пристроях і прихватуються в декількох місцях по колу. Кількість прихваток залежить від діаметру. Для труб діаметрами 273 та 325 мм виконується три-чотири прихватки.

Прихваточні шви повинні розташовуватися на рівній відстані один від одного таким чином, щоб витримати однаковий зазор по всьому колу стику. Довжина прихваточного шва повинна становити 25–30 мм, а висота прихватки 5–6 мм при повному проварі кореня шва.

Збірка стиків труб під зварювання повинна виконуватись без натягу труб при розташуванні осей на одній прямій. Різностінність або зміщення кромок з'єднуваних елементів не повинні перевищувати 10 % від товщини труби.

При складанні стиків необхідно передбачити установку тимчасових опор або підвісок на відстані не більше 1 м від стиків, щоб виключити провисання труб і розвантажити стик при зварюванні та термообробці.

Не можна розташовувати зварні шви на гнутих ділянках труб. Відстань від початку вигину труби до зварного шва повинна бути не менше 100 мм.

Згини бажано термічно обробити з метою зняття залишкових напруг.

До труб не рекомендується приварювати стяжні упори, скоби й інші пристосування для складання, тому що це може призвести до виборчої корозії або корозійного розтріскування основного металу в процесі експлуатації трубопроводу.

До якості прихваток необхідно пред'являти такі ж високі вимоги, як і до основного шву. Особливо важливо, щоб прихватка виконувалася тими ж типами і марками електродів, що й основний шов, і з повним проваром нижньої кромки.

Перед складанням кромки та прилеглі до них поверхні на ширині 10–15 мм від шва потрібно ретельно очистити від бруду, жиру й окалини.

Зварювання труб з хромонікелевих аустенітних сталей типу 12Х18Н10Т здійснюють електродами типу ЕА-1Б марок ЦЛ-11, ОЗЛ-8, ЦТ-15, діаметром 2–4 мм. Зварювання цими електродами виконується на постійному струмі зворотної полярності і може виконуватись у всіх просторових положеннях.

Кореневий шар шва виконується ручним аргонодуговим зварюванням вольфрамовим електродом, або ручним зварюванням якісним електродом на видаленому мідному кільці.

Аргоно-дугове зварювання вольфрамовим електродом здійснюється постійним струмом прямої полярності. Рекомендується використовувати аргон марок Б і В за ГОСТ 10157-73.

При зварюванні на підкладному мідному кільці накладення кореневого шва здійснюється електродами типу ЕА-1Б (ЦЛ-11 та ін) діаметром 3 мм.

Всі перетини стику заповнюються електродами діаметром 3 і 4 мм при наступних режимах: для електродів діаметром 3 мм – не більше 90–100 А; для електродів діаметром 4 мм – не більше 110–130 А.

Зварювання ведеться на гранично короткій дузі. Перед зміною електрода кратер заповнюється шляхом декількох закорочень електрода, а місце обриву дуги виводиться на шов.

Подальше запалювання дуги здійснюється на металі шва на відстані 10–15 мм від кратера. Зварні шви виконуються вузькими валиками без значних коливань електродом. Накладення кожного наступного валика повинно проводитися тільки після охолодження шва до 60–70 °С і ретельного очищення попереднього шару від шлакової кірки та бризок металу.

Для прискорення охолодження трубних стиків їх обдувку можна проводити зсередини стисненим повітрям. Початок і кінець валиків зварного шва повинні перекривати один одного на 15–20 мм.

4.3 Контроль якості зварних стиків трубопроводу

Якість зварних швів поживних трубопроводів перевіряється шляхом:

а) систематичного контролю якості підготовки кромок, складання під зварювання, правильності виконання технології зварювання;

б) зовнішнього огляду зварних швів всіх стиків для виявлення зовнішніх дефектів і відступів від нормальних розмірів шва;

в) застосуванням одного з неруйнівних методів контролю ультразвукової дефектоскопії, рентгено- або гамма-просвічування.

Перед оглядом стики очищують від шлаку та бризок металу. Якщо здійснюється термічна обробка стиків, то зовнішній огляд роблять до та після її проведення, тому що при нагріванні і подальшому охолодженні дефекти можуть розкритися або виникнути.

Не допускаються зовнішні дефекти у вигляді незаплавлених кратерів, пористості, тріщин, напливів, підрізів. Перехід від наплавленого до основного металу має бути плавним.

Контролю за допомогою ультразвукової дефектоскопії, рентгено- або гамма-просвічування підлягають стики в кількості 10 % від загального числа зварених кожним зварником, але не менше одного стика на кожного зварника.

Зварні шви вважаються бракованими, якщо в них будуть виявлені тріщини будь-яких розмірів, непровар більше 15 % від товщини стінки, шлакові включення і пори розміром більше 10 % від товщини стінки або скупчення шлакових включень і пір сумарною протяжністю понад 20 % довжини шва незалежно від їх розмірів.

Неприпустимі дефекти слід усувати шляхом вирубки з подальшою заваркою дефектного місця. Стики з тріщинами повинні бути повністю видалені. Якщо на місце вирізаного стика вварюється вставка, то її довжина повинна бути не менше 100 мм для трубопроводів з умовним проходом до 150 мм і не менше 200 мм для трубопроводів з умовним проходом понад 150 мм.

4.4 Термічна обробка зварних стиків трубопроводу

Термічна обробка зварних з'єднань аустенітних хромонікелевих сталей здійснюється нагріванням до температури аустенізації 1050–1100 °С, при витримці протягом 1 год і наступному охолодженні на спокійному повітрі. Правильно виконана термічна обробка на 80 % знижує залишкові напруження в зварних стиках і призводить до повної аустенізації металу зварних швів, які виконані електродами типу ЕА-1Б (ЦЛ-11, ОЗЛ-7 та ін.)

Важливе значення має дотримання режиму термічної обробки. Нагрівання в діапазоні температур 20–550 °С слід вести зі швидкістю 10–15 °С за хвилину з тим, щоб зменшити величину термічних напружень, викликаних перепадом температур по товщині стінки труби. В інтервалі температур від 550 до 1100 °С нагрівання потрібно проводити зі швидкістю 20–30 °С за хвилину.

Витримка при температурі 1050–1100 °С визначає структурний стан металу: недогрів не забезпечить отримання однорідної аустенітної структури, а перегрів викличе зростання зерна в металі шва і біляшовній зоні і погіршення корозійно-механічних властивостей зварного з'єднання.

Охолоджувати зварне з'єднання необхідно на спокійному повітрі. Можна використовувати для охолодження стисле повітря або воду. Уповільнене охолодження сприяє виділенню карбідів хрому.

При проведенні термічної обробки необхідно забезпечити вільне теплове переміщення труби в осьовому напрямку і виключити дію бічних навантажень при нагріванні та охолодженні зварних стиків.

В умовах монтажу і ремонту поживних трубопроводів термічну обробку стиків труб можна проводити індукційними нагрівачами, електричними муфельними печами опору, кільцевими багатополум'яними пальниками [9].

Як джерела живлення можна застосовувати зварувальні трансформатори ТДМ-501, СТШ-500, ТДФ-1001 та ін. Номінальна потужність джерела живлення має

на 20–30 % перевищувати споживану потужність електропечі. За потреби джерела живлення включають на паралельну роботу.

При установці печі на трубу необхідно стежити за тим, щоб зварний шов розташовувався точно посередині муфеля. Рівномірний нагрів поперечних стиків при вертикальному розташуванні вісей труб забезпечується при концентричному розташуванні муфельної печі.

Для зниження тепловтрат ділянки труб, що примикають до печі, повинні бути ізольовані азбестом на довжині 200–300 мм по кожну сторону від печі.

Нагрівання зварного стика рекомендується починати при робочому струмі, що становить приблизно 50 % від номінального значення, з поступовим плавним його збільшенням до номінального. Цим забезпечується задана швидкість нагріву і поліпшуються умови експлуатації нагрівальних елементів. Подальше регулювання струму і керування процесом нагрівання здійснюється відповідно до режиму термічної обробки і свідченнями контрольних приладів.

Поряд з електричними муфельними печами можна використовувати печі панельного типу, патронташного, з гнучкою основою.

Недолік електропечей – їх мала довговічність і односторонній підхід тепла з зовнішньої сторони труби.

Найбільш досконалим способом термічної обробки стиків є індукційний нагрів струмами підвищеної частоти, який забезпечує рівномірне прогрівання труби по перерізу з високою швидкістю при невеликій масі нагрівача. Індукційний спосіб термообробки зварних стиків може бути використаний при наявності на підприємстві машинних перетворювачів підвищеної частоти потужністю до 100 кВт з частотою тока 2500 Гц.

Як нагрівач застосовуються переносні гнучкі і жорсткі індуктори. Найбільш зручними і досконалими за конструкцією є жорсткі індуктори, які легко встановлюються на стик і забезпечують рівномірний і швидкий нагрів труби.

Для контролю температури при термічній обробці зварних аустенітних трубопроводів необхідно застосовувати хромель-алюмелеві або платина-платинородієві термопари.

Для вимірювання температури при термічній обробці термопара своїм робочим кінцем кріпиться прямо на зварному шві. Кращим варіантом кріплення є приварювання гарячого спаю термопари до поверхні труби. Можна кріпити термопари до поверхні труби за допомогою бобишек, дужок, гвинтів.

Місце розташування термопари і ступінь ізоляції її робочої ділянки визначаються способом нагрівання при термічній обробці. При електропечному і газоплазмовому нагріванні термопара на довжині 200–300 мм разом з її робочим кінцем має бути захищена азбестовою ізоляцією і металевим куточком.

Вільний кінець (холодний спай) термопари необхідно тримати при постійній температурі. Для цього холодний спай потрібно відвести за допомогою компен-

саційних дротів в зону постійних температур.

Якість проведеної термообробки може бути визначено вимірюванням твердості зовнішньої поверхні зварних швів за допомогою переносних твердомірів, неруйнівними методами контролю і випробуваннями зразків, вирізаних з виробничих або контрольних зварних стиків труб, на статичний і ударний загин по ГОСТ 6996-66. Обсяг цих випробувань не перевищує 1 % від загального числа термооброблених зварних стиків.

На Архангельському ЦПК за технологією, яка розроблена на кафедрі ОТЗВ, були зварені живильні трубопроводи ЖЗ19х12 мм із сталі 12Х18Н10Т на всіх установках безперервного варіння целюлози сульфатним методом.

Зварювання виконували електродами марки ЦЛ-11 (12Х18Н10Г2Б). Після зварювання велика частина зварних стиків була піддана термічній обробці – аустенізації від 1050 ± 25 °С для зняття залишкових напружень за допомогою муфельних печей опору. Трубопроводи знаходяться в експлуатації до теперішнього часу без будь-яких слідів корозійних руйнувань і пошкоджень.

Розроблені технології зварювання та наплавлення неодноразово використовувалися при планових ремонтно-відновлювальних роботах на двох котлах продуктивністю 300 т на добу на Сиктивкарському лісопромисловому комплексі протягом 1983–1991 рр. Для зняття напружень застосовували стабілізуючий отпуск при температурі 880–900 °С після виконання зварювальних робіт [6]. Періодичні обстеження котлів показали високу корозійну стійкість наплавленого металу і зварних з'єднань.

Висновки

1. Обладнання зі сталі 12Х18Н10Т, що експлуатуються у лужному середовищі целюлозно-паперового виробництва може піддаватися корозійному руйнуванню по зварних з'єднаннях: виборчій корозії металу шва і корозійному розтріскуванню.

2. Причиною виходу з ладу живильного трубопроводу після 5 років експлуатації з'явилася наявність залишкових напружень і порушення технології зварювання.

3. Корозія зварних з'єднань сталі 12Х18Н10Т у «білому лузі» походить з пасивної області, про що свідчить як характер руйнування – корозійне розтріскування, так

і результати електрохімічних досліджень основного металу і металу зварних з'єднань.

4. Правильний вибір стандартних електродів і технології зварювання трубопроводів та відновлювального ремонту варильних котлів забезпечує високу корозійну стійкість металу шва і зварних з'єднань.

5. Корозійне розтріскування зварних з'єднань сталі 12Х18Н10Т в лужних розчинах може бути припинено шляхом термічної обробки – аустенізації від температур 1050 ± 50 °С, або стабілізуючого отпуску при 880–900 °С.

Список літератури

1. Стеклов О. И. Коррозионное растрескивание сварных соединений стали Х18Н10Т / Стеклов О. И., Бадаев А. С. – М. : Машиностроение, 1970. – 66 с.
2. Сакаи Т. Коррозия сплава Fe-Cr-Ni в концентрированном растворе едкого натра при высокой температуре / Сакаи Т., Симидзу Е., Сакияма К. // Нихон киндзоку таккайси, 1980. – Т. 44. – № 5. – С. 582–587.
3. Фокин М. Н. О некоторых особенностях электрохимического поведения нержавеющей сталей в растворах NaOH / Фокин М. Н., Журавлёв В. К., Мосолов А. В. // Защита металлов. – 1978. – Т. 14. – № 6. – С. 690–693.
4. Yasuda M. Corrosion Behavior of 18-8 stainless steels in hot concentrated caustic soda solutions under heat / Yasuda M., Tokunada S., Hine F. // Transfer conditions / Corrosion-NACE. – 1985. – Vol. 41. – P. 720–727.
5. Александров А. Г. Коррозионная стойкость сварных соединений хромоникелевых сталей в щелочных средах / Александров А. Г. // Сварочное производство. – 1990. – № 5. – С. 9–10.
6. Ремонт варочных котлов сульфатно-целлюлозного производства Сыктывкарского ЛПК / А. Г. Александров, Ю. Н. Савонов, А. Ф. Степакин и др. // Бумажная промышленность. – 1986. – № 12. – С. 6–12.
7. Духан Э. Т. Трубы из нержавеющей стали / Духан Э. Т. – К. : Техника, 1970. – 199 с.
8. Электроды для дуговой сварки и наплавки. Каталог. – К. : Наукова думка, 1967 – 440 с.
9. Хромченко Ф. А. Термическая обработка сварных соединений труб электростанций. – М. : Машиностроение, 1972 – 224 с.
10. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / под ред. Б. Е. Патон. – М. : Машиностроение, 1974 – 768 с.

Одержано 27.04.2018

Савонов Ю.Н., Александров А.Г., Осипов М.Ю., Андрущенко М.И. Коррозионная стойкость и срок службы оборудования, эксплуатируемого в агрессивных средах

Цель работы. Разработка технологического процесса сварки и контроля качества трубопроводов для повышения надежности работы и срока их службы в агрессивных средах.

Методы исследования. Результаты получены с применением электрохимических исследований наплавленного металла и сварных швов нержавеющей сталей, металлографического анализа микроструктур разрушенных участков реальных трубопроводов.

Полученные результаты. Исследовано коррозионное поведение сварных швов оборудования из нержавеющей стали 12Х18Н10Т в щелочных растворах. Рассмотрены основные виды коррозионного повреждения сварного оборудования в агрессивных средах. Приведены сварочные материалы, обеспечивающие высокую коррозионную стойкость наплавленного металла сварных швов.

Научная новизна. Оборудование из стали 12X18H10T, которое эксплуатируется в щелочных средах, может подвергаться коррозионному разрушению по сварным соединениям: избирательной коррозии металла шва и коррозионному растрескиванию. Электрохимические исследования показали, что коррозия сварных соединений стали 12X18H10T в щелочных растворах проходит в пассивной области, поэтому основным видом разрушений является коррозионное растрескивание, обусловленное наличием остаточных напряжений.

Практическая ценность. На основе проведенного анализа характера разрушений выбраны сварочные материалы, рекомендованы режимы выполнения сварных соединений, а также методика последующей термической обработки сварных швов с целью снятия остаточных напряжений и увеличения срока службы технологического оборудования.

Ключевые слова: сварное соединение, сталь 12X18H10T, коррозионное растрескивание, термическая обработка, наплавленный металл.

Savonov Yu., Aleksandrov A., Osipov M., Andruschenko M. Current stability and term business of the equipment operated in luxury solutions

Purpose. Development of the welding process and quality control of pipelines to increase the reliability of work and their service life in corrosive environments.

Research methods. The results were obtained using electrochemical studies of the weld metal and welds of stainless steels, metallographic analysis of the microstructures of the destroyed sections of real pipelines.

Results. Corrosion behavior of welds of equipment made of stainless steel 12X18H10T in alkaline solutions are studied. The main types of corrosion damage to welded equipment in corrosive environments are considered. The welding materials that provide high corrosion resistance of hard faced weld metal are given.

Scientific novelty. Equipment made of steel 12X18H10T, which is operated in alkaline environments, can be subjected to corrosion damage along welded joints: selective corrosion of the weld metal and corrosion cracking. Electrochemical studies have shown that corrosion of welded joints of steel 12X18H10T in alkaline solutions takes place in the passive area, therefore, the main type of damage is corrosion cracking due to the presence of residual stresses.

Practical value. Based on the analysis of the nature of the damage, welding materials were selected, performance modes for welded joints were recommended, as well as methods for subsequent heat treatment of welds in order to relieve residual stresses and increase the service life of process equipment.

Key words: welded joint, steel 12X18H10T, corrosion cracking, heat treatment, weld metal.
