

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет будівництва, архітектури та дизайну
(повне найменування факультету)

Композиційні матеріали, хімія та технології
(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проекту (роботи)

магістр

(ступінь вищої освіти)

на тему **ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ВИРОБІВ З
КОРОЗІЙНОСТІЙКИХ СТАЛЕЙ**

Виконав: студент 2 курсу, групи БАД 222м
Спеціальності 132-Матеріалознавство
(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація) Композиційні
та порошкові матеріали, покриття

Лебедєв Р.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник

Акімов І.В.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

Скребцов А.А.

(прізвище та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»
(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет будівництва, архітектури та дизайну

Кафедра «Композиційні матеріали, хімія та технології»

Ступінь вищої освіти магістр

Спеціальність 132 Матеріалознавство

(код і найменування)

Освітня програма (спеціалізація) Композиційні та порошкові матеріали, покриття

(назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри КМХТ



проф. Мітяєв О.А.

«20» жовтня 2023 року

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)

Лебедев Ростислав Валерійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Підвищення експлуатаційної довговічності виробів з корозійностійких сталей

керівник проекту (роботи) Акімов Іван Васильович, к.т.н., доцент,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від «17» жовтня 2023 року №391

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 18.12.2020

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Корозійностійкі хромисті та хромо-нікелеві сталі.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

1) Вступ.

2) Літературний огляд властивостей та класифікації корозійностійких сталей різних класів.

3) Методичне забезпечення експериментальних досліджень. Опис об'єкта дослідження. Опис методів підвищення фізико-хімічних властивостей сталей. Інші методики досліджень.

4) Опис закономірностей формування структури та рівня антикорозійних властивостей сталей 12X18H10T, 12X17, 30X13. Викладення результатів досліджень та їх висновки.

5) Висновки.

Перелік посилань.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

1) Діаграма стану системи залізо-хром.

2) Фазовий склад хромистих сталей, з 0,1%С.

- 3) Графік впливу нікелю на зміну механічних властивостей 18%-вих хромистих сталей.
- 4) Схема роботи та загальний вигляд лабораторної печі .
- 5) Схема роботи та загальний вигляд твердоміру.
- 6) Схема роботи та загальний вигляд мікротвердоміра ПМТ-3.
- 7) Схема роботи та загальний вигляд металографічного мікроскопа МИМ-8М.
- 8) Мікроструктури сталей марок 30X13, 12X17 та 12X18H10T.

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	Прийняв виконане завдання
1-3	Акімов І.В. к.т.н., доцент		
1-3	Скребцов А.А. к.т.н, доцент		
1-3	Савченко В.О. к.т.н, доцент		
	Перевірка на плагіат. Петрашов О.С.		

7. Дата видачі завдання «20» жовтня 2023 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1)	Літературний огляд властивостей та класифікації корозійностійких сталей різних класів.	30.10.23	
2)	Методичне забезпечення експериментальних досліджень. Опис об'єкта дослідження. Опис методів підвищення фізико-хімічних властивостей сталей. Інші методики досліджень.		
3)	Опис закономірностей формування структури та рівня антикорозійних властивостей сталей 12X18H10T, 12X17, 30X13. Викладення результатів досліджень та їх висновки.	25.11.23	
4)	Висновки.	15.12.23	

Студент(ка)


(підпис)

Лебедев Р.В.
(прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи)


(підпис)

Акімов І.В.
(прізвище та ініціали)

Реферат

Робота складається з 68 сторінок, 11 малюнків, 1 таблиці.

Об'єктом дослідження являється нержавіюча сталь.

Метою дослідження було виявити причини корозії деталей виготовлених з корозійностійких сталей, котрі в експлуатації були підвержені точковій (виразковій) корозії. Деталі виготовлені з однієї марки сталі, експлуатувалися в одних умовах, конструктивно розміщені одна біля одної, проявляли різну стійкість до корозії. В роботі було проведено аналіз можливих причин втрати сталі своїх корозійностійких властивостей. Проведено термічну обробку в експериментальних режимах і виявлено діапазон твердості, задля якої сталь термічно оброблялася, при якій відбувається втрата властивостей. На підприємстві були прийняті рішення та ряд запобіжних заходів для виключення шкідливої термічної обробки.

Ключові слова: КОРОЗІЙНА СТІЙКІСТЬ, НЕРЖАВІЮЧА СТАЛЬ, ТЕРМООБРОБКА, ТОЧЕЧНА КОРОЗІЯ, ТВЕРДІСТЬ СТАЛІ.

Abstract

The work consists of 68 pages, 11 drawings, 1 table.

The object of the study is stainless steel.

The purpose of the study was to identify the causes of corrosion of parts made of corrosion-resistant steels, which in operation were susceptible to pitting (ulcerative) corrosion. Parts made of the same grade of steel, operated in the same conditions, structurally located next to each other, showed different resistance to corrosion. The work analyzed the possible causes of the loss of steel of its corrosion-resistant properties. Thermal treatment was carried out in experimental modes and the range of hardness was found for which the steel was heat-treated, at which the loss of properties occurs. At the enterprise, decisions and a number of preventive measures were taken to exclude harmful heat treatment.

Keywords: CORROSION RESISTANCE, STAINLESS STEEL, HEAT TREATMENT, PITTING CORROSION, STEEL HARDNESS.

Зміст

Вступ.....	7
Розділ 1	
Властивості та класифікація корозійностійких сталей.....	8
1.1. Процес корозії.....	8
1.2. Корозія нержавіючих сталей.....	11
1.3. Класифікація нержавіючих сталей.....	17
1.3.1. Хромисті сталі.....	18
1.3.2. Хромонікелеві та нікелеві сталі.....	26
1.3.3. Хромомарганцеві і хромомарганцевонікелеві сталі.....	34
Розділ 2	
Методика дослідження.....	36
2.1. Значення дослідження корозії нержавіючих сталей.....	36
2.2. Технологічні порушення, що призводять до корозії нержавіючої сталі..	38
2.3. Методи виявлення технологічних порушень.....	40
2.3.1. Випробування на твердість.....	40
2.3.2. Металографічний аналіз.....	43
2.3.3. Аналіз хімічного складу.....	45
2.4. Задійснена апаратура.....	48
2.4.1. Піч СНОЛ 2.4.2/11 и2.....	49
2.4.2. Твердомір ТК-2.....	50
2.4.3. Мікротвердомір ПМТ-3.....	51
2.4.4. Мікроскоп МИМ-8М.....	53
Розділ 3	
Дослідження зразків.....	54
3.1. Вибір досліджуваних параметрів.....	54
3.2. Проведення дослідження.....	55
3.2.1. Сталь 30X13.....	56
3.2.2. Сталь 12X17.....	58
3.2.3. Сталь 12X18Н10Т.....	60
3.3. Висновки.....	62
Висновки.....	63
Перелік джерел посилань.....	65

Вступ

Нержавіюча сталь є одним з найпоширеніших матеріалів у промисловості. Вона має високу корозійну стійкість, що робить її ідеальною для застосування в агресивних середовищах. Однак, навіть нержавіюча сталь може піддаватися корозії, якщо вона не піддається належній термічній обробці.

Точкова корозія є одним з найпоширеніших видів корозії нержавіючої сталі. Вона характеризується появою невеликих, але глибоких осередків корозії на поверхні металу. Точкова корозія може призвести до значного ослаблення конструкції та навіть до її руйнування.

Метою даної роботи є дослідження впливу термічної обробки на корозійну стійкість нержавіючої сталі. Для цього буде проведено серію експериментів, в рамках яких будуть досліджені вплив різних режимів термічної обробки на твердість поверхні металу.

Результати дослідження будуть мати практичне значення для розробки заходів щодо підвищення корозійної стійкості нержавіючої сталі. Для проведення досліджень будуть використовуватися такі методи як термічна обробка, випробування на корозійну стійкість, мікроскопічні дослідження.

Результати дослідження будуть мати практичне значення для розробки заходів щодо підвищення корозійної стійкості нержавіючої сталі.

Дослідження буде проведено на базі Центральної Заводської Лабораторії КП «НВК „Іскра“».

Розділ 1

Властивості та класифікація корозійностійких сталей

1.1. Процес корозії

Корозія металів — це самовільне руйнування металів і сплавів під впливом навколишнього середовища. Цей процес може призвести до погіршення механічних властивостей металу, зменшення його міцності, пластичності та інших характеристик.

Корозія може бути викликана різними факторами, зокрема хімічними речовинами, такими як кисень, вуглекислий газ, хлор, кислоти, луги тощо. Фізичними факторами — температура, вологість, тиск, світло тощо. Та біологічними — мікроорганізми (бактерії, гриби тощо) [1, 2].

Залежно від механізму корозії металів виділяють такі її основні види:

— Хімічна корозія — це процес руйнування металу в результаті безпосередньої взаємодії його з навколишнім середовищем. Наприклад, іржавіння заліза, окиснення міді, срібла тощо.

— Електрохімічна корозія — це процес руйнування металу в результаті його взаємодії з електролітом (водою, розчинами кислот, лугів тощо). Наприклад, корозія зварних швів, корозія в морській воді тощо.

— Біологічна корозія — це процес руйнування металу в результаті його взаємодії з мікроорганізмами. Наприклад, корозія металевих конструкцій у ґрунті, корозія металевих конструкцій у морській воді тощо.

Корозія металів є серйозною проблемою, яка може призвести до значних економічних збитків. Для захисту металів від корозії застосовують різні методи, зокрема захисними покриттями (фарби, емалі, лаки, цинкування, хромування тощо), додавання легуючих елементів (легування сталі хромом, нікелем, молібденом тощо), конструкційні заходи (застосування спеціальних форм і розмірів деталей, шліфовці поверхні які перешкоджають корозії).

Заходи захисту від корозії металів необхідно враховувати при проектуванні, виготовленні та експлуатації металевих конструкцій [3].

За ознакою довкілля, корозія розрізняється на:

— атмосферну;

— рідинну;

— газову;

— електрокорозію;

— контактну корозію (виникає внаслідок того, що електроди з різними потенціалами утворюють електрохімічну пару і в результаті цього на поверхні одного з металів відбувається інтенсивна корозія, а на поверхні іншого — пасивація);

За характером зовнішнього прояву корозія ділиться на наступні види.

Загальна, рівномірна корозія — це вид корозії, при якому метал руйнується з однаковою швидкістю по всій поверхні, що контактує з агресивним середовищем. Цей вид корозії є найменш небезпечним, оскільки він не призводить до виникнення тріщин і інших дефектів, які можуть призвести до руйнування металу.

Місцева, чи точкова (виразкова), корозія — це вид корозії, при якому метал руйнується локально, у вигляді окремих плям, виразок або питтингів. Цей вид корозії є більш небезпечним, ніж загальна, рівномірна корозія, оскільки він може призвести до виникнення тріщин і інших дефектів, які можуть призвести до руйнування металу. Виразкова корозія може бути викликана різними факторами, включаючи неоднорідність складу металу, наявність домішок у металі, наявність дефектів поверхні металу (такі як подряпини, тріщини, раковини), абразивний вплив середовища [3].

Міжкристалітна корозія — це вид корозії, при якому руйнування металу відбувається по межах кристалів. Міжкристалітна корозія є одним з найнебезпечніших видів корозії, оскільки вона може призвести до швидкого руйнування металевих виробів. Вона погано візуально себе проявляє і часто її ідентифікують по вже присутнім наслідкам руйнування металу —

макротріщинам. Міжкристалітна корозія виникає внаслідок того, що межі кристалів є більш схильними до корозії, ніж внутрішня частина зерна. Це пов'язано з тим, що межі кристалів мають більшу кількість дефектів, таких як домішки, нещільності, дефекти кристалічної структури. Міжкристалітна корозія може виникати як в умовах статичного навантаження, так і в умовах динамічного навантаження [4, 5].

Селективна корозія — це вид корозії, при якому один з компонентів сплаву руйнується швидше, ніж інші компоненти. Селективна корозія може відбуватися в різних середовищах, але вона найчастіше спостерігається в агресивних середовищах, таких як морська вода, концентровані кислоти та луги. При селективній корозії на поверхні сплаву утворюється захисна плівка, яка захищає більш стійкі до корозії компоненти сплаву. Однак захисна плівка не утворюється на менш стійких до корозії компонентах сплаву, що призводить до їхнього руйнування. Селективна корозія може призвести до значних пошкоджень сплаву, а в деяких випадках навіть до його руйнування. Прикладами селективної корозії є корозія латуні в морській воді. У морській воді латунь піддається корозії, при цьому цинк, який є одним з компонентів латуні, руйнується швидше, ніж мідь. Це призводить до утворення на поверхні сплаву плівки з оксиду міді, під якою залишається оголений цинк. Оголений цинк далі піддається корозії, що призводить до утворення тріщин і раковин на поверхні сплаву. Корозія нікель-хромових сплавів в концентрованих кислотах. У концентрованих кислотах нікель, який є одним з компонентів нікель-хромових сплавів, руйнується швидше, ніж хром [1, 6]. Це призводить до утворення на поверхні сплаву плівки з оксиду хрому, під якою залишається оголений нікель. Оголений нікель далі піддається корозії, що призводить до утворення тріщин і раковин на поверхні сплаву.

Температура впливає на швидкість корозії металів як безпосередньо, так і опосередковано. Прямий вплив температури пов'язаний зі зміною швидкості хімічних і електрохімічних реакцій, що лежать в основі корозійного процесу. З підвищенням температури швидкість цих реакцій зростає, що призводить до

більш швидкого руйнування металу. Опосередкований вплив температури пов'язаний зі зміною розчинності кисню у воді. З підвищенням температури розчинність кисню у воді зростає, що також сприяє більш швидкому руйнуванню металу. Наприклад, залізо, що знаходиться у воді, за температури 20 °С кородує зі швидкістю 0,001 мм/рік. При температурі 100 °С швидкість корозії зростає до 0,01 мм/рік, тобто в 10 разів [7].

1.2. Корозія нержавіючих сталей

Нержавіючі сталі — це сплави заліза з хромом, які мають високу стійкість до корозії. Хром у складі нержавіючої сталі утворює на її поверхні тонку плівку оксиду хрому, яка захищає метал від подальшого окислення. Хром є визначальним легуючим елементом нержавіючих сталей. Він надає сталі властивість бути «нержавіючою». Оксид хрому має високу міцність і хімічну стійкість. Він утворює на поверхні сталі міцний шар, який перешкоджає проникненню кисню та інших агресивних речовин всередину металу [1-4, 8].

Хром покращує зварювальні властивості нержавіючих сталей. Він підвищує стійкість металу до утворення тріщин при зварюванні [8]. Завдяки цим властивостям хром є одним з найважливіших легуючих елементів нержавіючих сталей.

Нержавіючі сталі широко застосовуються в різних галузях промисловості, будівництва, сільського господарства та інших сферах. Вони використовуються для виготовлення посуду, сантехнічних виробів, меблів, хімічного обладнання, машинобудівних деталей та інших виробів.

Залежно від вмісту хрому і інших легуючих елементів нержавіючі сталі поділяються на кілька категорій [9, 10, 13]:

а) Аустенітна нержавіюча сталь містить від 18 до 28% хрому і від 8 до 20% нікелю. Ця категорія нержавіючих сталей має високу корозійну стійкість в широкому діапазоні температур і середовищ.

б) Мартенситна нержавіюча сталь містить від 12 до 18% хрому. Ця категорія нержавіючих сталей має високу міцність і твердість, але вона менш стійка до корозії, ніж аустенітна нержавіюча сталь.

в) Дуплексна нержавіюча сталь містить від 22 до 30% хрому і від 4 до 6% нікелю. Ця категорія нержавіючих сталей має високу корозійну стійкість і міцність.

Аустенітна нержавіюча сталь має структуру аустеніту, яка характеризується кубічною гранецентрованою упаковкою атомів. Ця структура є стійкою до корозії в широкому діапазоні температур і середовищ. Аустенітна нержавіюча сталь має високу пластичність і стійкість до втоми, що дозволяє її використовувати для виготовлення виробів, що піддаються значним навантаженням [11,12, 18].

Мартенситна нержавіюча сталь має структуру мартенситу, яка характеризується тетрагонально-деформованою щільною упаковкою атомів. Ця структура є більш міцною і твердою, ніж аустеніт, але вона менш стійка до корозії. Мартенситна нержавіюча сталь має високу міцність і твердість, що дозволяє її використовувати для виготовлення виробів, що піддаються ударним навантаженням.

Дуплексна нержавіюча сталь має структуру, що складається з аустеніту і мартенситу. Ця структура забезпечує високу корозійну стійкість і міцність. Дуплексна нержавіюча сталь має широке застосування в різних галузях промисловості, включаючи харчову, хімічну, нафтогазову та суднобудівну [9, 10].

Захистна плівка на поверхні нержавіючої сталі утворюється в результаті хімічної реакції між хромом і киснем повітря. Ця плівка є дуже тонкою, але вона має високу стійкість до корозії.

Захисна плівка на поверхні нержавіючої сталі утворюється в результаті хімічної реакції між хромом і киснем повітря.

Електрохімічний механізм утворення захисної плівки [14-17]:

- а) Захисна плівка на поверхні нержавіючої сталі утворюється в результаті електрохімічної реакції. Ця реакція відбувається на межі метал-окис.
- б) На поверхні нержавіючої сталі знаходиться захисна плівка з оксиду хрому. Ця плівка є електродом, який має негативний потенціал. У зовнішньому середовищі, наприклад, в атмосфері або в морській воді, знаходиться електрод з позитивним потенціалом.
- в) Між цими електродами виникає електричний струм. Цей струм викликає перенесення речовини від негативного електрода (захисної плівки) до позитивного електрода.
- г) На негативному електроді (захисній плівці) хром окислюється, утворюючи оксид хрому. Оксид хрому дифундує в поверхневий шар металу.
- д) На позитивному електроді (зовнішньому середовищі) оксид хрому відновлюється, утворюючи хром.

Цей процес відбувається безперервно, і в результаті на поверхні металу утворюється плівка з оксиду хрому.

Крім хрому, у нержавіючі сталі вводять інші легуючі елементи, які також впливають на їхні властивості. До основних легуючих елементів нержавіючих сталей відносяться [1-3, 18, 19]:

- Нікель. Нікель підвищує корозійну стійкість нержавіючої сталі, а також її пластичність і міцність. Нікель також підвищує жаростійкість нержавіючих сталей.
- Магній. Магній підвищує корозійну стійкість нержавіючої сталі в агресивних середовищах, таких як морська вода. Магній також підвищує міцність нержавіючих сталей.

— Молибден. Молибден підвищує корозійну стійкість нержавіючої сталі в агресивних середовищах, таких як концентровані кислоти і луги. Молибден також підвищує міцність і жаростійкість нержавіючих сталей.

— Манган. Манган підвищує міцність і пластичність нержавіючої сталі.

— Титан. Титан підвищує корозійну стійкість нержавіючої сталі, а також її міцність. Титан також підвищує стійкість нержавіючої сталі до інтенсивного зношування.

— Ніобій. Ніобій підвищує корозійну стійкість нержавіючої сталі, а також її міцність і жаростійкість.

— Бор. Бор підвищує міцність і пластичність нержавіючої сталі.

Крім цих основних легуючих елементів, у нержавіючі сталі можуть вводитися також інші елементи, такі як :

— Алюміній;

— Кобальт;

— Кремній;

— Цинк.

Вміст легуючих елементів у нержавіючих сталях може бути різним, і він визначається призначенням сталі. Наприклад, для нержавіючих сталей, що використовуються в суднобудуванні, вміст хрому повинен бути не менше 18%, а вміст нікелю — не менше 8%. Для нержавіючих сталей, що використовуються в харчовій промисловості, вміст хрому повинен бути не менше 13%, а вміст молибдену — не менше 2% [20, 21]. Введення легуючих елементів у нержавіючі сталі дозволяє поліпшити їхні властивості і розширити область їхнього застосування.

Карбіди хрому утворюються в процесі плавлення нержавіючої сталі. Вони є твердими і крихкими включеннями, які концентруються на межах зерен [22, 23]. У агресивних середовищах карбіди хрому можуть розчинятися. Це відбувається внаслідок того, що хром є більш активним елементом, ніж залізо. У результаті утворюється зона збіднення хромом. Зона збіднення хромом є більш схильною до корозії, ніж інші зони металу. Це пояснюється тим, що хром

утворює на поверхні металу захисну плівку з оксиду хрому. Ця плівка захищає метал від корозії [23].

Таким чином, карбіди хрому сприяють інтеркристалічній корозії нержавіючої сталі, оскільки вони зменшують вміст хрому в межах зерен.

Існує кілька способів зменшити вплив карбідів хрому на корозійну стійкість нержавіючої сталі. До них відносяться [24-27]:

- Зменшення вмісту вуглецю в нержавіючій сталі. Чим нижчий вміст вуглецю, тим менше карбідів хрому утворюється.
- Використання легуючих елементів, які сприяють розчиненню карбідів хрому. До таких елементів відносяться ванадій, молібден, титан.
- Термічна обробка нержавіючої сталі. Термічна обробка може призвести до розчинення карбідів хрому.

Додавання титану в нержавіючу сталь має позитивний вплив на її корозійну стійкість, незалежно від класу нержавіючої сталі. У аустенітних нержавіючих сталях титан сприяє рівномірному розподілу хрому по всій структурі металу. Це знижує ймовірність утворення зон збіднення хромом, які є схильними до інтеркристалічної корозії. У мартенситних нержавіючих сталях титан підвищує міцність і зносостійкість металу. Це дозволяє використовувати такі сталі в більш агресивних середовищах. У феритних нержавіючих сталях титан підвищує корозійну стійкість до кислот і інших агресивних середовищ.

Конкретний вплив додавання титану на корозійну стійкість нержавіючої сталі залежить від його вмісту в сталі. Зазвичай, титан в кількості 0,05-0,2% забезпечує значне підвищення корозійної стійкості нержавіючої сталі.

Термічна обробка нержавіючої сталі може призвести до розчинення карбідів хрому внаслідок наступних процесів [14, 17]:

- Аустенізація. При нагріванні нержавіючої сталі до температури вище критичної точки (910-1050 °C) хром, який знаходиться в межах зерен у вигляді карбідів, розчиняється в аустенітній матриці.

— Нітрилювання. При нагріванні нержавіючої сталі в середовищі азоту хром, який знаходиться в межах зерен у вигляді карбідів, розчиняється в аустенітній матриці і утворює нітриди хрому.

— Мартенситизація. При швидкому охолодженні аустеніту, отриманого в результаті аустенізації або нітрилювання, хром, який знаходиться в межах зерен у вигляді карбідів, розчиняється в мартенситі.

Аустенізація є найбільш поширеним способом розчинення карбідів хрому в нержавіючій сталі. При цьому процесі хром, який знаходиться в межах зерен у вигляді карбідів, розчиняється в аустенітній матриці і утворює рівномірний розподіл хрому по всій структурі металу. Це підвищує корозійну стійкість нержавіючої сталі, оскільки зменшує ймовірність утворення зон збіднення хромом, які є схильними до інтеркристалічної корозії.

Нітрилювання також є ефективним способом розчинення карбідів хрому в нержавіючій сталі. При цьому процесі хром, який знаходиться в межах зерен у вигляді карбідів, розчиняється в аустенітній матриці і утворює нітриди хрому. Нітрид хрому є більш твердим і міцним, ніж карбіди хрому. Це підвищує міцність і зносостійкість нержавіючої сталі.

Мартенситизація може призвести до розчинення карбідів хрому в нержавіючій сталі, якщо аустеніт, отриманий в результаті аустенізації, швидко охолоджується. При цьому процесі хром, який знаходиться в межах зерен у вигляді карбідів, розчиняється в мартенситі. Мартенсит є твердим і міцним, але він також є крихким. Це підвищує міцність і зносостійкість нержавіючої сталі, але знижує її пластичність.

1.3. Класифікація нержавіючих сталей

Як один з варіантів класифікації нержавіючих сталей (і не тільки нержавіючих) використовується класифікація за структурою [10]:

- а) Мартенситний клас (X12M, X12H2M, X12H3M2, 30X13);
- б) Феритний клас (10X17H13M2T, 15X18H9T, 08X18H10, 12X17, 15X18H9TЛ);
- в) Аустенітний клас (12X18H9T, 15X18H9T, 08X18H10Л);
- г) Дуплексний клас (12X23H18Г2, Сталь 2205, Сталь 3216).

Однак класифікація за структурою має ряд недоліків і не дає зрозумілої картини існуючих видів сталей:

— Вона не враховує всіх властивостей металу. Структура металу є лише одним з факторів, який впливає на його властивості. Іншими факторами є хімічний склад, термічна обробка, наявність домішок та інші.

— Вона не є чіткою і однозначною. У деяких випадках складно однозначно визначити структуру металу. Наприклад, якщо в металі міститься невелика кількість легуючих елементів, то його структура може бути проміжною між двома основними типами.

— Вона не дозволяє порівняти різні сталі з однаковими структурами. Наприклад, сталь з аустенітною структурою може мати різні властивості в залежності від її хімічного складу і термічної обробки.

В основному структура для марки стали надається в умовах термообробки при більше ніж 900° з охолодженням на повітрі. При додатковій термічній обробці або зварки, структура сплаву може змінюватись [17].

Класифікація за легуючими елементами нержавіючих сталей — ця класифікація буде зручніша, ніж класифікація за структурою металу. Вона враховує два найважливіших фактора, які впливають на властивості сталі, а саме: вміст хрому і вміст нікелю.

Хром є основним легуючим елементом, який забезпечує корозійну стійкість сталі. Нікель також підвищує корозійну стійкість сталі, а також її міцність і жаростійкість [28]. Класифікація за цими двома факторами дозволяє легко визначити, які сталі мають високу корозійну стійкість, а також які сталі мають високу міцність, твердість і жаростійкість [29].

Ось приклади застосування цієї класифікації:

- а) Хромисті сталі використовуються для виготовлення деталей, які працюють в помірно агресивних середовищах. Наприклад, сталь 10ХСНД використовується для виготовлення корпусів суден і трубопроводів.
- б) Хромонікелеві та нікелеві сталі використовуються для виготовлення деталей, які працюють в більш агресивних середовищах. Наприклад, сталь 2205 використовується для виготовлення трубопроводів, які працюють в морській воді.
- в) Хромомарганцеві та хромомарганцевонікелеві сталі використовуються для виготовлення деталей, які піддаються високим навантаженням. Наприклад, сталь 12Х18Н10Т використовується для виготовлення деталей машин і механізмів, які працюють в умовах підвищених температур.

1.3.1. Хромисті сталі

Хромисті сталі після затвердіння утворюють безперервний ряд твердих розчинів хрому в залізі. Ці розчини мають кристалічну решітку центрованого куба, як показано на Рисунку 1.1.

При вмістах хрому менше за 12% в області температур 800-1400°C є тверді розчини γ і $\gamma+\alpha$. При вмісті хрому понад 13-15% сталь має лише $\alpha(\sigma)$ -структуру. Залізохромисті сплави мають тендітну немагнітну складову α -фазу. Вона утворюється за температури нижче 950° С і вміст хрому та заліза по 47% [30, 31].

У високохромистих сталях при повільному охолодженні або нагріванні швидкоохолодженої сталі може утворитися тендітна інтерметалічна сполука FeCr , яка називається σ -фазою. Утворення σ -фази супроводжується об'ємними змінами, які призводять до високої крихкості сталі. Наявність марганцю, кремнію та молібдену полегшує утворення σ -фази та знижує вміст хрому, при якому вона утворюється.

Фазовий склад хромистих сталей з 0,1% представлено на Рисунку 1.2.

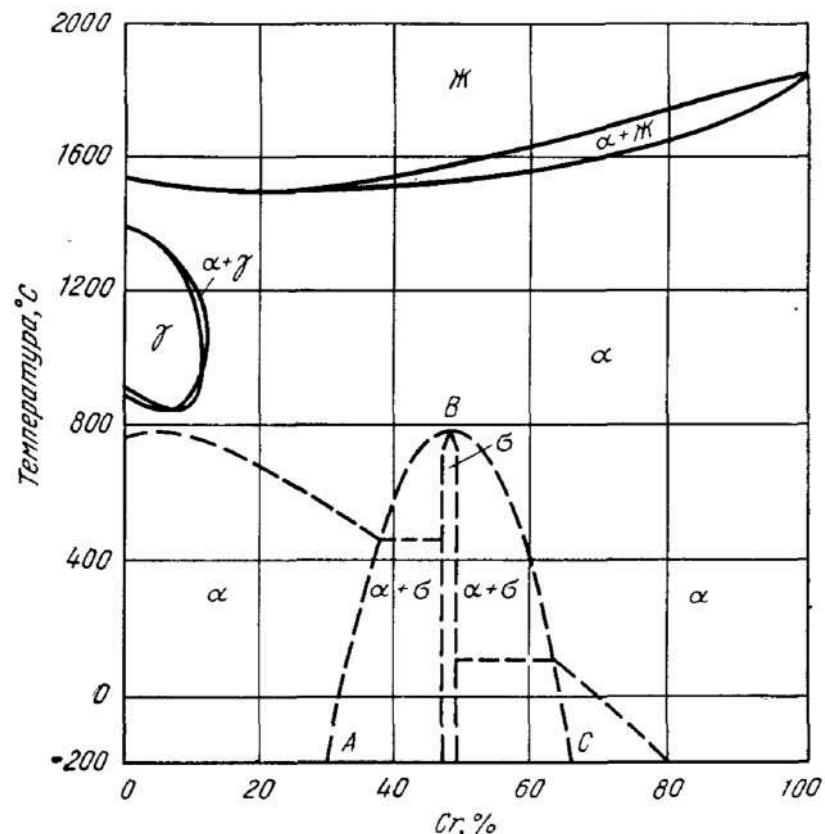


Рисунок 1.1 — Діаграма стану системи залізо — хром.

Хромисті сталі з низьким вмістом вуглецю мають високу корозійну стійкість, оскільки вони мають рівномірну структуру без карбідів. Однак хромисті сталі з високим вмістом вуглецю мають високу твердість і міцність, оскільки вони мають структуру з карбідами [32, 33].

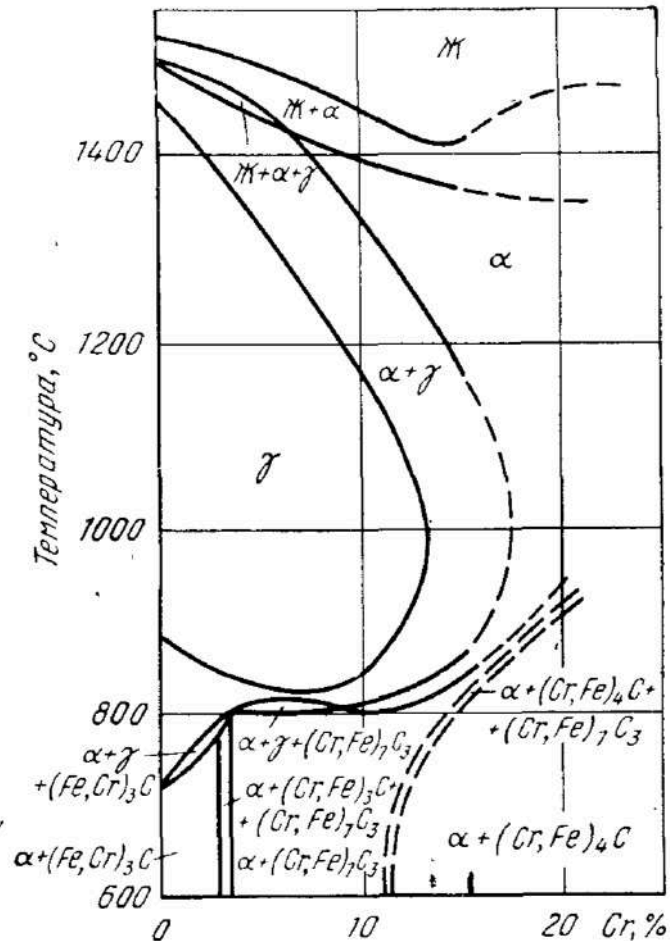


Рисунок 1.2 — Фазовий склад хромістих сталей, з 0,1%С.

Хромисті нержавіючі сталі мають високі механічні властивості після загартування та відпустки, а також високу корозійну стійкість після загартування та полірування. Ці сталі стійкі до корозії в азотній кислоті, але не в інших кислотних середовищах. Вони також мають хорошу жаростійкість, зберігаючи механічні властивості при температурах до 700°C. Хромисті нержавіючі сталі можна зварювати газовим і дуговим способом. Середньолеговані хромисті теплостійкі сталі — це сплави заліза з хромом, які мають підвищену стійкість до корозії в хімічно активних середовищах при температурах до 550-650°C. Вміст хрому в таких сталях становить від 5 до 10%. Застосування середньолегованих хромистих теплостійких сталей в обладнанні для переробки нафти та газу, виготовленні котлів, турбін та інших елементів теплових агрегатів, виробництві аміаку, азотної кислоти та інших продуктів з

азоту. Середньолеговані хромисті теплостійкі сталі широко застосовуються в різних галузях промисловості, де потрібна висока стійкість до корозії в хімічно активних середовищах при високих температурах.

Після відпалу при 840-860°C середньолеговані сталі набувають наступних механічних властивостей: міцність 500-600 МПа; твердість 200-300 НВ; в'язкість 10-15%. Ці властивості забезпечують середньолегованим сталям високу жаростійкість (до 700°C) і корозійну стійкість у деяких хімічно активних середовищах. Однак, слід зазначити, що механічні властивості середньолегованих сталей після відпалу можуть відрізнятися в залежності від їхнього складу та хімічної обробки. Наприклад, сталі з підвищеним вмістом хрому мають більш високу жаростійкість, а сталі з підвищеним вмістом нікелю мають більш високу корозійну стійкість. Міцність середньолегованих сталей після відпалу становить 500-600 МПа. Ця міцність забезпечує високу стійкість сталей до руйнування при високих температурах. Твердість середньолегованих сталей після відпалу становить 200-300 НВ. Ця твердість забезпечує високу зносостійкість сталей. В'язкість середньолегованих сталей після відпалу становить 10-15%. Ця в'язкість забезпечує високу ударну в'язкість сталей, що дозволяє їм витримувати ударні навантаження при високих температурах.

Середньолеговані сталі з такими механічними властивостями широко застосовуються в різних галузях промисловості, зокрема в крекінг-апаратурі, котельно-турбобудуванні, хімічній промисловості, машинобудуванні.

Хромокремністі сталі (сільхроми) — це сталі, які містять від 0,1 до 2,5% кремнію. Вони мають високу стійкість до корозії, особливо в середовищі хлоридів.

Хром у цих сталях утворює захисну плівку на поверхні, яка перешкоджає проникненню корозійних агентів. Кремній також сприяє утворенню плівки, а також підвищує міцність і твердість сталі.

Сільхроми широко застосовуються в хімічній, нафтопереробній, харчовій та інших галузях промисловості. Вони використовуються для виготовлення

обладнання, яке працює в агресивних середовищах, наприклад, ємностей, трубопроводів, насосів, змішувачів тощо.

Сталь марки 12X18H10T — це один з найпоширеніших типів сільхромів. Вона має вміст хрому 18% і кремнію 10%. Ця сталь має високу стійкість до корозії в хлоридних середовищах, а також високу міцність і твердість.

Сталь марки 12X18H9T — це ще один поширений тип сільхромів. Вона має вміст хрому 18% і кремнію 9%. Ця сталь має трохи меншу стійкість до корозії, ніж сталь марки 12X18H10T, але вона є більш пластичною і легко обробляється.

Сталь марки 20X18H10T — це високолегована сталь, яка має вміст хрому 18%, кремнію 10% і нікелю 20%. Ця сталь має найвищу стійкість до корозії серед усіх сільхромів.

Міцність сільхромів після загартування і відпустки становить 1000-1200 МПа. Ця міцність забезпечує високу стійкість сталей до руйнування при високих температурах. Міцність сільхромів після загартування і відпустки забезпечується наявністю у структурі сталі мартенситу. Мартенсит - це тверда і крихка структура, яка утворюється при гартуванні сталі з високої температури.

Твердість сільхромів після загартування і відпустки становить 500-600 НВ. Ця твердість забезпечує високу зносостійкість сталей. Твердість сільхромів після загартування і відпустки також забезпечується наявністю у структурі сталі мартенситу. Мартенсит має високу твердість, але низьку в'язкість.

В'язкість сільхромів після загартування і відпустки становить 10-15%. Ця в'язкість забезпечує високу ударну в'язкість сталей, що дозволяє їм витримувати ударні навантаження при високих температурах. В'язкість сільхромів після загартування і відпустки забезпечується процесом відпустки. Відпустка — це термічна обробка, яка проводиться після гартування і призводить до зміни структури сталі. У випадку сільхромів відпустка призводить до утворення у структурі сталі трооститу. Троостит - це більш в'язка структура, ніж мартенсит.

При нагріванні силхромових сталей до дуже високих температур (вище 1100°C) у них відбувається значне зростання зерен. Це призводить до збільшення крихкості сталі, що може призвести до її руйнування. Для усунення крихкості, яка може виникнути при повільному охолодженні і нагріванні силхромових сталей у діапазоні температур 500-600°C, їх охолоджують у воді після відпустки при 700-800°C [27].

До мартенситних і полумартенситних нержавіючих сталей з вмістом хрому 10-17% і вмістом вуглецю 0,16-0,45% відносяться наступні марки: мартенситні 12X18H9, 12X18H10T, 12X18H12Б, 12X18H13, 12X18H14; полумартенситні 14X17H13, 14X18H11T, 14X18H11B2T. Ці сталі мають високу міцність, твердість і жаростійкість, що дозволяє їм застосовуватися в різних галузях техніки. Мартенситні сталі мають структуру мартенситу, яка забезпечує високу міцність і твердість. Однак, мартенсит є крихким, що може призвести до тріщин при ударних навантаженнях. Для підвищення в'язкості мартенситних сталей їх піддають відпустці. Полумартенситні сталі мають структуру, що складається з мартенситу і трооститу. Троостит є більш в'язкою структурою, ніж мартенсит, що підвищує в'язкість сталі.

Хромисті сталі з вмістом хрому 14-17% і нікелю 1,5-3% є жаростійкими сталями, які мають високу міцність, твердість і жаростійкість [17]. Хромисті сталі з нікелем застосовуються для виготовлення деталей котлів, турбін, теплообмінників, які працюють при високих температурах і тисках. Наприклад, сталь 15X25H19 застосовується для виготовлення деталей парових котлів, турбін, теплообмінників.

Хромисті сталі з нікелем мають різні властивості в залежності від кількості вуглецю і хрому в них. Сталі з низьким вмістом вуглецю і високим хромом мають феритну структуру, яка не піддається загартуванню. Сталі з високим вмістом вуглецю і низьким у хрому мають мартенситну структуру, яка піддається загартуванню. Це пов'язано з особливостями фазової структури сталі.

У зв'язку з підвищенням робочих температур паросилових установок і силових компресорів газотурбінних установок, виникла необхідність у розробці нових сталей, які б могли витримувати ці температури. У результаті були створені складнолеговані 12%-ві хромисті нержавіючі і жароміцні сталі. Додаткове легування хромистих сталей молібденом, вольфрамом, ванадієм, ніобієм, бором дозволило зберегти їх нержавіючі властивості, високу прожарюваність, здатність до загартування на повітрі, невисокий коефіцієнт розширення і одночасно забезпечити більш високі жароміцні властивості, зокрема збереження міцності при 550-600 і до 650°C при короткочасних термінах служби [17].

Дослідження показали, що комплексне легування сталі є більш ефективним, ніж легування окремими елементами. За ступенем ефективності легуючі елементи можна розташувати в наступному порядку: ніобій, ванадій, молібден, вольфрам, алюміній. Для складнолегованих сталей характерні такі особливості: обмеження вмісту вуглецю до 0,20-0,25% та кремнію до 0,5%, а також забезпечення фазового складу із вмістом не більше 20% структурно вільного фериту. Ці особливості необхідні для отримання стабільних і високих властивостей сталі, а також для зменшення підкалки та розтріскування.

Хромисті сталі напівферитного та феритного класів, незважаючи на свою доступність, мають ряд серйозних недоліків, через які вони не отримали широкого застосування. Зокрема, властивості цих сталей значною мірою залежать від співвідношення фаз аустеніту та фериту. При великому вмісті фериту сталь стає крупнозернистою і крихкою. Ці негативні властивості неможливо усунути термообробкою [17].

Для подрібнення зерна сталі широко застосовують легування титаном або азотом. Титан утворює в сталі карбід титану, який є твердим і тугоплавким, що сприяє подрібненню зерна. Азот утворює нітриди, які також є твердими і тугоплавкими, і також сприяють подрібненню зерна. Крім того, азот підвищує ударну в'язкість і зварювальні характеристики сталі. Використання легування титаном або азотом дозволяє отримати сталі з високою міцністю, ударною

в'язкістю і зварювальністю. Такі сталі широко застосовуються в різних галузях техніки, зокрема в машинобудуванні, суднобудуванні, авіабудуванні, хімічній промисловості.

Хромисті сталі феритного та напівферитного класів мають високу стійкість до корозії в агресивних середовищах, але низьку міцність, особливо ударну. Тому вони застосовуються для виготовлення виробів, які не несуть великих навантажень, таких як теплообмінники, баки для кислот, трубопроводи, адсорбційні вежі, апаратура для розчинів гіпохлориту натрію, азотної та фосфорної кислот [17, 34].

Хромисті сталі з титаном (0X18T) мають підвищену ударну в'язкість, що дозволяє використовувати їх для виготовлення виробів, які піддаються ударним навантаженням, таких як баки пральних машин. Сталі з добавкою нікелю (1%) та азоту (X28AN), нікелю та кремнію (X25C3N) мають підвищену стійкість до окалини та жаростійкість, що дозволяє використовувати їх для виготовлення деталей і обладнання, які працюють в умовах високих температур і хімічної агресивності. Високохромні сталі з кремнієм мають високу жаростійкість і стійкість до окислення, що дозволяє використовувати їх для виготовлення деталей і обладнання, які працюють в умовах високих температур.

Введення алюмінію в залізо та залізохромисті сплави веде до різкого обмеження області аустеніту. При вмісті в залізі 1% Al область аустеніту зникає. Це пов'язано з тим, що алюміній утворює з залізом стійкі інтерметалічні фази, які перешкоджають утворенню аустеніту [37]. При нагріванні до високих температур спостерігається сильна схильність до зростання зерна та крихкості. Це пов'язано з тим, що алюміній сприяє утворенню великих кристалів у сплаві.

Однак, коли жаростійкі деталі з цих сплавів не зазнають ударних навантажень, вони, незважаючи на крупнозернистість, працюють багато років, успішно замінюючи значно дорожчі ніхромні. Це пов'язано з тим, що основні властивості жаростійкості, такі як міцність, жароміцність і стійкість до окислення, у цих сплавах досить високі [30].

Живність деталей зі залізохромалюмінієвих сплавів висока в окислювальній атмосфері, а також за наявності в атмосфері великої кількості сірки. Це пов'язано з тим, що алюміній утворює з сірки стійкий сульфід, який захищає поверхню сплаву від корозії.

У відновлювальній атмосфері їх термін служби є значно нижчим, особливо якщо є умови для науглерожування нагрівальних елементів. Це пов'язано з тим, що алюміній легко вступає в реакцію з вуглецем, утворюючи карбід алюмінію, який знижує жаростійкість сплаву.

Живість сплаву в атмосфері азоту досить велика. Це пов'язано з тим, що алюміній утворює з азотом стійкий нітрид, який захищає поверхню сплаву від корозії.

1.3.2. Хромонікелеві та нікелеві сталі

Хромонікелеві та нікелеві сталі — це сплави на основі заліза, леговані хромом і нікелем. Вони мають високу стійкість до корозії, навіть у агресивних середовищах. Хромонікелеві сталі використовуються для виготовлення посуду, сантехніки, автомобілів, літаків та інших виробів, які піддаються корозії. Нікелеві сталі також мають хороші жаростійкі властивості, тому використовуються для виготовлення деталей, які працюють при високих температурах.

Найпоширенішою сталю цього типу являється аустенітна сталь типу 18-8 — це хромонікелева сталь, яка містить 18% хрому та 8% нікелю. Ця сталь має високу стійкість до корозії, навіть у агресивних середовищах. Вона також має хороші механічні властивості, такі як міцність, зносостійкість та пластичність.

Аустенітна структура сталі типу 18-8 забезпечує її високу стійкість до корозії. Хром утворює на поверхні сталі захисний шар оксиду хрому, який

перешкоджає проникненню корозійних агентів у метал. Нікель також сприяє утворенню цього шару і підвищує його стійкість.

Аустенітна сталь типу 18-8 широко використовується в різних галузях промисловості. Вона є основним матеріалом для виготовлення посуду, сантехніки, медичних інструментів, а також для виготовлення деталей, які працюють в агресивних середовищах [5].

Низьковуглецева сталь використовується як електродний дріт для зварювання хромонікелевих сталей. Це пов'язано з тим, що низьковуглецева сталь має низьку температуру плавлення, що полегшує її розплавлення і формування шва [35]. Крім того, низьковуглецева сталь має хорошу пластичність, що дозволяє їй деформуватися під час зварювання без утворення тріщин.

При вмісті вуглецю до 0,06% сталь можна піддавати короткочасному нагріванню в зоні температур 550-650°C без додаткової термообробки. Це пояснюється тим, що при такому вмісті вуглецю сталь має аустенітну структуру, яка є стійкою до дії високих температур [34].

Хромонікелеві аустенітні сталі широко використовуються для апаратури в хімічній промисловості. Це пов'язано з тим, що вони мають високу стійкість до корозії в агресивних середовищах. Хромонікелеві сталі використовуються для виготовлення таких деталей, як пічна арматура, теплообмінники, патрубки, колектори вихлопних систем.

Низьковуглецева сталь для зварювання хромонікелевих сталей повинна мати марку Св-08Г2С. Хромонікелеві аустенітні сталі також використовуються для виготовлення медичних інструментів, посуду, сантехніки та інших виробів, які контактують з водою та іншими рідинами [12, 34].

Сталі, стабілізовані титаном мають високу стійкість до корозії, навіть у агресивних середовищах, а також хороші механічні властивості. Титан в цих сталях виконує роль стабілізатора аустенітної структури. Аустенітна структура забезпечує високу стійкість до корозії, але вона також є більш пластичною і

менш міцною, ніж ферритна структура. Титан підвищує міцність аустенітної структури, не змінюючи її стійкості до корозії.

Сталі, стабілізовані титаном, широко використовуються в різних галузях промисловості. Вони є основним матеріалом для виготовлення деталей, які працюють в агресивних середовищах, таких як:

- а) Авіаційна та атомна техніка — сталь використовується для виготовлення деталей, які працюють при високих температурах і піддаються корозії.
- б) Хімічна промисловість — сталь використовується для виготовлення деталей, які контактують з агресивними хімічними речовинами.
- в) Морська промисловість — сталь використовується для виготовлення деталей, які контактують з морською водою.

В авіаційній промисловості сталь використовується для виготовлення деталей двигунів, лопаток турбін та інших деталей, які працюють при високих температурах і піддаються корозії. В атомній промисловості сталь використовується для виготовлення деталей реакторів, трубопроводів та інших деталей, які контактують з агресивними середовищами. В хімічній промисловості сталь використовується для виготовлення деталей хімічної апаратури, трубопроводів та інших деталей, які контактують з агресивними хімічними речовинами. В морській промисловості сталь використовується для виготовлення деталей суден, трубопроводів та інших деталей, які контактують з морською водою.

Сталі, стабілізовані титаном, — це цінний матеріал з широким спектром застосування. Вони мають високу стійкість до корозії, хороші механічні властивості та можуть використовуватися в різних галузях промисловості. Титан в цих сталях міститься в кількості від 0,05 до 0,3%. Сталі, стабілізовані титаном, мають високу температуру рекристалізації, що дозволяє їм витримувати високі температури без втрати механічних властивостей. Сталі, стабілізовані титаном, мають хорошу зварюваність [35, 36].

Сталі, стабілізовані ніобієм мають високу стійкість до корозії, навіть у агресивних середовищах, а також хороші механічні властивості. Ніобій в цих сталях виконує роль стабілізатора аустенітної структури. Аустенітна структура забезпечує високу стійкість до корозії, але вона також є більш пластичною і менш міцною, ніж ферритна структура. Ніобій підвищує міцність аустенітної структури, не змінюючи її стійкості до корозії.

Сталі, стабілізовані ніобієм, широко використовуються в різних галузях промисловості. Вони є основним матеріалом для виготовлення деталей, які працюють в агресивних середовищах, таких як:

- а) У авіабудуванні та суднобудуванні нержавіючі сталі, стабілізовані ніобієм, використовуються для виготовлення деталей, що піддаються впливу корозії, таких як корпуси літаків і суден, двигуни, системи трубопроводів та ін.
- б) У хімічній промисловості ці сталі використовуються для виготовлення обладнання, що контактує з агресивними середовищами, такими як кислоти, луги, розчини солей та ін.
- в) У нафтопереробці та нафтохімії нержавіючі сталі, стабілізовані ніобієм, використовуються для виготовлення трубопроводів, резервуарів, обладнання для переробки нафти та нафтопродуктів.
- г) У харчовій промисловості ці сталі використовуються для виготовлення обладнання, що контактує з харчовими продуктами, такими як посуд, ємності для зберігання, обладнання для переробки харчових продуктів та ін.
- д) У медицині нержавіючі сталі, стабілізовані ніобієм, використовуються для виготовлення імплантатів, інструментів та обладнання для медичних процедур.

Сталі, стабілізовані ніобієм, — це цінний матеріал з широким спектром застосування. Вони мають високу стійкість до корозії, хороші механічні властивості та можуть використовуватися в різних галузях промисловості.

Ніобій в цих сталях міститься в кількості від 0,05 до 0,3%. Сталі, стабілізовані ніобієм, мають високу температуру рекристалізації, що дозволяє їм витримувати високі температури без втрати механічних властивостей. Сталі, стабілізовані ніобієм, мають хорошу зварюваність.

Основні відмінності між сталями, стабілізованими титаном і ніобієм, спрощено зображені в Таблиці 1.

Таблиця 1 — Порівняльна таблиця стабілізуючих елементів Ti та Nb

Властивість	Сталі, стабілізовані титаном	Сталі, стабілізовані ніобієм
Вміст легуючого елемента	Титан	Ніобій
Збільшення міцності	До 20%	До 30%
Збільшення пластичності	До 10%	До 5%
Збільшення жаростійкості	До 200°C	До 300°C
Зварюваність	Добра	Добра
Вартість	Висока	Висока

Хромонікелеві сталі, стабілізовані титаном і містять молібден, - це сплави на основі заліза, леговані хромом, нікелем, титаном і молібденом. Вони мають високу стійкість до корозії, навіть у агресивних середовищах, а також хороші механічні властивості. Титан і молібден в цих сталях виконують роль стабілізаторів аустенітної структури. Аустенітна структура забезпечує високу стійкість до корозії, але вона також є більш пластичною і менш міцною, ніж феритна структура. Титан і молібден підвищують міцність аустенітної структури, не змінюючи її стійкості до корозії.

В цілому, сталі, стабілізовані титаном і молібденом, мають більш високі механічні властивості, ніж сталі, стабілізовані титаном. Вони також мають більш високу жаростійкість. Однак, вони також більш дорогі і складні в зварюванні.

Вуглець в аустенітних хромонікелевих сталях може перебувати у двох формах: у твердому розчині або у вигляді карбідів та карбонітрідів [38]. Більшість вчених вважають, що при температурах до 500-600°C вуглець у сталі розчиняється в кількості не більше 0,02%. Однак точно визначити цю величину складно, оскільки вуглець та хром погано дифундують при цих температурах. При нагріванні в аустенітних хромонікелевих сталях переважно утворюються карбіди хроматину $Cr_{23}C_7$ [23]. Аустенітні хромонікелеві сталі типу 18-8 зазвичай містять у структурі певну кількість фериту. Кількість фериту залежить від співвідношення елементів у складі сталі.

Збільшення вмісту кремнію, титану, ніобію, молібдену, алюмінію та хрому в аустенітних хромонікелевих сталях призводить до збільшення кількості фериту. Збільшення вмісту вуглецю, марганцю, нікелю, міді, бору та азоту, навпаки, призводить до зменшення кількості фериту. Дія цих елементів неоднакова. Кількість фериту в аустенітних хромонікелевих сталях залежить не тільки від хімічного складу, але також від температури та умов затвердіння зливка.

Хромонікелеві сталі після загартування мають високу гнучкість. Збільшення вмісту вуглецю (і азоту) також підвищує міцність і твердість хромонікелевих сталей, як у загартованому, так і в зістареному стані. Чим вище температура загартування хромонікелевих сталей, тим менше їх міцність і твердість, але тим вища гнучкість. При холодній деформації хромонікелевих сталей їх міцність, твердість і тріщиностійкість значно зростають, а гнучкість знижується, але зберігається на досить високому рівні. При холодній деформації хромонікелевих сталей їх магнітні властивості змінюються, особливо у низьковуглецевої сталі. У цілому, можна зробити висновок, що хромонікелеві сталі мають високу пластичність, яка може бути ще більше підвищена за рахунок холодної деформації. Міцність і твердість хромонікелевих сталей також можна підвищити за рахунок зміни хімічного складу та режиму термічної обробки.

Під час нагрівання сталі в ній починають утворюватися карбіди. Цей процес починається при температурі 400-500°C, а помітно проявляється при 600-700°C. Найбільш інтенсивно карбіди утворюються при 800-900°C. При більш високих температурах, крім коагуляції карбідів, відбувається зворотний процес - розчинення карбідів у сталі [22, 23]. Ці процеси необхідно враховувати при термічній обробці сталі, оскільки вони суттєво впливають на її механічні та антикорозійні властивості.

У присутності титану і ніобію карбіди в сталі розчиняються при більш високих температурах. Хромонікелеві окалиностійкі сталі з підвищеним вмістом хрому і нікелю мають високу стійкість до корозії в окислювальних середовищах. Вони також мають високу міцність і твердість, і можуть працювати при високих температурах. Ці сталі застосовуються у вигляді лиття, прокату, поковок, листів та інших виробів. Вони використовуються в апаратурі, яка працює при температурах від 800 до 1000°C.

Титан і ніобій є стабілізаторами аустеніту, що означає, що вони запобігають утворенню карбідів хрому. Кремній і бор також підвищують стійкість сталі до корозії.

Вміст вуглецю у деформованих сталях зазвичай не перевищує 0,20%, а у литих може досягати 0,50%. За структурою деформовані сталі бувають аустенітними, аустеніто-мартенситними та аустеніто-феритними. Тривале нагрівання деформованих сталей при 600-900°C призводить до зниження в'язкості та пластичності. При цьому в сталі утворюється фаза. Кремній збільшує схильність сталі типу 25-20 до утворення σ -фази при тривалому нагріванні при помірних температурах. Це призводить до зниження пластичності та в'язкості сталі [38].

σ -фаза — це тверда фаза, яка утворюється в сталі при тривалому нагріванні. Вона є крихкою і знижує механічні властивості сталі. Кремній є легуючим елементом, який підвищує міцність сталі. Однак він також збільшує схильність сталі до утворення σ -фази.

Введення аустенітоутворюючих елементів, таких як нікель, в 18% хромисту сталь призводить до різких змін її магнітних і механічних властивостей.

При цьому відбувається пригнічення евтектоїдного розпаду $\gamma \rightarrow \alpha$, тобто утворення фериту при 727°C . Знижується температура мартенситного перетворення, що дозволяє отримувати мартенситну структуру при більш низьких температурах загартування.

Найбільш сильні зміни властивостей (Рисунок 1.3) спостерігаються при вмісті нікелю 5,5%. При цьому сталь стає повністю аустенітною, що призводить до зниження її магнітних властивостей і підвищення механічних властивостей.

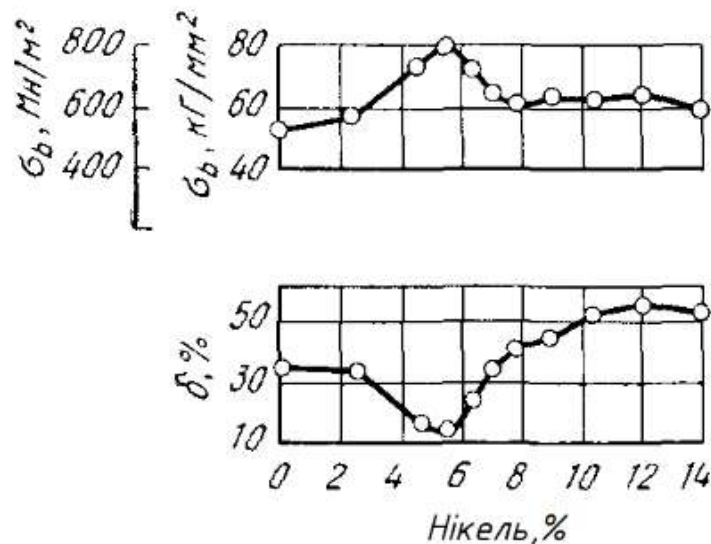


Рисунок 1.3 — Вплив нікелю на зміну механічних властивостей 18%-вих хромистих сталей.

Механічні та фізичні властивості цих сталей визначаються кількістю аустеніту, що перейшов до мартенситу, та додатковими процесами карбідного та інтерметалідного зміцнення.

1.3.3. Хромомарганцеві і хромомарганцевонікелеві сталі

Нержавіючі сталі, в яких замінений нікель на марганець, мають підвищену стійкість до зносу та міцність. Це пов'язано з тим, що марганець є менш ефективним аустенітоутворюючим елементом, ніж нікель, але при цьому є більш ефективним зміцнювальним елементом. Для отримання аустенітної структури марганцю потрібно вводити в більших кількостях, ніж нікелю, але це не є проблемою, оскільки марганець є більш доступним і дешевшим елементом. Марганцеві нержавіючі сталі застосовуються в областях, де важлива зносостійкість і міцність, наприклад, в машинобудуванні, будівництві та хімічній промисловості [1, 2].

Хромомарганцеві сталі з вмістом хрому понад 15% не можуть утворювати аустенітну структуру лише за рахунок марганцю. Для цього потрібно вводити нікель. При збільшенні вмісту нікелю в сталі аустенітна область розширюється, а при збільшенні вмісту марганцю більше 6% (при 15-20% хрому) вона звужується [23].

Марганець збільшує розчинність азоту в аустенітній структурі. Азот, в свою чергу, зміцнює аустенит і підвищує його стабільність. Механічні властивості марганцевих нержавіючих сталей залежать від структури та вмісту марганцю. При вмісті азоту близько 0,25% міцність підвищується, а пластичність знижується. Підвищення вмісту марганцю збільшує ударну в'язкість при низьких температурах.

Вироби, які піддаються зварюванню, повинні мати низький вміст вуглецю (не більше 0,05%). Це необхідно для запобігання міжкристалітної корозії в зварних з'єднаннях. Також важливо строго контролювати процес зварювання, щоб уникнути різких коливань хімічного складу. Коливання хімічного складу можуть негативно впливати на механічні властивості, тому важливо отримувати оптимальні співвідношення елементів [23].

Хромомарганцевонікелеві сталі з азотом і хромонікелеві сталі типу 18-8 мають приблизно однакові механічні властивості при високих температурах. Однак сталі з підвищеним вмістом азоту (0,5 та 0,8%) мають кращі властивості для спеціальних цілей.

Розділ 2

Методика дослідження

На підприємство КП «НВК „Іскра“» періодично повідомляли про випадки корозії деталей з нержавіючої сталі під час експлуатації виробів. Тому було прийнято рішення про початок дослідження випадків задля подальшого введення заходів щодо запобігання корозії.

2.1. Значення дослідження корозії нержавіючих сталей

Нержавіюча сталь — це сплав заліза з хромом, який має високу стійкість до корозії. Однак, навіть нержавіюча сталь може піддаватися корозії в певних умовах.

Основною причиною корозії нержавіючої сталі є:

Агресивні середовища, такі як кислоти, луги, солі, можуть викликати корозію нержавіючої сталі за рахунок розчинення хрому в ній. Хром утворює на поверхні нержавіючої сталі захисний шар оксиду хрому, який перешкоджає корозії. Однак, в агресивних середовищах цей шар руйнується, і нержавіюча сталь піддається корозії.

Висока температура може викликати корозію нержавіючої сталі за рахунок дифузії хрому всередину металу. Це відбувається внаслідок того, що при високій температурі швидкість дифузії хрому збільшується.

Низька температура може викликати корозію нержавіючої сталі за рахунок утворення на її поверхні тріщин. Ці тріщини утворюються внаслідок того, що при низькій температурі захисний шар оксиду хрому стає крихким.

Механічні пошкодження, такі як подряпини, задирки, можуть викликати корозію нержавіючої сталі за рахунок порушення цілісності захисного шару оксиду хрому.

Дослідження причин корозії нержавіючої сталі має важливе практичне значення. Воно дозволяє розробити ефективні методи запобігання та захисту нержавіючої сталі від корозії, що забезпечує її надійну роботу в різних умовах.

У промисловості нержавіюча сталь широко використовується для виготовлення обладнання, яке працює в агресивних середовищах, таких як нафтогазова, хімічна, харчова промисловість. Дослідження причин корозії нержавіючої сталі в таких середовищах дозволяє розробити матеріали і конструкції, які будуть більш стійкими до корозії. Наприклад, для виготовлення обладнання, яке працює в морській воді, використовуються нержавіючі сталі з високим вмістом хрому і молібдену. Хром утворює захисний шар оксиду хрому, а молібден підвищує стійкість до корозії в морській воді.

У будівництві нержавіюча сталь використовується для виготовлення фасадів, вікон, дверей, інших елементів, які піддаються впливу атмосферних чинників. Дослідження причин корозії нержавіючої сталі в атмосфері дозволяє розробити матеріали і конструкції, які будуть більш стійкими до корозії в таких умовах. Наприклад, для виготовлення фасадних панелей з нержавіючої сталі використовуються нержавіючі сталі з високим вмістом хрому і нікелю. Хром утворює захисний шар оксиду хрому, а нікель підвищує стійкість до корозії в атмосфері.

У побуті нержавіюча сталь використовується для виготовлення посуду, приладів, інших предметів, які контактують з харчовими продуктами. Дослідження причин корозії нержавіючої сталі в харчових продуктах дозволяє розробити матеріали і конструкції, які будуть більш безпечними для здоров'я людини. Наприклад, для виготовлення посуду з нержавіючої сталі використовуються нержавіючі сталі з високим вмістом хрому і молібдену. Хром утворює захисний шар оксиду хрому, а молібден підвищує стійкість до корозії в харчових продуктах.

Отже, дослідження причин корозії нержавіючої сталі має важливе значення для різних галузей промисловості та побуту. Воно дозволяє розробити ефективні методи запобігання та захисту нержавіючої сталі від корозії, що забезпечує її надійну роботу в різних умовах.

2.2. Технологічні порушення, що призводять до корозії нержавіючої сталі

Нержавіюча сталь є широко використовуваним матеріалом, який має високу стійкість до корозії. Однак навіть нержавіюча сталь може кородувати внаслідок технологічних порушень.

Технологічні порушення, які можуть призвести до корозії нержавіючої сталі, можна розділити на дві групи:

а) Порушення технології виготовлення нержавіючої сталі:

1) Порушення хімічного складу нержавіючої сталі:

— Недотримання встановленого вмісту хрому, який є основним елементом, що забезпечує стійкість нержавіючої сталі до корозії.

— Недотримання встановленого вмісту інших елементів, таких як нікель, марганець, молібден, які також впливають на стійкість нержавіючої сталі до корозії.

2) Порушення режимів термічної обробки нержавіючої сталі:

— Недотримання температури і часу термічної обробки, що може призвести до порушення структури нержавіючої сталі і, як наслідок, до зниження її стійкості до корозії.

3) Порушення технології зварювання нержавіючої сталі:

— Недотримання режимів зварювання, що може призвести до утворення зон з підвищеною концентрацією вуглецю, які є більш схильними до корозії.

б) Порушення технології експлуатації нержавіючої сталі:

1) Неправильне використання нержавіючої сталі в агресивних середовищах:

— Використання нержавіючої сталі в середовищах, які містять концентровані кислоти, луги або солі, які можуть викликати корозію нержавіючої сталі.

2) Недотримання умов експлуатації нержавіючої сталі:

— Пошкодження нержавіючої сталі механічними силами, такими як подряпини та тріщини, які можуть стати причиною корозії.

Приклади технологічних порушень, що призводять до корозії нержавіючої сталі:

— Виробництво нержавіючої сталі з підвищеним вмістом вуглецю (> 0,08%). Це може призвести до міжкристалітної корозії, яка робить метал крихким і сприйнятливим до руйнування.

— Виробництво нержавіючої сталі з нерівномірним розподілом хімічних елементів. Це може призвести до зниження стійкості до корозії в місцях з підвищеною концентрацією домішок.

— Недотримання температурного режиму при термічній обробці нержавіючої сталі. Це може призвести до утворення нерівномірної структури металу, яка є більш схильною до корозії.

— Недотримання технології зварювання нержавіючої сталі. Це може призвести до утворення зон з підвищеною концентрацією вуглецю, які є більш схильними до корозії.

— Використання нержавіючої сталі в агресивних середовищах, які вона не призначена витримувати. Наприклад, нержавіюча сталь не повинна використовуватися в середовищах, які містять концентровані кислоти, луги або солі, які можуть викликати корозію нержавіючої сталі.

— Пошкодження нержавіючої сталі механічними силами. Це може призвести до утворення зон з підвищеною концентрацією домішок, які є більш схильними до корозії.

Порушення технології виготовлення нержавіючої сталі можна виявити за допомогою різних методів, зокрема:

а) Візуальний контроль: При візуальному контролі можна виявити такі ознаки порушення технології виготовлення нержавіючої сталі, як:

- 1) Нерівномірність кольору поверхні металу;
- 2) Поява темних плям, смуг або інших дефектів;
- 3) Поява тріщин або інших пошкоджень.

б) Механічні випробування: Механічні випробування дозволяють оцінити міцнісні характеристики нержавіючої сталі. Порушення технології виготовлення може призвести до зниження міцності металу, що може бути виявлено в ході випробувань.

в) Хімічний аналіз: Хімічний аналіз дозволяє точно визначити вміст основних елементів у нержавіючій сталі. Для цього використовуються такі методи, як спектральний аналіз, рентгеноспектральний аналіз або атомно-абсорбційний аналіз.

г) Металографічний аналіз: Металографічний аналіз дозволяє вивчити структуру нержавіючої сталі під мікроскопом. Порушення технології виготовлення може призвести до зміни структури металу, що може бути виявлено в ході металографічного аналізу.

2.3. Методи виявлення технологічних порушень

2.3.1. Випробування на твердість

Випробування на твердість — це метод визначення механічних властивостей матеріалів, зокрема міцності, пластичності, зносостійкості та корозійної стійкості.

Випробування на твердість проводять шляхом впровадження у досліджуваний матеріал твердого тіла певної форми і розміру. Твердість

матеріалу визначається за величиною сили, необхідної для проникнення твердого тіла в матеріал на задану глибину.

Існує багато різних методів випробувань на твердість. Найпоширенішими методами є:

- Випробування на твердість за Брінеллем;
- Випробування на твердість за Роквеллом;
- Випробування на твердість за Віккеромсом.

Випробування на твердість за Брінеллем проводять за допомогою індентора у формі кулі з алмазного сплаву. Індентор впроваджується в досліджуваний матеріал під навантаженням, що поступово збільшується до заданого значення. Після зняття навантаження на поверхні матеріалу залишається відбиток у вигляді кратера.

Твердість матеріалу за Брінеллем визначається за формулою:

$$HB = F \cdot \sqrt{\frac{A}{d^2}} \quad (2.1)$$

де HB — твердість за Брінеллем;

F — навантаження, що прикладається до індентора;

A — площа основи відбитка;

d — діаметр індентора.

Випробування на твердість за Роквеллом проводять за допомогою індентора у формі алмазного конуса або кулі з твердого сплаву. Індентор впроваджується в досліджуваний матеріал під навантаженням, що поступово збільшується до заданого значення. Після зняття навантаження на поверхні матеріалу залишається відбиток у вигляді кратера.

Твердість матеріалу за Роквеллом визначається за формулою:

$$HB = A - \frac{B}{C} \quad (2.2)$$

де HR — твердість за Роквеллом;

A — число, що відповідає величині навантаження, що прикладається до індентора при першому ході;

B — число, що відповідає величині навантаження, що прикладається до індентора при другому ході;

C — постійна величина, яка залежить від типу індентора.

Випробування на твердість за Віккерсом проводять за допомогою індентора у формі чотирикутної піраміди з алмазного сплаву. Індентор впроваджується в досліджуваний матеріал під навантаженням, що поступово збільшується до заданого значення. Після зняття навантаження на поверхні матеріалу залишається відбиток у вигляді кратера.

Твердість матеріалу за Віккерсом визначається за формулою:

$$HV = 1,02 \cdot \frac{F}{d^2} \quad (2.3)$$

де: HV — твердість за Віккерсом;

F — навантаження, що прикладається до індентора;

d — відстань між протилежними вершинами відбитка.

Застосування випробувань на твердість

Випробування на твердість широко застосовуються в різних галузях промисловості, зокрема у металургії для контролю якості металу; у машинобудуванні для оцінки міцності деталей; у будівництві для оцінки міцності будівельних матеріалів; у нафтогазовій промисловості для оцінки корозійної стійкості трубопроводів.

Випробування на твердість мають ряд переваг, зокрема:

- Вони є простими у виконанні;
- Вони є швидкими;
- Вони є недорогими.

Випробування на твердість мають також деякі недоліки, зокрема:

- Вони не дозволяють оцінити всі механічні властивості матеріалу;
- Вони не дозволяють виявити внутрішні дефекти в матеріалі.

2.3.2. Металографічний аналіз

Металографічний аналіз — це метод дослідження структури металів і сплавів під мікроскопом. Він дозволяє вивчити форму, розмір і розподіл кристалів, а також наявність різних дефектів, таких як тріщини, пори або інші несплошності.

Металографічний аналіз являє собою важливий метод контролю якості металів і сплавів. Він дозволяє оцінити міцність, зносостійкість, корозійну стійкість і інші властивості металу.

Металографічний аналіз проводиться в кілька етапів:

а) Підготовка зразка.

Спочатку зразок металу необхідно підготувати до дослідження. Для цього зразок шліфують, полірують і травлять.

1) Шліфування дозволяє видалити з поверхні зразка нерівності і дефекти. Для шліфування використовуються абразивні матеріали, такі як наждачний папір або абразивні круги.

2) Полірування дозволяє отримати гладку поверхню, необхідну для чіткого зображення під мікроскопом. Для полірування використовуються поліруючі пасти або порошки.

3) Травлення дозволяє виділити на поверхні зразка мікроструктуру металу. Для травлення використовуються кислоти, луги або інші хімічні речовини.

б) Вивчення мікроструктури.

Після підготовки зразка його розглядають під мікроскопом. Мікроскоп дозволяє збільшити зображення зразка до кількох тисяч разів.

При вивченні мікроструктури металу фахівець звертає увагу на такі характеристики:

— Форма кристалів

Кристали металів можуть мати різні форми, такі як кубічну, гексагональну, ромбічна та інші. Форма кристалів впливає на міцність, пластичність і інші властивості металу.

— Розмір кристалів

Розмір кристалів також впливає на властивості металу. Великі кристали роблять метал більш міцним, але менш пластичним. Малі кристали роблять метал більш пластичним, але менш міцним.

— Розподіл кристалів

Розподіл кристалів також важливий для властивостей металу. Рівномірний розподіл кристалів забезпечує високі механічні властивості металу.

— Наявність дефектів

Дефекти можуть бути викликані різними причинами, такими як неякісна сировина, неправильна технологія виготовлення або зовнішні впливи. Дефекти можуть значно погіршити властивості металу.

— Оцінка результатів

Після вивчення мікроструктури складається висновок про стан металу. Висновок може включати в себе такі відомості як форма і розмір кристалів; розподіл кристалів; наявність дефектів; причини дефектів; вплив дефектів на властивості металу.

Металографічний аналіз широко застосовується в різних галузях промисловості, зокрема у металургії для контролю якості металу, у машинобудуванні для виявлення дефектів у виробах, у будівництві для контролю якості будівельних матеріалів, у нафтогазовій промисловості для виявлення корозії на трубопроводах.

Металографічний аналіз має ряд переваг, зокрема:

— Він дозволяє отримати чітке зображення мікроструктури металу;

— Він дозволяє виявити навіть незначні дефекти;

— Він є недорогим і простим у виконанні методом.

Металографічний аналіз має також деякі недоліки, зокрема:

— Він вимагає певних навичок і знань для проведення;

— Він є дещо трудомістким методом.

2.3.3. Аналіз хімічного складу

Аналіз хімічного складу нержавіючих сталей спектральним методом проводиться шляхом вимірювання інтенсивності спектральних ліній, що випромінюються або поглинаються атомами або молекулами досліджуваного матеріалу.

Спектральний аналіз — це метод, який використовується для визначення складу речовини на основі її спектра випромінювання або поглинання. Спектр речовини — це сукупність хвиль або частот, які випромінюються або поглинаються речовиною.

Для аналізу хімічного складу нержавіючих сталей спектральним методом використовуються різні види спектрів, зокрема:

Емісійний спектр — це спектр, який випромінюється речовиною.

Поглиналий спектр — це спектр, який поглинається речовиною.

Емісійний спектр нержавіючих сталей досліджується за допомогою спектрографа. Спектрограф — це пристрій, який розділяє випромінювання на спектральні лінії. Інтенсивність спектральних ліній залежить від концентрації відповідного елемента в досліджуваному матеріалі.

Поглиналий спектр нержавіючих сталей досліджується за допомогою спектрофотометра. Спектрофотометр — це пристрій, який міряє інтенсивність випромінювання на різних частотах. Інтенсивність поглинання спектральних ліній залежить від концентрації відповідного елемента в досліджуваному матеріалі.

Найбільш поширеним методом спектрального аналізу нержавіючих сталей є емісійний спектральний аналіз.

Етапи спектрального аналізу нержавіючих сталей:

а) Підготовка зразка

Спочатку зразок нержавіючої сталі необхідно підготувати до аналізу. Зразок повинен бути чистим і рівномірним. Для цього зразок очищають від бруду, окалини та інших забруднень.

б) Взяття проби

Для аналізу використовуються невеликі проби нержавіючої сталі. Розмір проби залежить від методу спектрального аналізу, який буде використовуватися.

в) Отримання випромінювання

Для отримання випромінювання зразок нержавіючої сталі нагрівається до високої температури. В результаті нагрівання атоми або молекули зразка випромінюють спектральні лінії.

г) Розділ випромінювання на спектральні лінії

Спектр випромінювання, що надходить від зразка, розділяється на спектральні лінії за допомогою спектрографа.

д) Вимірювання інтенсивності спектральних ліній

Інтенсивність спектральних ліній вимірюється за допомогою фотоприймача.

е) Розрахунок концентрації елементів

Концентрація елементів в зразку визначається за допомогою таблиць, які містять інформацію про інтенсивність спектральних ліній різних елементів.

Переваги спектрального аналізу нержавіючих сталей:

— Цей метод дозволяє визначати склад нержавіючих сталей з високою точністю.

— Цей метод може бути використаний для визначення складу нержавіючих сталей з будь-яким вмістом елементів.

Недоліки спектрального аналізу нержавіючих сталей:

— Цей метод є досить дорогим.

— Цей метод вимагає кваліфікованого персоналу для проведення аналізу.

Аналіз хімічного складу нержавіючих сталей хімічним методом проводиться шляхом розчинення зразка нержавіючої сталі в кислоті або іншому розчиннику і подальшого визначення концентрації елементів у розчині.

Хімічний метод — це метод, який використовується для визначення складу речовини шляхом її розчинення і подальшого визначення концентрації елементів у розчині.

Для аналізу хімічного складу нержавіючих сталей хімічним методом використовуються різні кислоти, зокрема:

Сірчана кислота — використовується для розчинення нержавіючих сталей з низьким вмістом вуглецю.

Фосфорна кислота — використовується для розчинення нержавіючих сталей з високим вмістом вуглецю.

Після розчинення зразка нержавіючої сталі в кислоті концентрація елементів у розчині визначається за допомогою різних методів, зокрема:

Титрування — це метод, який використовується для визначення концентрації речовини в розчині шляхом додавання до розчину стандартного розчину іншої речовини.

Фотометричний аналіз — це метод, який використовується для визначення концентрації речовини в розчині шляхом вимірювання інтенсивності поглинання світла розчином.

Найбільш поширеним методом хімічного аналізу нержавіючих сталей є титрування.

Етапи хімічного аналізу нержавіючих сталей:

а) Підготовка зразка.

Спочатку зразок нержавіючої сталі необхідно підготувати до аналізу. Зразок повинен бути чистим і рівномірним. Для цього зразок очищають від бруду, окалини та інших забруднень.

б) Взяття проби.

Для аналізу використовуються невеликі проби нержавіючої сталі. Розмір проби залежить від методу хімічного аналізу, який буде використовуватися.

в) Розчинення зразка.

Зразок нержавіючої сталі розчиняється в кислоті.

г) Титрування.

До розчину, який містить розчинені елементи, додається стандартний розчин іншої речовини. Концентрація елементів у розчині визначається за допомогою таблиць, які містять інформацію про кількість стандартного розчину, необхідного для титрування певної кількості елементів.

д) Розрахунок концентрації елементів.

Концентрація елементів в зразку визначається за допомогою формул, які враховують кількість стандартного розчину, необхідного для титрування, і об'єм розчину, який містить розчинені елементи.

Переваги хімічного аналізу нержавіючих сталей:

— Цей метод є відносно недорогим.

— Цей метод може бути використаний для визначення складу нержавіючих сталей з будь-яким вмістом елементів.

Недоліки хімічного аналізу нержавіючих сталей:

— Цей метод є менш точним, ніж спектральний аналіз.

— Цей метод вимагає більшої кількості часу для проведення аналізу.

2.4. Задійснена апаратура

На підприємстві використана наступна апаратура:

— Електропіч: СНОЛ 2.4.2/11 и2.

— Твердоміри: ТК-2, ПМТ-3.

— Мікроскопи: МИМ8М, МЕТАМ-Р1.

2.4.1. Піч СНОЛ 2.4.2/11 и2.

СНОЛ 2.4.2/11 и2 — це лабораторна муфельна піч з електричним нагрівом, призначена для термообробки матеріалів в широкому діапазоні температур (до 1100 °С).

Піч складається з наступних основних частин:

Муфель — це робоча камера, в якій відбувається термообробка. Муфель виготовлений з вогнетривкої кераміки і має розміри 200 × 400 × 200 мм. Муфель закритий з усіх боків, що забезпечує рівномірний нагрів і запобігає потраплянню в робочу камеру атмосферних газів.

Нагрівальні елементи — це елементи, які забезпечують нагрівання муфеля. Нагрівальні елементи в СНОЛ 2.4.2/11 и2 розташовані по периметру муфеля і забезпечують рівномірний нагрів. Нагрівальні елементи виготовлені з ніхромю, який є високотемпературним сплавом з високою стійкістю до корозії.

Система управління — це система, яка дозволяє контролювати температуру і інші параметри термообробки. Система управління в СНОЛ 2.4.2/11 и2 є цифровою і дозволяє встановлювати і контролювати температуру з точністю до ± 3 °С. Система управління також дозволяє встановлювати задану програму термообробки, яка буде автоматично виконуватися.

Піч СНОЛ 2.4.2/11 и2 широко застосовується в різних галузях промисловості, зокрема у металургії для термообробки металів, таких як сталі, сплави, кольорові метали. Термообробка металів дозволяє отримати необхідні властивості матеріалу, такі як міцність, твердість, пластичність, корозійна стійкість тощо. У машинобудуванні для термообробки деталей машин і обладнання. У будівництві для термообробки будівельних матеріалів. Термообробка будівельних матеріалів дозволяє підвищити їх міцність, стійкість до впливу навколишнього середовища тощо. Піч дозволяє випалювати кераміку, порошкові фарби.

До переваг СНОЛ 2.4.2/11 и2 можна віднести високу надійність і довговічність. Піч СНОЛ 2.4.2/11 и2 виготовлена з високоякісних матеріалів і має міцну конструкцію. Вона забезпечує тривалий термін служби. Широкий діапазон робочих температур. Піч СНОЛ 2.4.2/11 и2 дозволяє нагрівати матеріали до температури до 1100 °С. Це дозволяє проводити широкий спектр термообробних операцій. Точне регулювання температури. Система управління СНОЛ 2.4.2/11 и2 дозволяє встановлювати і контролювати температуру з точністю до 1 °С. Це забезпечує високу якість термообробки. Простота в експлуатації. Піч СНОЛ 2.4.2/11 и2 проста в експлуатації. Вона має зрозуміле управління і не вимагає спеціальних навичок для використання.

Недоліками СНОЛ 2.4.2/11 и2 являється висока вартість. Піч СНОЛ 2.4.2/11 и2 є відносно дорогим обладнанням.

2.4.2. Твердомір ТК-2

Твердомір ТК-2 — це механічний твердомір, який використовується для визначення твердості матеріалів за методом Роквелла. Твердомір ТК-2 є одним з найпоширеніших твердомірів у світі.

Принцип роботи твердоміра ТК-2 полягає в наступному:

П'ята твердоміра встановлюється на поверхню досліджуваного матеріалу. До індентора прикладається навантаження, яке поступово збільшується до заданого значення. Після зняття навантаження на поверхні матеріалу залишається відбиток у вигляді кратера. Глибина впровадження індентора визначається за допомогою пристрою для вимірювання глибини.

Твердомір ТК-2 може використовуватися з різними типами інденторів. Конус з алмазним наконечником - використовується для визначення твердості матеріалів з твердістю від 20 до 100 HRC. Куля з алмазним наконечником —

використовується для визначення твердості матеріалів з твердістю від 10 до 70 HRC.

Застосування твердоміра ТК-2

Твердомір ТК-2 широко застосовується в різних галузях промисловості, зокрема у металургії для контролю якості металу; у машинобудуванні для оцінки міцності деталей; у будівництві для оцінки міцності будівельних матеріалів; у нафтогазовій промисловості для оцінки корозійної стійкості трубопроводів.

Твердомір ТК-2 має ряд переваг, зокрема:

- Він є простим у використанні;
- Він є недорогим;
- Він має високу точність.

Твердомір ТК-2 має також деякі недоліки, зокрема:

- Він не дозволяє визначати твердість матеріалів з твердістю нижче 10 HRC;
- Він не дозволяє визначати твердість матеріалів з твердістю вище 100 HRC.

2.4.3. Мікротвердомір ПМТ-3

Мікротвердомір ПМТ-3 — це прилад для виміру мікротвердості матеріалів, сплавів. В основі його роботи лежить метод вдавлювання в досліджуваний матеріал алмазного наконечника Віккерса з квадратним підставою чотиригранної піраміди.

Штатив складається з підстави, колонки, предметного столика та тубуса. На підставі розташовані ручки управління механізмом нагрівання. Колонка підтримує тубус, в якому розташований мікроскоп. Предметний столик забезпечує горизонтальне переміщення зразка.

Головка мікротвердомера складається з корпусу, в якому розташований механізм нагрівання, та власника наконечника. Механізм нагрівання забезпечує плавне збільшення навантаження від 0,0196 до 4,9 Н. Власник наконечника дозволяє міцно закріпити наконечник у головці мікротвердомера.

Накінецьник Віккерса виготовляється з алмазу і має форму чотиригранної піраміди з квадратним підставою. Сторона підстави наконечника становить 0,2 мм.

Мікроскоп мікротвердомера має три ступені збільшення: 130, 500 та 800. За допомогою мікроскопа можна спостерігати за процесом вдавлювання наконечника в досліджуваний матеріал і виміряти розмір відбитка.

Для проведення вимірювання мікротвердості необхідно:

- а) Підготувати зразок. Зразок повинен бути очищений від забруднень і охолодженим.
- б) Встановити зразок на предметний столик мікротвердоміра.
- в) Вибрати накінецьник відповідного розміру.
- г) Встановити потрібне навантаження.
- д) Виконати вимірювання.

Отримані результати вимірювання мікротвердості виражаються в одиницях твердості Віккерса (HV).

Мікротвердомір ПМТ-3 широко застосовується в різних галузях промисловості, науки та техніки. Він використовується для контролю якості матеріалів, дослідження мікроструктури матеріалів, визначення твердості поверхонь і т.д.

Перевагами мікротвердомера ПМТ-3 можна назвати простоту в експлуатації, висока точність вимірювань, широкий діапазон вимірюваних твердостей.

Мікротвердомір ПМТ-3 — це надійний і точний прилад, який дозволяє ефективно вирішувати завдання виміру мікротвердості матеріалів.

2.4.4. Мікроскоп МИМ-8М

Мікроскоп МИМ-8М — це горизонтальний металографічний мікроскоп (Рисунок 7), призначений для дослідження мікроструктури металів у світловому полі при прямому та косому освітленні, а також у темному полі та в поляризованому світлі.

Мікроскоп має наступні характеристики:

- Збільшення: від 100х до 1350х;
- Об'єктиви: ахроматичні та апохроматичні;
- Окуляри: збільшення 10х і 15х;
- Насадки: монокулярна і бінокулярна;
- Освітлення: електричне;
- Система фокусування: механічна;
- Пристосування для фотографування: фотокамера.

Мікроскоп МИМ-8М застосовується в металографічних лабораторіях НДІ та промислових підприємств. Він використовується для дослідження мікроструктури металів, сплавів, пластмас, кераміки та інших матеріалів.

Мікроскоп має ряд переваг, серед яких:

- Широкий діапазон збільшення;
- Висока якість зображення;
- Простота в експлуатації;
- Надійність.

Мікроскоп МИМ-8М — це універсальний інструмент, який може використовуватися для різних досліджень мікроструктури матеріалів. Він є популярним вибором для лабораторій, де потрібна якісне зображення мікроструктури.

Розділ 3

Дослідження зразків

3.1. Вибір досліджуваних параметрів.

Одна з найважливіших задач наукового дослідження — це вибір параметрів, які будуть досліджуватися. Від правильності цього вибору залежить успіх дослідження і отримання достовірних результатів.

З огляду на технологічні порушення приведені в п.2.2, що призводять до корозії нержавіючої сталі, був визначений порядок дослідження.

а) Дослідження хімічного складу сталі в прокаті.

б) Випробування на твердість після “класичних” та експериментальних режимів термічної обробки.

в) Металографічний аналіз після “класичних” та експериментальних режимів термічної обробки.

Твердість і міцність нержавіючої сталі тісно пов'язані між собою і мають пряму залежність. Твердість визначає, наскільки легко матеріал можна подряпати або пошкодити, а міцність визначає, наскільки добре матеріал може протистояти деформації або руйнації. У випадку нержавіючої сталі твердість є хорошим показником міцності.

Існує кілька причин, чому замість випробування на твердість та міцність нержавіючої сталі достатньо провести тільки випробування на твердість. По-перше, твердість вимірюється відносно легко, а міцність вимірюється складніше. По-друге, твердість є більш чутливим до змін складу і структури матеріалу, ніж міцність. По-третє, твердість можна виміряти без руйнування зразка, що може бути важливо для деяких застосувань. По-четверте висока вартість дослідження на міцність в порівнянні з випробуванням на твердість.

У загальному випадку, випробування на твердість є ефективним способом оцінки міцності нержавіючої сталі. Тому було прийнято рішення про достатність випробувань на твердість.

Порушення умов експлуатації в температурному режимі та рівні вологості виключені у зв'язку фізичної неможливості експлуатації виробів підприємства, на яких помічені проблемні деталі, поза прийнятних умов експлуатації.

На підприємстві КП «НВК „Іскра“» “найпроблемнішою” була хроміста сталь мартенсітного класу — 30X13. Щоб уникнути технологічних порушень в інших марках сталей, були додатково обрані для дослідження найрозповсюдженіші у використанні на підприємстві типові представники:

- хромонікелевих сталей аустенітного класу — 12X18Н10Т;
- сільхромна сталь феритного класу 12X17.

3.2. Проведення дослідження

Дослідження хімічного складу прокату було довірено сторонній організації, котра провела хімічний аналіз поставлених до неї зразків хімічним та спектральним методами і підтвердила відповідність складу нормативним документам. Тому причину корозії треба шукати в технології виробництва деталей.

Після термічної обробки для покращення корозійної стійкості поверхні зразків, була проведена електрополіровка.

Для перевірки корозійної стійкості після термічної обробки зразки сталі залишалися на відкритому повітрі під навісом. Підвищена вологість повітря на час експерименту сприяла більш явним вираженням корозії. Наявність корозії перевірялась через 5, 10 та 20 діб.

3.2.1. Сталь 30X13

Для випробування були обрані два класичних режими та один, котрий в одиничних випадках використовується за технічними вимогами конструкторської документації на деяких деталях.

Першим є загартування при 1000°C з охолодженням на повітрі та відпуском при $180\text{-}220^{\circ}\text{C}$ (2 год.). Цей режим використовується для отримання твердості 46...52 HRC.

Другим є загартування при 1000°C з охолодженням на повітрі та відпуском при $630\text{-}650^{\circ}\text{C}$ (2 год.). Режим використовується для отримання твердості 26...32 HRC.

Третій режим був загартування при 1000°C з охолодженням на повітрі та відпуском при $550\text{-}580^{\circ}\text{C}$ (2 год.). Цей режим використовується за технічними вимогами для отримання твердості 38...45 HRC.

Для першого режиму металографічне дослідження показало (Рисунок 3.1) мартенсит і карбіди хрому, котрі накопичувалися на границях зерен, що повинно дати найкращі протикорозійні властивості.

Металографічне дослідження зразків після другого режиму (Рисунок 3.2) показало коагульовані карбіди хрому та феритно-карбідну суміш. Протикорозійні властивості повинні бути збережені.

Третій режим повинен буде показати зменшення корозиційної стійкості, так як відбувся розпад мартенситу на феритно-карбідну суміш та було виділення карбідів хрому, що збіднюють феритну матрицю (Рисунок 3.3).

Наявність корозії на зразках співпала з очікуваними результатами. Корозія була виявлена для зразків першого режиму — на 20ту добу, що є найкращим результатом; для другого — на 10ту добу; і для третього — на 5ту добу після залишення зразків на відкритому повітрі.

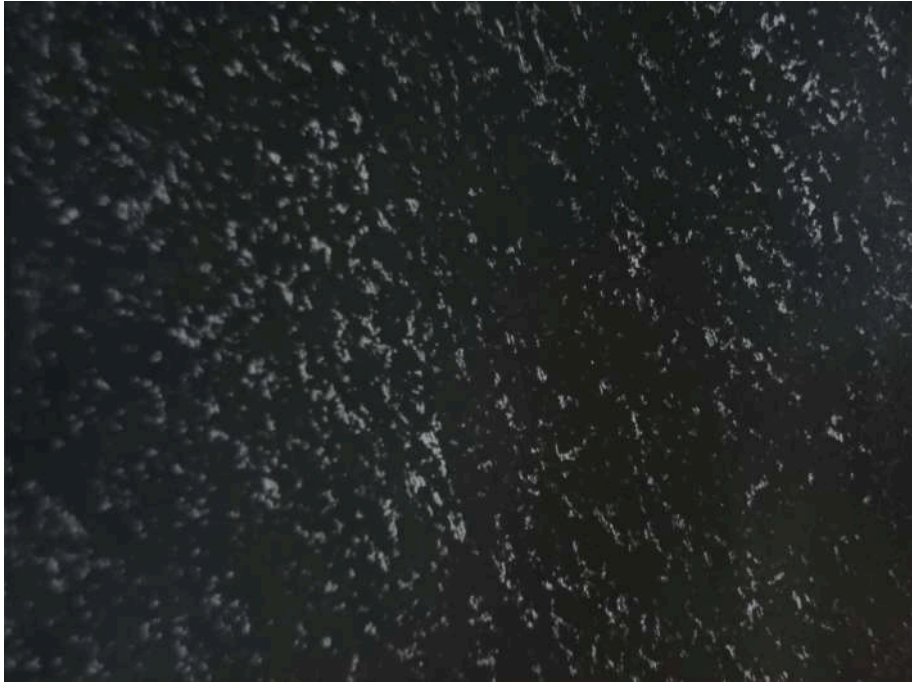


Рисунок 3.1 — Мартенсит і карбіди хрому



Рисунок 3.2 — Коагуляція карбідів хрому



Рисунок 3.3 — Виділення карбідів хрому

3.2.2. Сталь 12X17

Для випробування були обрані два режими. Перший — відпал при 740-760°C (2 год.), охолодження — повітря. Він використовується для відновлення стійкості проти корозії. Другий був обран як перегрів — відпал при 850-870°C (2 год.) з охолодженням на повітрі.

Металографічне дослідження показало для першого режиму (Рисунок 3.4) відсутність росту зерна фериту, що зберігає корозійну стійкість. Для другого, перегріву (Рисунок 3.5), — протилежний результат, — різкий ріст зерна фериту, що знижує корозійну стійкість. Явище це являється незворотнім та такий брак виправляється тільки металургійним шляхом.

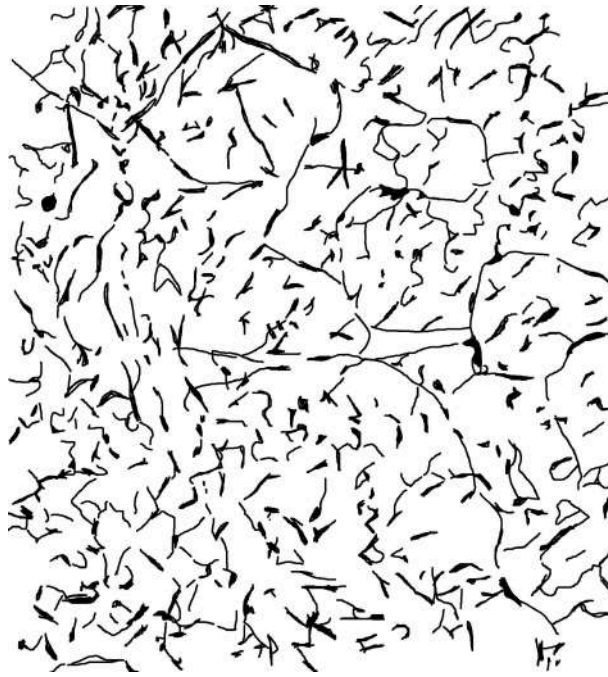


Рисунок 3.4 — Відсутність росту зерна фериту



Рисунок 3.5 — Різкий зріст зерна фериту

Результати були очікувані. Зразки з перегрівом показали точкову корозію вже на п'яту добу, в той час як режим для відновлення стійкості проти корозії не дав корозії, навіть, після двадцятої доби.

3.2.3. Сталь 12Х18Н10Т

Для сталі 12Х18Н10Т було обрано три режими термічної обробки. Першим стало загартування при 1000°C з охолодженням у воді. Другим — режим для зняття зварювальних напружень, а саме стабілізуюче відпалювання при 850–870°C (2-3 год.) та наступним охолодженням на повітрі. Третім було загартування при 1100°C, що являється для сталі перегрівом.

Металографічний аналіз показав що при загартуванні на 1000°C (Рисунок 3.6) спостерігається присутність карбідів хрому, що знижують крихітну стійкість. Режим для зняття зварювальних напружень на металографічному аналізі показав (Рисунок 3.7), що вуглець з карбідів хрому перейшов в карбіди титану та в твердий розчин, що означає процес вирівнювання складу аустеніту та підвищення рівня корозійної стійкості. А перегрів (Рисунок 3.8) дав зменшення кількості карбідів хрому за рахунок переходу в твердий розчин, що збільшує корозійну стійкість.

Після двадцяти діб жоден із зразків не показав жодних ознак корозії.



Рисунок 3.6 — Карбіди хрому

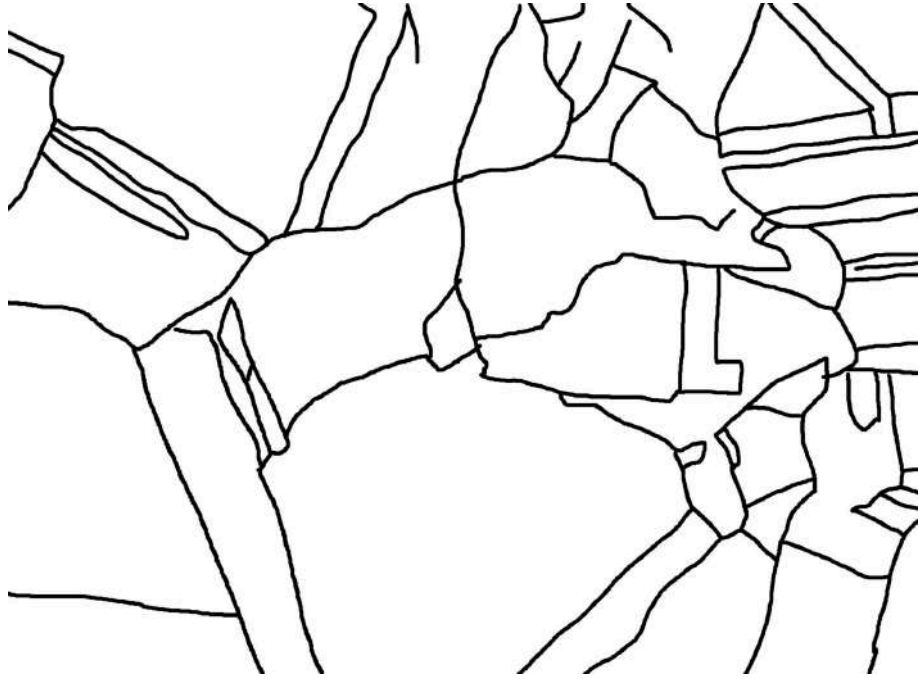


Рисунок 3.7 — Вирівнювання складу аустеніту



Рисунок 3.6 — Зменшення кількості карбідів хрому

3.3. Висновки

1) Термічна обробка проводиться для різних цілей — або для зняття напруги, або для забезпечення твердості, — призводить до розподілу хрому (збіднення основи — твердого розчину, виділення карбідів хрому, коагуляція та інше).

2) Збіднення твердого розчину хрому, за рахунок його виділення і розподілу краям зерен, призводить до погіршення корозійної стійкості.

3) Порушення рекомендованих режимів термічної обробки може призвести до присутності точкової корозії на поверхні деталей.

4) Присутність слідів точкової корозії (сталь 30X13) при обробці по “класичному” режиму могло бути спричинено:

— при загартуванні на твердість 46...52 HRC — наявність окалини на поверхні при загартуванні;

— при загартуванні на твердість 26...32 HRC — окалина при загартуванні та додаткова окісна плівка при високотемпературному відпуску; виділення великої кількості карбідів при розпаду мартенсіту, що закономірно приданому режимі; недостатня коагуляція карбідів хрому.

Висновки

У дипломній роботі розглянуто питання корозії нержавіючої сталі після термічної обробки. Проведено аналіз причин виникнення корозії.

На основі проведеного дослідження було встановлено, що корозія нержавіючої сталі після термічної обробки виникала внаслідок недотримання режимів термічної обробки. Неправильний вибір температури, часу нагрівання та охолодження може призвести до виникнення структурних дефектів, які сприяють корозії.

Для запобігання корозії нержавіючої сталі після термічної обробки необхідно дотримуватися режимів термічної обробки. Температура, час нагрівання та охолодження повинні відповідати вимогам нормативно-технічної документації.

У дипломній роботі також розглянуто питання впливу термічної обробки на корозійну стійкість нержавіючої сталі. Було встановлено, що термічна обробка може як підвищувати, так і знижувати корозійну стійкість сталі.

Підвищення корозійної стійкості відбувається внаслідок розчинення карбідів. При нагріванні до температури від 1000 до 1200 °С карбіди хрому розчиняються в аустеніті. Це підвищує вміст хрому в приповерхневому шарі, що сприяє утворенню захисної плівки. З підвищенням міцності сталі зменшується її чутливість до корозії.

Зниження корозійної стійкості відбувається внаслідок формування структурних дефектів. При неправильному виборі режимів термічної обробки можуть утворюватися структурні дефекти, такі як гартування, перегартування, сенсibiliзація. Ці дефекти сприяють розвитку корозії.

Для збереження та/або покращення корозійної стійкості сталі обов'язкове збереження однофазної структури при термічній обробці.

Допустимим, найбільш переважним являється низькотемпературний відпуск на твердість 45-55 HRC (зі збереженням однофазної структури),

Можливим являється високотемпературний відпуск на твердість 28-32 HRC (зі структурою коагульованих карбідів хрому).

Неприпустимим для збереження корозійної стійкості являється проміжний відпуск на твердість 35-45 HRC (матриця структури збіднюється хромом з причини його виділення на кордони зерен і корозійна стійкість різко падає).

На підприємстві будуть введені заходи для запобігання використанню неправильних режимів термічної обробки та при можливості заміні деталей на виробках, котрі були виготовлені з бракованими деталями.

Перелік джерел посилань

1. K.H. Lo, C.H. Shek, J. Lai. Recent developments in stainless steels. *Mater Sci Eng R Rep*, 65 (4–6) (2009), pp. 39-104.
2. Andrea Di Schino. *Manufacturing and Applications of Stainless Steels*. Dipartimento di Ingegneria, Università di Perugia. Italy; 2020. — 327 pages.
3. R.K. Gupta, N. Birbilis. The influence of nanocrystalline structure and processing route on corrosion of stainless steel: A review. *Corrosion Science*. Volume 92, March 2015, Pages 1-15.
4. R.K. Singh Raman, Rajeev K. Gupta. Oxidation resistance of nanocrystalline vis-à-vis microcrystalline Fe–Cr alloys. *Corrosion Science*. Volume 51, Issue 2, February 2009, Pages 316-321.
5. Сталі та сплави з особливими властивостями : навч. посіб. / О. П. Гапонова, А. Ф. Будник. — Суми: Сумський державний університет, 2014. — 240 с.
6. Попович, В. В. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство.: підручник / В. В. Попович, В. В. Попович. — Львів : Світ, 2006. — 624 с.
7. Технологія конструкційних матеріалів: Підручник М.А. Солгуб, І.О.Рожнецький, О.І. Некозтаїн.; За ред. М.А.Сологуба. — 2-ге вид., перероб. і допов. — К.: Вища школа., 2002. — 374с.
8. Leroy Gardner. Stability and design of stainless steel structures – Review and outlook. *Thin-Walled Structures* Volume 141, August 2019, Pages 208-216.
9. N.R. Baddoo. Stainless steel in construction: A review of research, applications, challenges and opportunities. *Journal of Constructional Steel Research* 64 (2008), Pages 1199–1206.
10. Tahchieva, A.B.; Llorca-Isern, N.; Cabrera, J.M. Duplex and super duplex stainless steels: Microstructure and property evolution by surface modification processes. *Metals* 2019, 9, 347.

11. Gennari, C.; Lago, M.; Bogre, B.; Meszaros, I.; Calliari, I.; Pezzato, L. Microstructural and corrosion properties of cold rolled laser welded UNS S32750 duplex stainless steel. *Metals* 2018, 8, 1074.
12. Peng, Y.; Chen, J.; Dong, J. Experimental data assessment and fatigue design recommendation for stainless steel welded joints. *Metals* 2019, 9, 723.
13. Luu, V.T.; Nguyen, T.A.N.; Hong, S.T.; Jeong, H.J.; Han, H.N. Feasibility of a two stage forming process of a 316L austenitic stainless steel with rapid electrically assisted annealing. *Metals* 2018, 8, 815.
14. Specification for the Design of Light Gauge Cold-Formed Stainless Steel Structural Members, American Iron and Steel Institute, 1968 — 123.
15. I. Arrayago, E. Real, L. Gardner. Description of stress–strain curves for stainless steel alloys. *Materials and Design* Volume 87, 15 December 2015, Pages 540-552.
16. Leroy Gardner, Xiang Yun Description of stress-strain curves for cold-formed steels. *Construction and Building Materials* Volume 189, 20 November 2018, Pages 527-538.
17. L. Gardner a, A. Insausti, K.T. Ng, M. Ashraf. Elevated temperature material properties of stainless steel alloys. *Journal of Constructional Steel Research*. Volume 66, Issue 5, May 2010, Pages 634-647.
18. Yating Liang, Timo Manninen, Ou Zhao. Elevated temperature material properties of a new high-chromium austenitic stainless steel. *Journal of Constructional Steel Research*. Volume 152, January 2019, Pages 261-273.
19. H. Gleiter. Nanocrystalline materials. *Progress in Materials Science*. Volume 33, Issue 4, 1989, Pages 223-315.
20. Terence G. Langdon. Twenty-five years of ultrafine-grained materials: Achieving exceptional properties through grain refinement. *Acta Materialia*. Volume 61, Issue 19, November 2013, Pages 7035-7059.
21. S.G. Wang, M. Sun, H.B. Han, K. Long, Z.D. Zhang. The high-temperature oxidation of bulk nanocrystalline 304 stainless steel in air. *Corrosion Science*. Volume 72, July 2013, Pages 64-72. T. Roland, D. Reirant, K. Lu,

J. Lu. Enhanced mechanical behavior of a nanocrystallised stainless steel and its thermal stability. *Materials Science and Engineering*. Volumes 445–446, 15 February 2007, Pages 281-288.

22. Rajeev K. Gupta, R.K. Singh Raman, Carl C. Koch, B.S. Murty Effect of Nanocrystalline Structure on the Corrosion of a Fe₂₀Cr Alloy. *International Journal of Electrochemical Science*. Volume 8, Issue 5, May 2013, Pages 6791-6806.

23. Li Liu, Ying Li, Fuhui Wang. Electrochemical Corrosion Behavior of Nanocrystalline Materials — a Review. *Journal of Materials Science & Technology*. Volume 26, Issue 1, January 2010, Pages 1-14.

24. J.W. Schultze, M.M. Lohrengel. Stability, reactivity and breakdown of passive films. Problems of recent and future research. *Electrochimica Acta*. Volume 45, Issues 15–16, 3 May 2000, Pages 2499-2513.

25. Khashayar Morshed-Behbahani, Nika Zakerin. A review on the role of surface nanocrystallization in corrosion of stainless steel. *Journal of Materials Research and Technology*. Volume 19, July–August 2022, Pages 1120-1147.

26. G. Sander, S. Thomas, V. Cruz, M. Jurg, N. Birbilis, X. Gao. On the corrosion and metastable pitting characteristics of 316L stainless steel produced by selective laser melting. *J Electrochem Soc*, 164 (6) (2017), p. 250.

27. A. Bekmurzayeva, W.J. Duncanson, H.S. Azevedo, D. Kanayeva. Surface modification of stainless steel for biomedical applications: revisiting a century-old material. *Mater Sci Eng C*, 93 (-) (2018), pp. 1073-1089.

28. X. Chen, J. Lu, L. Lu, K. Lu. Tensile properties of a nanocrystalline 316L austenitic stainless steel. *Scripta Mater*, 52 (10) (2005), pp. 1039-1044.

29. T. Roland, D. Reirant, K. Lu, J. Lu. Enhanced mechanical behavior of a nanocrystallised stainless steel and its thermal stability. *Mater Sci Eng, A*, 445 (-) (2007), pp. 281-288.

30. J. Azadmanjiri, C.C. Berndt, A. Kapoor, C. Wen. Development of surface nano-crystallization in alloys by surface mechanical attrition treatment (SMAT). *Crit Rev Solid State Mater Sci*, 40 (3) (2015), pp. 164-181.

31. K. Lu, J. Lu. Nanostructured surface layer on metallic materials induced by surface mechanical attrition treatment. *Mater Sci Eng, A*, 375–377 (2004), pp. 38-45.
32. F.B. Saada, Z. Antar, K. Elleuch, P. Ponthiaux, N. Gey. The effect of nanocrystallized surface on the tribocorrosion behavior of 304L stainless steel. *Wear*, 394 (-) (2018), pp. 71-79.
33. K.D. Ralston, N. Birbilis. Effect of grain size on corrosion: a review. *Corrosion*, 66 (7) (2010), p. 75005.
34. L. Liu, Y. Li, F. Wang. Electrochemical corrosion behavior of nanocrystalline materials—a review. *J Mater Sci Technol*, 26 (1) (2010), pp. 1-14.
35. B. Mahesh, R.S. Raman. Role of nanostructure in electrochemical corrosion and high temperature oxidation: a review. *Metall Mater Trans*, 45 (12) (2014), pp. 5799-5822.
36. R. Gupta, N. Birbilis. The influence of nanocrystalline structure and processing route on corrosion of stainless steel: a review. *Corrosion Sci*, 92 (-) (2015), pp. 1-15.
37. P.R. Roberge. *Corrosion engineering*. McGraw-Hill Education (2008). Pages 770.