

ДОСЛІДЖЕННЯ КОРОЗІЙНОЇ СТІЙКОСТІ ЗВАРНИХ МЕТАЛОРУКАВІВ ЗІ СТАЛЕЙ AISI 304 ТА AISI 316

Н. А. Солідор

Кандидат технічних наук, доцент*

E-mail: solidor@rambler.ru

В. П. Іванов

Кандидат технічних наук, доцент**

E-mail: ivanov_v_p@pstu.edu

Ф. В. Моргай

Аспірант**

E-mail: fedor_morgay@ukr.net

Б. І. Носовський

Кандидат технічних наук, доцент**

E-mail: nosovskiy_b_i@pstu.edu

*Кафедра матеріалознавства***

**Кафедра обладнання

та технології зварювального виробництва***

***ДВНЗ «Приазовський

державний технічний університет»

вул. Університетська, 7,

м. Маріуполь, Донецька обл., Україна, 87500

В роботі встановлені причини прискореної корозії і руйнування металорукавів для транспортування природного газу, що виготовляються з неіржавіючих сталей. Встановлено неоднозначний вплив ступеня деформації на схильність до корозійного руйнування аустенітних сталей, показана ефективність застосування термічної обробки сталей AISI 304 і AISI 316 для підвищення їх корозійної стійкості

Ключові слова: металеві рукава, корозійна стійкість, пітинги, деформація, макроструктура, аустеніт, термічна обробка

В работе установлены причины ускоренной коррозии и разрушения металлорукавов для транспортировки природного газа, изготовляемых из нержавеющей сталей. Установлено неоднозначное влияние степени деформации на склонность к коррозионному разрушению аустенитных сталей, показана эффективность применения термической обработки сталей AISI 304 и AISI 316 для повышения их коррозионной стойкости

Ключевые слова: металлические рукава, коррозионная стойкость, питтинги, деформация, макроструктура, аустенит, термическая обработка

1. Вступ

Ресурсозбереження, а також підвищення терміну служби деталей, що виходять з ладу внаслідок корозійного руйнування, відносяться до числа найважливіших проблем сучасної промисловості. Витрати на ремонт та виготовлення нових деталей замість передчасно списаних становить одну з найбільших статей витрат у бюджеті.

Вельми актуальною проблемою експлуатації зварних металевих рукавів для транспортування природного газу є прискорена корозія, яка за певних умов може вже відбуватися на стадії їх зберігання. В значній мірі на цей процес впливає склад та вологість повітряного середовища в складському приміщенні.

У випадку наявності в атмосфері складського приміщення підвищеного вмісту солей та вологості у впадинах гофр металорукавів відбувається осідання конденсату, що підсилює корозію виробів. У зв'язку з вищевикладеним представляє практичний інтерес вивчення причин прискореної корозії і руйнування рукавів металевих зі сталей AISI 304 і AISI 316 та можливість їх попередження. При цьому, суттєву економію енергоносіїв можливо забезпечити шляхом впровадження нових режимів термічної обробки, оскільки одними з найбільш вірогідних причин прояву місцевої корозії розглянутих виробів є неоднорідний напруже-

ний стан і склад корозійного середовища. У зв'язку з цим, для значного підвищення корозійної стійкості сталей при відносно невисоких витратах актуальною є розробка раціональних режимів термічної обробки.

2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Відомо, що особливістю аустенітних хромонікелевих сталей є їх схильність до пітингової корозії. Виразкова корозія виникає у випадках, коли оксидна плівка втрачає свою міцність і, відповідно, не здатна попередити дію середовища, що чиниться на матеріал. Результатом подібного впливу може бути локальне пошкодження оксидної плівки, і, як результат, можливість корозійної атаки. Так, авторами роботи [1] розглянута кінетика руйнування аустенітної неіржавіючої сталі UNS S30400 у водному розчині аміаку при температурі 260 °С за допомогою хімічного видалення оксидів, у [2] відмічена важлива роль впливу продуктів корозійного руйнування на швидкість росту пітингів аустенітної сталі SUS304 у розчині хлориду натрію. Проте дані щодо впливу термічної обробки неіржавіючих аустенітних сталей на схильність до пітингової корозії в цих середовищах відсутні.

Проведені в роботі [3] дослідження показали, що тиск при пресуванні зразків зі сталей 304 і 316L та атр

мосфера спікання впливають на їх корозійну стійкість, при цьому пітингостійкість вище у сталі 316L при більш високій щільності пресування з подальшим спіканням як у вакуумі, так і в азотно-водневій атмосфері. Авторами показано, що подальше старіння зразків при температурах 675 і 875 °С сприяє зниженню пасивності металу, проте сприйнятливість до точкової корозії майже не змінюється. Між тим, старіння при температурі 375 °С приводить до підвищення пітингостійкості сталей, що пов'язують з наявністю в структурі пластинчастої складової, яка з'являється в деяких зразках, спечених в азотно-водневій атмосфері. Авторами описана роль азоту у зразках, спечених в атмосфері азоту і водню, та її зв'язок з особливостями мікроструктури. Проте більшість металовиробів з аустенітних сталей виготовляється не за допомогою спікання, а шляхом пластичного деформування. Саме тому вивчення впливу різних режимів термічної обробки деформованих виробів є вельми актуальним завданням.

Відомо, що схильність до пітингової корозії аустенітних хромонікелевих сталей зростає в умовах дії іонів хлору (особливо в умовах морського клімату). При цьому показано, що вірогідність виникнення точкової корозії знижується зі зменшення діаметра та товщини металовиробу [4], а більш схильні до корозійного руйнування зразки, що мають більш високу шорсткість [5]. Авторами роботи [6] представлені дослідження щодо зміння поляризаційних кривих та морфології поверхні зразків неіржавіючої сталі 304 у розчині хлориду натрію з застосуванням ультразвуку та без останнього. Показано, що схильність як до точкової, так і до щілинної корозії в значній мірі знижується при застосуванні ультразвуку, що пов'язано зі зниженням концентрації іонів водню і хлору на поверхні, видаленням продуктів корозії та перемішуванням агресивної рідини.

В роботі [7] авторами представлені дослідження щодо впливу деформації та концентрації хлор-іонів на схильність до точкової корозії неіржавіючої сталі 304. Показано, що у відповідності до рівнів напружень 0 %, 10 % і 30 %, коли концентрація хлор-іонів нижче за 463 мг·л⁻¹, 121 мг·л⁻¹ і 98 мг·л⁻¹ відповідно, потенціал точкової корозії зсувається в позитивний бік і пасивна плівка стає більш стабільною. Проте дані дослідження вивчення впливу пластичної деформації на корозійну стійкість сталі AISI 304 обмежуються ступенем деформації 30 %, хоча відомо, що при виготовленні металовиробів матеріали можуть зазнавати більші деформації. Це викликає необхідність проведення подальших досліджень в цьому напрямку.

Неіржавіючі зварні металорукава для транспортування різних середовищ, в тому числі і природного газу, що виготовляються зі сталей марок AISI 304 і AISI 316, поряд з достатніми властивостями міцності повинні володіти відмінною стійкістю до впливу агресивних середовищ природного або техногенного характеру. При цьому, слід звернути увагу на дію у процесі транспортування та зберігання зварних гофрованих труб факторів, під впливом яких у певних умовах деталі схильні до корозії. Це обумовлює необхідність визначення раціональних режимів термічної обробки для цих сталей з метою зменшення і запобігання ризику виникнення корозійного руйнування і зменшення матеріальних та енерговитрат.

У зв'язку з цим необхідно дослідити вплив ступеня деформації на корозійну стійкість аустенітних сталей AISI 304 і AISI 316 та вплив термічної обробки на корозійну стійкість досліджуваних сталей в різних середовищах.

3. Мета і завдання дослідження

Метою роботи є встановлення причин корозійних пошкоджень рукавів металевих, а також дослідження мікроструктури і властивостей аустенітних сталей AISI 304 і AISI 316 після різних режимів термічної обробки.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні завдання:

– вивчити вплив термічної обробки на структуру та корозійну стійкість аустенітних сталей AISI 304 і AISI 316 в різних агресивних середовищах;

– вивчити вплив ступеня пластичної деформації на корозійну стійкість сталей AISI 304 і AISI 316.

За результатами дослідження розробити рекомендації щодо усунення причин пошкодження зварних металорукавів.

4. Матеріали та методи дослідження впливу термічної обробки і ступеня пластичної деформації на структуру та корозійну стійкість неіржавіючих аустенітних сталей

4.1. Досліджувані матеріали та устаткування, що використовувались в експерименті

В даній роботі представлені результати дослідження макро- і мікроструктури, корозійної зносостійкості аустенітних сталей в залежності від ступеня деформації та режимів їх термічної обробки. Об'єктом дослідження служили сталі AISI 304 і AISI 316 (масові частки елементів): AISI 304 – ≤0,08 % C, ≤0,75 % Si, ≤2,00 Mn, 18,00–20,00 % Cr, 8,00–10,50 % Ni, ≤0,030 % S, ≤0,045 % P; AISI 316 – ≤0,08 % C, ≤0,75 % Si, ≤2,00 % Mn, 16,00–18,00 % Cr, 10,00–14,00 % Ni, 2,00–3,00 % Mo, ≤0,030 % S, ≤0,045 % P.

У дослідженнях використовувався металографічний метод.

Випробування на розтягування з різним ступенем деформації проводили на розривній машині ЗИМ типу УММ-5 (ГОСТ 7855-61). Зразки сталей виготовлялися відповідно до ГОСТ 1497-84. Ступінь деформації зразків становила 20, 40, 60 і 80 %.

4.2. Методика визначення показника опору до корозійного руйнування

Випробування на електрохімічну корозію проводили відповідно до ГОСТ 9.514-99 у 80 %-му розчині сірчаної кислоти (H₂SO₄) і 60 %-му розчині хлориду натрію (NaCl). Основні параметри випробувань: U=3 В, I=1,5 А. Зразки після випробування промивалися водою, піддавалися сушінню, знежиренню і зважуванню. Визначення втрати маси зразків проводилося через кожні 5 хвилин випробувань шляхом їх зважування за допомогою електричних вагів моделі ВЛР-200 (ТУ 25.06.1131-75). Загальний час випробувань становив 10 хвилин.

5. Результати досліджень корозійної стійкості сталей AISI 304 і AISI 316

Одними з найвірогідніших причин прояву місцевої корозії (плями, пітинги, виразки) металевих рукавів є неоднорідний напружений стан і склад корозійного середовища.

Зварні з'єднання металорукавів виконуються за допомогою мікроплазмового зварювання, потім гофруються до необхідного розміру. Характер корозійних пошкоджень і місця їх розташування (далеко від зварного шва та ЗТВ) дозволяють зробити висновок, що при виконанні зварювальних робіт несприятливих змін в металі зварного шва і біляшовної зони не виникає. Пошкодження спостерігаються не по всій поверхні виробу, а в найбільш дефектних зонах з високим рівнем залишкових напружень між ребрами жорсткості (гофрами).

Для імітації умов роботи металорукавів зразки з обох сталей були попередньо гофровані відповідно до методики виготовлення деталей, що використовуються на виробництві. Відомо, що дефектні ділянки кристалів (високо- і малокутові межі зерен, дислокації), електродний потенціал яких занижений, є анодами і руйнуються при корозії. Крім того, несприятлива зміна напруженого стану металу також є фактором, що підсилює вплив корозійного середовища [8].

Після випробувань на електрохімічну корозію в розчині сірчаної кислоти втрата маси деформованих зразків сталі AISI 304 без термічної обробки складала 0,06 г, а сталі AISI 316 – 0,02 г; в сольовому розчині – 0,16 і 0,11 г відповідно.

Одним з ефективних способів зниження рівня внутрішніх напружень в сплавах є термічна обробка. У зв'язку з цим в роботі проводилися дослідження щодо впливу термообробки на корозійну стійкість сталей аустенітного класу AISI 304 і AISI 316 в різних корозійних середовищах.

Вихідна структура сталей AISI 304 і AISI 316 аналогічна і представляє собою аустеніт. На рис. 1 представлена мікроструктура сталі AISI 304.

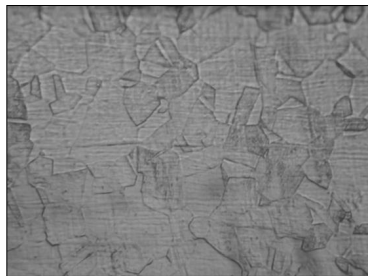


Рис. 1. Мікроструктура сталі AISI 304, $\times 500$

Зразки досліджуваних сталей після деформації піддавалися відпуску в інтервалі температур від 250 до 750 °C з метою зниження внутрішніх напружень (час витримки складав 30 хв.). Після відпуску охолодження проводилося на спокійному повітрі. Всі досліджувані зразки після термічної обробки перевірялися магнітним методом, в результаті якого наявність магнітних фаз не виявлена. Потім зразки піддавалися електрохімічній корозії у 80 %-му водному розчині сірчаної кислоти (H_2SO_4) і 60 %-му водному розчині хлориду натрію ($NaCl$).

В ході досліджень встановлено, що корозійна стійкість зразків обох сталей змінюється неоднозначно. Так, збільшення інтенсивності корозійного руйнування сталей AISI 304 і AISI 316 спостерігалось після відпуску при температурах 350, 650 і 750 °C, а зниження – при 450–550 °C, що підтверджується показниками зміни маси досліджуваних зразків і вивченням їх макроструктури.

Макроструктура досліджених зразків обох сталей після електрохімічної корозії в розчині сірчаної кислоти і сольовому розчині представлена на рис. 2, 3.

Встановлено, що до електрохімічної корозії в меншій мірі схильні зразки сталей AISI 304 і AISI 316 після відпуску при температурі 550 °C. Ймовірно, це пов'язано з тим, що при даній температурі в сталях повністю знімаються внутрішні напруження, отримані в результаті попередньої деформації, і корозія протікає з найменшою швидкістю. При цьому найменшими втратами маси характеризуються зразки сталі з мікродобавками молібдену (AISI 316). Відомо, що молібден робить сталь більш захищеною від пітингової і щілинної корозії в хлористому середовищі, морській воді та в парах оцтової кислоти, оскільки він підвищує потенціал пітингоутворення (E_{pit}) і, відповідно, зменшує швидкість утворення пітингів.

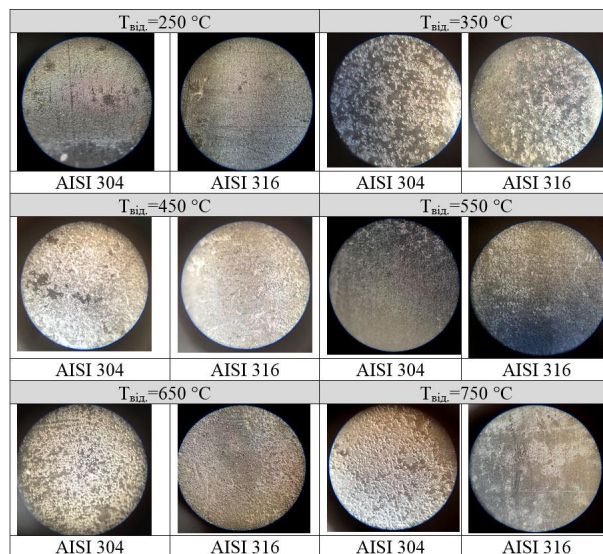


Рис. 2. Макроструктура відпущених при різних температурах зразків досліджених сталей після корозійних випробувань у 80 %-му розчині сірчаної кислоти

Більш низький показник загальної корозії в злегка корозійних середовищах дає гарний корозійний опір у забрудненій і морській атмосфері [9]. Це пов'язано з тим, що молібден стримує виділення карбідів хрому в твердому розчині, знижуючи термодинамічну активність атомів вуглецю і змінюючи поверхневу енергію на межах зерен.

На рис. 4 представлені графіки втрати маси зразків обох сталей в розчині сірчаної кислоти (рис. 4, а) і сольовому розчині (рис. 4, б). Як видно з рис. 4, сталі AISI 304 і AISI 316 характеризуються найменшими втратами маси після відпуску при температурі 550 °C. При цьому на поверхні зразків не виявлено осередків корозійного руйнування.

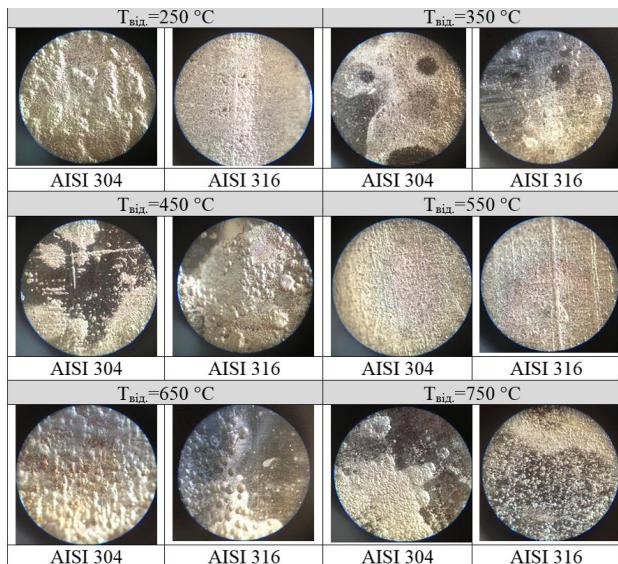


Рис. 3. Макроструктура відпущених при різній температурі зразків досліджених сталей після корозійних випробувань у 60 %-му розчині хлориду натрію

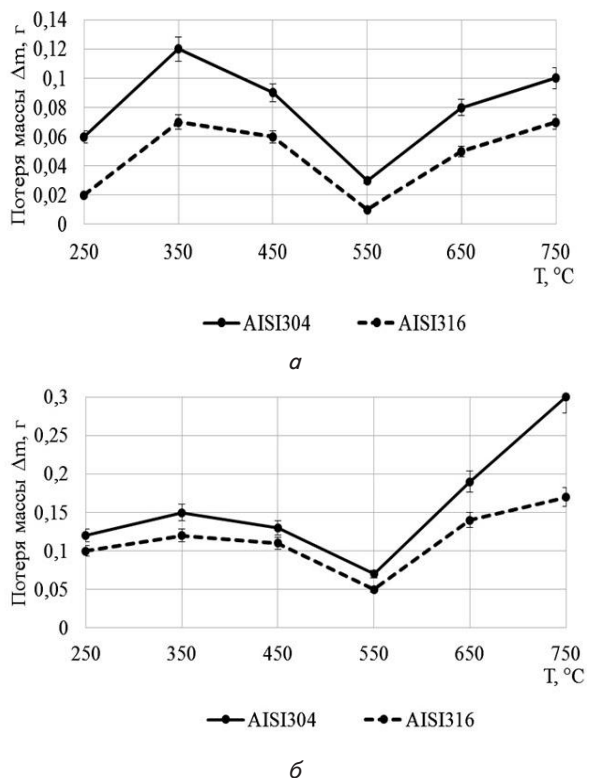


Рис. 4. Залежність втрати маси сталей AISI 304 і AISI 316 після відпуску при різних температурах: а – в розчині сірчаної кислоти; б – в розчині хлориду натрію

Згідно з отриманими даними, з підвищенням температури відпуску з 250 до 350 °C відбувається збільшення швидкості корозії обох сталей, що, імовірно, обумовлено закріпленням дислокацій атомами вуглецю (утворенням атмосфер Коттрелла). Широко відомий той факт, що при зниженні температури концентрація домішок близько дислокації зростає і за досягнення межі розчинності поблизу ядра дисло-

кації можуть утворитися дисперсні виділення другої фази (карбідів) [10]. При цьому на поверхні металу спостерігається утворення великої кількості дрібних роз'єднаних уражень (пітінгів), які в окремих місцях зливаються, утворюючи виразки.

При температурі 450 °C в сталях AISI 304 і AISI 316 починаються процеси розсмоктування атмосфер Коттрелла, а також зниження рівня внутрішніх напружень, що призводить до зменшення втрат маси з 0,12 до 0,09 г і з 0,07 до 0,06 г відповідно. При цьому кількість пітінгів на поверхні зразків різко зменшується.

Збільшення швидкості корозійних процесів досліджених сталей після відпуску при 650–750 °C обумовлено збідненням аустенітної матриці вуглецем і хромом в результаті виділення карбідів $Cr_{23}C_6$, Cr_7C_3 , що викликає утворення прикордонних ділянок зі зниженим електрохімічним потенціалом. Ці фактори інтенсифікують корозійне руйнування на поверхні обох сталей (рис. 4). При цьому на поверхні зразків досліджених сталей чітко видно численні мікропітінги і осередки корозійного руйнування, які більш яскраво виражені у зразків сталі AISI 304. При розшаруванні твердого розчину і виділенні других фаз збіднені хромом межі зерен стають анодами і корозійне руйнування набуває небезпечного міжкристалітного характеру.

При цьому слід зазначити, що найбільш інтенсивно пітінгова корозія досліджених сталей протікає в соловому розчині. Це пов'язано з тим, що аніони Cl^- , ClO_4^- та ін. є активуючими, присутність яких в корозійному середовищі за певних умов викликає появу пітінгової корозії, а аніони SO_4^{2-} та ін. є інгібіторами пітінгової корозії, присутність яких викликає гальмування або повне припинення останньої.

На підставі отриманих даних для металорукавів, що виготовляються зі сталей аустенітного класу AISI 304 і AISI 316, з метою зниження схильності до корозійного руйнування (пітінгової корозії) рекомендується проведення відпуску для зняття внутрішніх напружень при температурі 550 °C протягом 30 хвилин.

Між тим, в умовах підприємства, що виготовляє металеві рукава, маються низькотемпературні печі з максимальною температурою нагріву 250 °C. Крім того, після рекомендованої в роботі термічної обробки при температурі 550 °C колір металовиробів змінюється – стає більш темним та інтенсивним, що вкрай небажано для замовників. У зв'язку з цим, в роботі досліджено вплив часу витримки при низькому відпуску на корозійну стійкість зразків сталі AISI 316, що володіє найбільш високим опором корозійному руйнуванню в порівнянні з AISI 304.

Після випробувань на електрохімічну корозію в соловому розчині втрата маси зразків сталі AISI 316 без термічної обробки склала 0,027 г. Зразки сталі AISI 316 піддавалися відпуску при температурі 200 °C з метою зниження внутрішніх напружень. Витримка при нагріванні становила 30, 60, 90 і 120 хвилин. Після відпуску охолодження проводилося на спокійному повітрі. Всі досліджувані зразки після термічної обробки перевірялися магнітним методом, в результаті якого наявність магнітних фаз не виявлена. Потім зразки піддавалися випробуванню на електрохімічну корозію в 60 %-му водному розчині хлориду натрію (NaCl).

В ході досліджень встановлено, що корозійна стійкість зразків сталі AISI 316 після низького відпуску

ску при різному часі витримки в інтервалі від 30 до 120 хвилин змінюється неоднозначно (рис. 5).

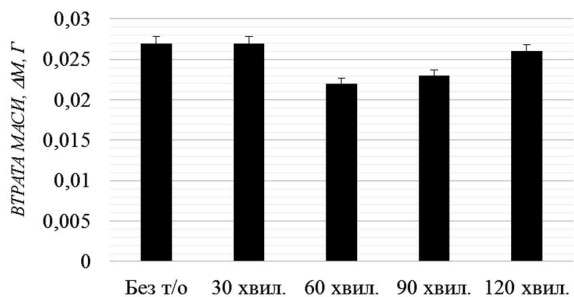


Рис. 5. Вплив часу витримки при низькому відпуску на корозійну стійкість зразків сталі AISI 316 в 60 %-му розчині хлориду натрію

Так, зниження інтенсивності корозійного руйнування сталі AISI 316 спостерігалось при після відпуску при 200 °C протягом 60 хв., а інтенсифікація корозійних процесів – при витримках 90 хв. і більше, що підтверджується показниками зміни маси досліджуваних зразків і вивченням їх макроструктури.

Макроструктура досліджених зразків сталі після електрохімічної корозії в сольовому розчині представлена на рис. 6.

Встановлено, що до електрохімічної корозії в меншій мірі схильні зразки сталі AISI 316 після відпуску при температурі 200 °C ($\tau=60$ хв.). Ймовірно, це пов'язано з тим, що при даних температурі і часі витримки в сталі повністю знімаються внутрішні напруження, отримані в результаті попередньої деформації, і корозія протікає з найменшою швидкістю.

Згідно з отриманими даними, зі збільшенням часу витримки більш ніж 60 хв. відбувається збільшення швидкості корозії дослідженої сталі, що, імовірно, обумовлено підвищенням концентрації домішок біля дислокацій. При цьому по досягненні межі розчинності поблизу ядра дислокації можуть утворитися дисперсні виділення другої фази (карбідів), які є анодами і провокують активізацію корозійних процесів [8]. При цьому на поверхні металу спостерігається утворення великої кількості дрібних роз'єднаних уражень (пітінгів), які в окремих місцях зливаються, утворюючи виразки.

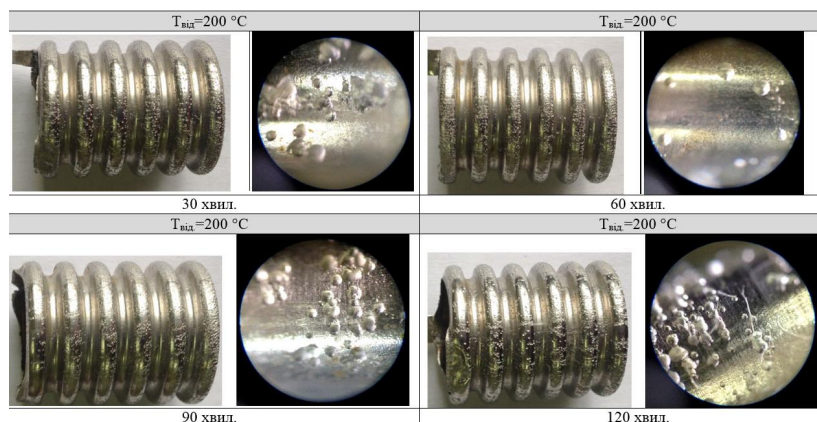


Рис. 6. Макроструктура і загальний вигляд зразків сталі AISI 316, відпущених при температурі 200 °C при різному часі витримки, після корозійних випробувань в 60 %-му розчині хлориду натрію

На підставі отриманих даних для металорукавів, що виготовляються зі сталі аустенітного класу AISI 316, з метою зниження схильності до корозійного руйнування (пітінгової корозії) рекомендується проведення відпуску для зняття внутрішніх напружень при температурі 200 °C протягом 60 хв.

В роботі досліджено вплив пластичної деформації сталей AISI 304 і AISI 316 на їх корозійну стійкість в 60 %-му розчині хлориду натрію, оскільки саме в цьому середовищі електрохімічна корозія обох сталей протікає найбільш інтенсивно.

Попередньо зі штрипсу були вирізані зразки і встановлені в спеціально підготовлені захвати. Після цього зразки встановлювалися у розривну машину і розтягувалися. При цьому ступінь деформації становила 20, 40, 60 і 80 %.

В табл. 1 представлені результати дослідження зміни втрат маси зразків аустенітних сталей в залежності від ступеня деформації.

В ході аналізу результатів досліджень встановлено, що вплив пластичної деформації на корозійну стійкість сталей AISI 304 і AISI 316 неоднозначний.

При малих і середніх ступенях пластичної деформації (20–40 %) має місце посилення початкової анодності меж внаслідок накопичення на них енергії деформації. Внаслідок локального анодного розчинення в зонах корозійно-активних шляхів, наявних в металі ще до прикладення напружень (межі зерен, скупчення дислокацій, пошкодження плівки і т. д.), або виникаючих під дією прикладених напружень (розриви на плівках, концентрація напружень у початкових мікротріщинах), утворюються мікрОВИРАЗКИ, які в результаті спільної дії напружень і корозійного середовища розвиваються в мікротріщини.

Таблиця 1

Вплив ступеня деформації зразків сталей AISI 304 і AISI 316 на їх корозійну стійкість

Ступінь деформації ϵ , %	Втрата маси Δm , г	
	AISI 304	AISI 316
Без деформації	0,16	0,11
20	0,19	0,16
40	0,23	0,19
60	0,20	0,14
80	0,27	0,21

Метал на дні мікрОВИРАЗКИ більш негативний у порівнянні з оточуючим, тому відбувається його переважне розчинення, що сприяє поглибленню мікрОВИРАЗКИ і появи концентрації напружень. Концентрація напружень, у свою чергу, зрушує потенціал металу на дні мікрОВИРАЗКИ в більш негативну сторону, тим самим, сприяючи прискоренню анодного розчинення і збільшенню концентрації напружень до певних критичних значень, коли мікрОВИРАЗКА перетворюється на мікротріщину, здатну перерости у макротріщину.

Подальше збільшення ступеня деформації до 60 % приводить до деконцентрації енергії у зв'язку з тим, що де-

формація захоплює все зерно, що, в кінцевому підсумку, може привести до невеликого підвищення корозійної стійкості.

Зі збільшенням ступеня деформації до 80 % спостерігається збільшення втрат маси зразків досліджених сталей внаслідок підвищення щільності дислокацій і збільшення концентрації напружень II роду, що інтенсифікують розвиток корозійних процесів. Відомо, що зони з підвищеною щільністю дислокацій хімічно активніші у зв'язку з наявністю хмар домішкових і розчинених атомів, що активізує корозійні та сорбційні процеси в цих зонах [8].

Таким чином, при конкретному аналізі, зважаючи на неоднозначний вплив пластичної деформації, необхідно враховувати природу металу і середовища, деформаційно-силову схему, ступінь і умови деформування.

6. Обговорення результатів дослідження впливу режимів термічної обробки і ступеня пластичної деформації на структурні перетворення та корозійну стійкість сталей AISI 304 і AISI 316

Рукава металеві для транспортування природного газу виготовляються за допомогою мікроплазмового зварювання і наступною деформацією в гофру заданого діаметра. Характер корозійних пошкоджень і місця їх розташування (далеко від зварного шва та ЗТВ) дозволяють зробити висновок, що при виконанні зварювальних робіт несприятливих змін в металі зварного шва і біляшовної зони не виникає. Пошкодження спостерігаються не по всій поверхні виробу, а в найбільш дефектних зонах з високим рівнем залишкових напружень – між ребрами жорсткості (гофрами).

Основною причиною пошкодження рукавів металевих з неіржавіючої сталі AISI 304 і AISI 316 є нестійкість цих сталей проти пітингової корозії. Додатковими факторами, які можуть сприяти пітингоутворенню та іншим локальним видам корозії, є виділення карбідів по межах зерен і утворення двійників при виготовленні рукавів, а також умови експлуатації та зберігання.

Відомо [8], що корозійне руйнування металів і сплавів ініціюється утворенням анодних ділянок зі зниженим електрохімічним потенціалом. Місцеві анодні ділянки і корозійно-активні шляхи можна розділити на початкові, які вже є в металі без напруженого стану, і ті, що виникають під дією напруженого стану. До першої групи належать мікроструктурна і хімічна неоднорідності сплаву, межі зерен, дефекти ґратки та структури (дислокації, їх скупчення, мікрозбагачення розчинених атомів на дефектах кристалу), місцеві порушення плівки, початкові мікротріщини. До другої групи – дефекти ґратки у вістря тріщини, мікросегрегації атомів розчиненого компонента на рухомих дефектах ґратки у вістря тріщини, нові корозійно-нестійкі фази, що зароджуються при деформації у вістря тріщини, ділянки під розривами плівки, які утворюються при деформації металу.

Утворення пітингів на поверхні неіржавіючих сталей відбувається, переважно, біля частинок неметалічних включень, насамперед, оксидів і карбідів, а також скупчення дислокацій і дефектах механічної обробки. Пітинг починається із зародження канавки близько включення,

зі збільшенням якої спочатку відбувається відділення, а після і поступове руйнування включення. Поверхня пітингу розчиняється в корозійній середовищі зі швидкістю кілька тисяч моношарів на секунду, на відміну від прилеглої області металу [9]. Слід зазначити, що виразкова корозія надзвичайно небезпечна, оскільки при малих втратах маси метал піддається глибоким ураженням та в короткий термін призводить до наскрізних дефектів.

Одним з ефективних способів зниження рівня внутрішніх напружень в сплавах є термічна обробка. У зв'язку з цим в роботі досліджено вплив відпуску в інтервалі 250–750 °C ($\tau=30$ хв.) на корозійну стійкість сталей аустенітного класу AISI 304 і AISI 316 в різних корозійних середовищах. Встановлено, що корозійна стійкість зразків обох сталей змінюється неоднозначно. Так, максимальна швидкість корозійного руйнування спостерігається в зразках після відпуску при температурах 350, 650 і 750 °C, а мінімальна – при 550 °C. При цьому найменшими втратами маси характеризуються зразки сталі з мікродобавками молібдену (AISI 316). Проте зміна кольору виробів унеможливує проведення такої термообробки. У зв'язку з цим в роботі досліджено вплив відпуску при температурі 200 °C при різному часі витримки в інтервалі 30–120 хв. на корозійну стійкість неіржавіючої сталі аустенітного класу AISI 316 в 60 %-му розчині хлориду натрію. Встановлено, що корозійна стійкість зразків сталі AISI 316 змінюється неоднозначно. Так, мінімальна швидкість корозійного руйнування спостерігається в зразках після низького відпуску при часі витримки 60 хв., а максимальна – при часі витримки 90 хв. і більше. Зниження швидкості корозійного руйнування сталі AISI 316 після проведення відпуску при 200 °C протягом 60 хв. обумовлено зниженням пружно-пластичної неоднорідності металу і зниженням рівня внутрішніх напружень.

Слід зазначити, що запропонований режим термообробки металорукавів зі сталей AISI 304 і AISI 316 підтвердив свою ефективність у виробничих умовах.

У роботі встановлений неоднозначний вплив ступеня деформації на схильність до корозійного руйнування сталей AISI 304 і AISI 316. З одного боку, збільшення ступеня деформації з 20 до 40 %, збільшуючи щільність дислокацій і приховану енергію деформацій WII, збільшує схильність металу як до механічного руйнування, так і, внаслідок підвищення хімічної активності, – до корозійного руйнування. З іншого боку, при даному загальному рівні прихованої енергії деформації імовірність локального руйнування тим більше, чим більше неоднорідність пластичної деформації як у межах зерен, так і міжзеренної [8], тобто, чим більше неоднорідність і концентрація напружень II роду, ймовірність розтріскування тим менше, чим менше неоднорідність, навіть при високій щільності дислокацій ($\epsilon=60$ %).

Перспективним напрямом подальших досліджень є дослідження впливу температури і часу відпуску попередньо деформованих з різним ступенем зразків аустенітних сталей на їх корозійну стійкість в агресивних середовищах, оскільки пошук оптимального режиму термічної обробки металовиробів з неіржавіючих сталей стосовно конкретних умов виготовлення, експлуатації та зберігання є вельми актуальним завданням.

7. Висновки

Проведеними дослідженнями щодо впливу режимів термічної обробки на структуру і корозійну стійкість аустенітних неіржавіючих сталей в різних агресивних середовищах встановлено, що найвищим опором корозійному руйнуванню володіють зразки сталей AISI 304 і AISI 316 після відпуску при температурі 550 °C протягом 30 хв. Проте зміна кольору зразків унеможливає проведення даної термообробки. У зв'язку з цим було досліджено вплив часу витримки в інтервалі 30–120 хв. при низькотемпературному відпуску ($T=200\text{ }^{\circ}\text{C}$) на корозійну стійкість досліджуваних сталей. Встановлено, що мінімальна швидкість корозійного руйнування зразків спостерігається після низькотемпературного відпуску при витримці протягом 60 хв., що обумовлено зниженням пружно-пластичної неоднорідності металу і зниженням рівня внутрішніх напружень.

Встановлений неоднозначний вплив ступеня пластичної деформації на схильність до корозійного руйнування сталей AISI 304 і AISI 316 в розчині хлориду натрію. Показано, що ймовірність корозійного руйнування тим менше, чим менше неоднорідність, навіть при високій щільності дислокацій ($\epsilon=60\%$).

В роботі розроблені рекомендації щодо вибору режиму термічної обробки аустенітних сталей, який забезпечує підвищення їх корозійної стійкості. На підставі проведених досліджень для металорукавів, що виготовляються зі сталей AISI 304 і AISI 316, з метою зниження схильності до корозійного руйнування (пітінгової корозії) рекомендується проведення відпуску для зняття внутрішніх напружень при температурі 200 °C протягом 60 хвилин.

Результати досліджень можуть бути застосовані для підвищення довговічності зварних металевих рукавів, компенсаторів та інших деталей з аустенітних сталей, що виготовляються за допомогою пластичної деформації, на багатьох підприємствах України.

Література

1. Ziemniak, S. E. Corrosion behavior of 304 stainless steel in high temperature, hydrogenated water [Text] / S. E. Ziemniak, M. Hanson // *Corrosion Science*. – 2002. Vol. 44, № 10. – P. 2209–2230. doi:10.1016/s0010-938x(02)00004-5
2. Zhang, Q. Observation by atomic force microscope of corrosion product during pitting corrosion on SUS304 stainless steel [Text] / Q. Zhang, R. Wang, M. Kato, K. Nakasa // *Scripta Materialia*. – 2005. – Vol. 52, № 3. – P. 227–230. doi:10.1016/j.scriptamat.2004.09.024
3. García, C. Pitting corrosion behaviour of PM austenitic stainless steels sintered in nitrogen–hydrogen atmosphere [Text] / C. García, F. Martín, P. de Tiedra, L. G. Cambronerо // *Corrosion Science*. – 2007. – Vol. 49, № 4. – P. 1718–1736. doi:10.1016/j.corsci.2006.10.009
4. Tsutsumi, Y. Pitting corrosion mechanism of Type 304 stainless steel under a droplet of chloride solutions [Text] / Y. Tsutsumi, A. Nishikata, T. Tsuru // *Corrosion Science*. – 2007. – Vol. 49, № 3. – P. 1394–1407. doi:10.1016/j.corsci.2006.08.016
5. Abreu, C. M. Long-term behaviour of AISI 304L passive layer in chloride containing medium [Text] / C. M. Abreu, M. J. Cristóbal, R. Losada, X. R. Nóvoa, G. Pena, M. C. Pérez // *Electrochimica Acta*. – 2006. – Vol. 51, № 8–9. – P. 1881–1890. doi:10.1016/j.electacta.2005.06.040
6. Wang, R. Influence of ultrasound on pitting corrosion and crevice corrosion of SUS304 stainless steel in chloride sodium aqueous solution [Text] / R. Wang // *Corrosion Science*. – 2008. – Vol. 50, № 2. – P. 325–328. doi:10.1016/j.corsci.2007.11.001
7. Lü, G. Effect of Strain and Chloride Concentration on Pitting Susceptibility for Type 304 Austenitic Stainless Steel [Text] / G. Lü, H. Cheng, C. Xu, Z. He // *Chinese Journal of Chemical Engineering*. – 2008. – Vol. 16, № 2. – P. 314–319. doi:10.1016/s1004-9541(08)60080-4
8. Стеклов, О. И. Прочность сварных конструкций в агрессивных средах [Текст] / О. И. Стеклов. – М. : Машиностроение, 1976. – 200 с.
9. Алімов, В. І. Корозія та захист металів від корозії [Текст] / В. І. Алімов, З. А. Дурягіна. – Донецьк-Львів : ТОВ «Східний видавничий дім», 2012. – 328 с.
10. Новиков, И. И. Дефекты кристаллического строения металлов [Текст] / И. И. Новиков. – М. : Металлургия, 1975. – 208 с.