

Міністерство освіти і науки України
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Інститут архітектури та будівництва «ІФНТУНГ-ДОННАБА»
Кафедра будівництва

Сівка Іван Іванович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 620.22:669.018.25
(індекс)

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

**Вплив технології зварювання на мікроструктуру зварних швів
теплообмінника**

(назва роботи)

Зварювання та споріднені технології

(назва освітньої програми)

G9 Прикладна механіка

(шифр і назва спеціальності)

Сівка Іван Іванович

(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

Науковий керівник Біщак Роман Теодорович, к.т.н. доц.

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

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

Андрусак А.В.

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Рецензент

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Івано-Франківськ – 2025

Інститут архітектури та будівництва «ІФНТУНГ-ДОННАБА»

Кафедра будівництва

Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр

Освітня програма зварювання та споріднені технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри _____

“ _____ ” _____ 2025 року

З А В Д А Н Н Я

НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Сівці Івану Івановичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема магістерської роботи. **Вплив технології зварювання на мікроструктуру зварних швів теплообмінника.**

керівник наукової роботи Біщак Роман Теодорович, к.т.н. доц.

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від _____ № _____

2. Строк подання студентом роботи _____

3. Вихідні дані до роботи: нержавіюча сталь теплообмінника, електроди для зварювання лабораторних взірців.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ. 1 Особливості зварювання нержавіючих та жаростійких сталей. 1.1 Матеріали та особливості зварних з'єднань теплообмінника. 1.2 Особливості зварювання нержавіючих та жаростійких сталей. 1.3 Аналіз способів ремонтного зварювання та наплавлення нержавіючих сталей. 2 Технологічна підготовка деталей до відновлення та методи усунення дефектів. 2.1 Підготовка деталей для відновлення. 2.2 Дефекти, що з'являються при зварюванні нержавіючої сталі і жароміцних сталей. 2.3 Дослідження причин та механізму виникнення холодних тріщин. 2.4 Характеристика існуючих способів усунення процесу появи холодних тріщин. 3 Методичні підходи експериментальних досліджень. 3.1 Експериментальні зварювальні заходи. 3.2 Методи підготовки та дослідження зразків. 4 Дослідження зварних з'єднань сталі AISI 321. 4.1 Формування моделі утворення холодних тріщин. 4.2 Визначення зварюваності. 4.3 Фізико-механічні властивості та хімічний склад досліджуваних матеріалів. 4.4 Дослідження мікроструктури зразків до термооброблення. 4.5 Вплив термічної обробки на структурний стан зварного шва аустенітної сталі AISI 312. Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу

12 слайдів презентації за матеріалами кваліфікаційної роботи.

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Розділ 1-4</i>	<i>Біщак Роман Теодорович</i>		

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
<i>1</i>	<i><u>Особливості зварювання нержавіючих та жаростійких сталей.</u></i>		
<i>1.1</i>	<i><u>Матеріали та особливості зварних з'єднань теплообмінника.</u></i>		
<i>1.2</i>	<i><u>Особливості зварювання нержавіючих та жаростійких сталей.</u></i>		
<i>2</i>	<i><u>Технологічна підготовка деталей до відновлення та методи усунення дефектів</u></i>		
<i>2.1</i>	<i><u>Підготовка деталей для відновлення</u></i>		
<i>2.2</i>	<i><u>Дефекти, що з'являються при зварюванні нержавіючої сталі і жароміцних сталей.</u></i>		
<i>3</i>	<i><u>Методичні підходи експериментальних досліджень</u></i>		
<i>4</i>	<i><u>Дослідження зварних з'єднань сталі AISI 321</u></i>		
	<i>Висновки.</i>		

Студент

(підпис)

Сівка І.І.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Біщак Р.Т.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Магістерська робота на тему «Вплив технології зварювання на мікроструктуру зварних швів теплообмінника» складається із 12 слайдів презентації, пояснювальної записки із 61 аркушів, 16 рисунків, 2 таблиць, 30 посилань на використану літературу та додатків.

Проведені дослідження параметрів зварювання та процес вибору оптимального режиму для отримання високоякісного зварного з'єднання, обрали оптимальний спосіб зварювання – аргонодугове, зі зварювальним струмом у діапазоні 70-100 А, виліт електрода 7 мм, та витрата аргону 6-8 л/хв. З використанням зварювальної установки Vitals AC/DC 2000, вольфрамового електрода діаметром 3 мм, зварювального дроту ОК Tigrod 19.85 діаметром 2,6 мм.

Вивчено мікроструктури зразків отриманих у поперечному перерізі заготовки. Зразок можна розділити на основні зони, що відрізняються структурою та властивостями: метал шва, основний метал та зона термічного впливу. Структура металу шва є дендритна (стовпчаста структура), осі дендритів орієнтовані у напрямку тепловідведення при кристалізації. Структура кореневої зони зварного шва сформована більш рівновісними кристалами, що мають так само, як і метал шва, дендритну, але більш дисперсну будову.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ЗВАРЮВАННЯ, ЗВАРНІ ШВИ, ЕЛЕКТРОД, ТЕПЛООБМІННИК, МІКРОСТРУКТУРА.

ABSTRACT

Master's thesis " The influence of welding technology on the microstructure of heat exchanger welds " consists of the 12 sheets of graphics, 61 pages of notes, 16 figures and 30 references to the literature.

The welding parameters and the process of selecting the optimal mode for obtaining a high-quality welded joint were studied, the optimal welding method was chosen - argon arc, with a welding current in the range of 70-100 A, an electrode protrusion of 7 mm, and an argon flow rate of 6-8 l/min. Using the Vitals AC/DC 2000 welding unit, a PL tungsten electrode with a diameter of 3 mm, and OK Tigrod 19.85 welding wire with a diameter of 2.6 mm.

The microstructures of the samples obtained in the cross section of the workpiece were studied. The sample can be divided into main zones that differ in structure and properties: weld metal, base metal and heat-affected zone. The structure of the weld metal is dendritic (columnar structure), the axes of the dendrites are oriented in the direction of heat removal during crystallization. The structure of the root zone of the weld is formed by more equiaxed crystals, which, like the weld metal, have a dendritic, but more dispersed structure.

KEYWORDS: WELDING, WELDS, ELECTRODE, HEAT EXCHANGER, MICROSTRUCTURE.

Зміст

Вступ.....	6
1 Особливості зварювання нержавіючих та жаростійких сталей.....	9
1.1 Матеріали та особливості зварних з'єднань теплообмінника.....	9
1.2 Особливості зварювання нержавіючих та жаростійких сталей	11
1.3 Аналіз способів ремонтного зварювання та наплавлення нержавіючих сталей.....	12
2 Технологічна підготовка деталей до відновлення та методи усунення дефектів.....	20
2.1 Підготовка деталей для відновлення.....	20
2.2 Дефекти, що з'являються при зварюванні нержавіючої сталі і жароміцних сталей.....	23
2.3 Дослідження причин та механізму виникнення холодних тріщин....	26
2.4 Характеристика існуючих способів усунення процесу появи холодних тріщин.....	26
3 Методичні підходи експериментальних досліджень.....	29
3.1 Експериментальні зварювальні заходи.....	29
3.2 Методи підготовки та дослідження зразків.....	31
4 Дослідження зварних з'єднань сталі AISI 321.....	35
4.1 Формування моделі утворення холодних тріщин.....	35
4.2 Визначення зварюваності.....	36
4.3 Фізико-механічні властивості та хімічний склад досліджуваних матеріалів.....	43
4.4 Дослідження мікроструктури зразків до термооброблення.....	50

					КРМ.ПМЗм-21.00.00.000.ПЗ			
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата	Вплив технології зварювання на мікроструктуру зварних швів теплообмінника	Літ.	Арк	Аркушів
Розроб.	Сівка І. І.					4	61	
Перевір.	Біцак Р.Т.							
Реценз..								
Н. контр.	Матвієнків О.					ІФНТУНГ ПМЗм-24-1		
Затверд.	Андрюсяк А.В.							

4.5 Вплив термічної обробки на структурний стан зварного шва аустенітної сталі AISI 312.....	51
Висновки.....	55
Список використаних джерел.....	57
Додатки.....	61

					КРМ.ПМЗМ-21.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		5

Вступ

Актуальність теми. Нині економічне значення нафтогазового виробництва для країни важко переоцінити. Розвиток підприємств нафтогазової галузі потребує постійної роботи з удосконалення технологій переробки, транспортування та утилізації як готових, так і перероблених продуктів.

Це завдання особливо актуальне для реалізації нафтогазопровідних проектів. Відомо, що на етапі розвитку технології будівництва нафтогазопереробних підприємств зварний спосіб з'єднання секцій є основним. Основою безпечної експлуатації нафтогазопереробних установок є якість проведення зварювальних робіт поряд з іншими впливаючими факторами [1].

В даний час для будівництва трубопроводів застосовуються сталеві безшовні та електрозварні (прямо- і спірально-шовні) труби здебільшого виготовлені з низьколегованих сталей, у тому числі з термічним і термохімічним зміцненням марок 17ГС, 10Г2БТЮ та ін; аустенітні нержавіючі сталі AISI 321, 12Х18Н10Т, 08Х18Н11 та ін.

Теплообмінники використовуються у складі печей, для охолодження «камери згоряння». Робота цього агрегату відбувається в умовах високої температури та тиску. Важливим є вирішення проблеми одержання якісного зварного шва. Наявність дефектів у вузлах цього обладнання може призвести до руйнування установки, що може призвести до витоків сірки, призвести до витрат на важливе обладнання, аварій на роботі та з втратою людських життів.

Мета та задачі досліджень. Метою роботи є вивчення особливостей формування структури після термообробки у вигляді відпалу при різних технологічних режимах, при TIG зварюванні аустенітної нержавіючої сталі AISI 321, а також дослідження твердості після термообробки отриманих зразків.

Для досягнення цієї мети в магістерській роботі було вирішено такі завдання:

					КРМ.ПМЗМ-21.00.00.000.ПЗ	Арк
						6
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

1. Розгляд можливих дефектів зварних з'єднань нержавіючих та жароміцних сплавів вузлів теплообмінника.

3. Виготовлення зварних з'єднань аргонно-дуговим (TIG) зварюванням нержавіючої сталі AISI 321.

4. Виявлення впливу технології зварювання та термічного оброблення на мікроструктуру зварних швів.

5. Проведення аналізу параметрів зварювальних режимів та вибір найкращого параметра для отримання високоякісного зварного з'єднання.

Об'єкт дослідження – зварні шви нержавіючої сталі AISI 321.

Предмет дослідження – мікроструктурні дослідження, складу та властивостей матеріалу отриманих зварних швів; можливих дефектів зварних з'єднань; режими зварювання.

Наукова новизна.

1. Досліджено закономірності утворення дефектів зварних швів при аргонно-дуговому зварюванні нержавіючої сталі AISI 321 товщиною 3 мм.

2. Вперше встановлено особливості формування структури нероз'ємних з'єднань сталі AISI 321, отриманих аргонно-дуговим зварюванням та можливої схильності до міжкристалітної корозії зварних швів внаслідок виділення з аустеніту багатого хромом фериту, а не карбідів Cr.

Достовірність одержаних результатів підтверджується застосуванням сучасного методу TIG зварювання, мікроструктурними дослідженнями.

Практичне значення.

1. На основі досліджень виявлено причини утворення дефектів зварних швів, отриманих аргоннодуговим зварюванням та знайдено оптимальний спосіб, що дозволяє отримати якісні зварні з'єднання сталі AISI 321.

2. Виявлено особливості формування бездефектного зварного шва товщиною 3 мм методом TIG при зварюванні взірців з нержавіючої сталі AISI 321.

					КРМ.ПМЗМ-21.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		7

Апробація результатів роботи.

Біщак Р.Т. Підвищення ефективності ремонтного зварювання виробів з алюмінієвих сплавів / Р.Т. Біщак, А.М. Тарновецький, І.І. Сівка // Матеріали міжнародної науково - технічної конференції “Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання”. – 2025. – Т.1. – С. 144. <https://91.192.104.92/handle/lib/49206>

Структура та обсяг роботи. Магістерська робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, що містить 30 найменувань. Загальний обсяг магістерської роботи становить 61 аркуш, містить 16 рисунків, 2 таблиці і один додаток.

					КРМ.ПМЗМ-21.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		8

1 Особливості зварювання нержавіючих та жаростійких сталей

1.1 Матеріали та особливості зварних з'єднань теплообмінника

Під час експлуатації теплообмінник піддається впливу несприятливих умов: лужне середовище, високі температури, вологість тощо. У зв'язку з цими умовами для виготовлення теплообмінника застосовується корозійностійка сталь AISI 321.

Нержавіючі сталі не руйнуються під впливом повітря, води, лугів, різних кислот та солей. Ця властивість досягається всіма сплавами заліза із вмістом щонайменше 12% Cr. Коли в сталь, що містить 18% Cr, додається певна кількість Ni, вона стає аустенітною; аустенітний стан сталі зберігається у широкому діапазоні температур. Аустенітна хромонікелева сталь має кращі механічні властивості, ніж хромиста сталь, більш високу корозійну стійкість, опір повзучості та меншу схильність до підростання зерна. У той час як роль Cr в аустенітних хромонікелевих сталях полягає у створенні щільного оксидного шару, який захищає сталь від корозії, високий вміст Ni сприяє формуванню та підтримці аустенітної структури. Серед аустенітних хромонікелевих сталей найбільш поширені сталі, що містять 18% Cr і 8% Ni, так звані нержавіючі сталі 08X18N10, 12X18N10T, 17X18N10T та ін. Крім високої корозійної стійкості сталі AISI 321 володіють високою міцністю та опором повзучості (жаростійкістю). Вони мають гарні технологічні властивості, зокрема легко зварюються. Ці властивості сталі AISI 321 призвели до її широкого використання у промисловості. Незважаючи на появу нових сплавів, більш стійких в умовах інтенсивно агресивного середовища при високих температурах, сталь AISI 321, як і раніше, знаходять широке застосування. Твердість при загартуванні хромонікелевих аустенітних сталей, на відміну загартованих

					КРМ.ПМЗМ-21.00.00.000.ПЗ	Арк
						9
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

вуглецевих сталей, не збільшується, а знижується. При повільному охолодженні з температур вище 900°C твердість цих сталей зростає через виділення карбідів [2]. Поряд із сказаними вище перевагами аустенітних сталей AISI 321 деякі з них мають суттєвий недолік – схильність до міжкристалітної корозії. Це відбувається через відтерміноване охолодження чи нагрівання в діапазоні температур 450-850°C. Причиною міжкристалітної корозії, згідно з усталеними уявленнями, є зниження розчинності вуглецю в твердому розчині при зниженні температури, що призводить до виділення карбідів хрому Cr₄C, розташованих по межах зерен. Осаджені карбіди Cr містять близько 90% Cr. Осадження карбідів та їх подальша коагуляція призводять до збіднення основного металу хромом. Оскільки хром, що знаходиться у твердому розчині, сприяє утворенню стабільної оксидної плівки на поверхні металу, збіднені хромом міжзеренні області стають центрами корозії; тому цей тип корозії називається міжкристалітною корозією. Процес корозії швидко поширюється на межі зерен у глибині металу навіть у відносно неактивних середовищах. Нержавіюча сталь, схильна до міжкристалітної корозії, не видає металевого звуку при постукуванні і розтріскується при згині [3]. Запобігти міжкристалітній корозії сталей AISI 321 можна, знизивши в них вміст вуглецю до 0,04%, але це викликає виробничі труднощі і здорожчує сталь. Тому схильність сталей AISI 321 до міжкристалітної корозії запобігає легуванню з сильно-карбідоутворюючими елементами: титаном і ніобієм. У присутності титану та ніобію утворення карбідів відбувається в основному за рахунок цих елементів, а хром практично не витрачається, виконуючи своє основне призначення: він збільшує антикорозійну стійкість металу. Щоб повністю уникнути осаждения карбідів хрому, відношення титану до вуглецю має бути не менше 6-7, а відношення ніобію до вуглецю має бути не менше 10. У порівнянні з м'якими сталями хромонікелеві аустенітні сталі мають: а) коефіцієнт теплового розширення більше 50%; б) у 2 рази нижчу теплопровідність; в) у 6-9 разів більший електричний опір; г) нижчу температуру плавлення.

					КРМ.ПМЗМ-21.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		10

Хромонікелеві аустенітні сталі відрізняються високою пластичністю, середньою твердістю та одночасно достатньою міцністю. Після гартування сталь AISI 321 набуває найвищої пластичності. Маючи вищу жароміцність і жаростійкість у порівнянні зі звичайними сталями, сталь AISI 321 поступаються за цим показником ряду спеціальних жароміцних і жаростійких сплавів. Під жаростійкістю (стійкістю до утворення окалини) сталі слід розуміти її стійкість до окислення за рахунок високих температур. Стійкість до окалини збільшується за рахунок додавання до сплаву Cr, алюмінію або кремнію. Терmostійкість – це стійкість до механічних впливів при підвищених температурах. У порівнянні з феритними сталями аустенітні сталі відрізняються більш високою жароміцністю. Щоб отримати стабільну аустенітну структуру, необхідно ввести в сталь достатню кількість Ni. Таким чином, Cr і Ni є основними компонентами для отримання належних жароміцних та терmostійких властивостей. Завдяки високим механічним, антикорозійним та технологічним властивостям нержавіючі та жароміцні сплави широко використовуються у різних галузях промисловості.

1.2 Особливості зварювання нержавіючих та жаростійких сталей

Аустенітні хромонікелеві сплави особливо добре зварюються. Основними позитивними якостями зварювання цих сплавів є:

а) високі механічні властивості наплавленого металу; б) погане підростання зерна при зварюванні; в) невелика зона термічної дії. До недоліків зварних з'єднань цих сплавів можна віднести схильність деяких з них до міжкристалітної корозії навіть за наявності в основному металі стабілізуючих добавок. Схильність до міжкристалітної корозії зварних швів сталі AISI 321, що містять до 0,10-0,12% вуглецю, на відміну від сталей AISI 321 виникає внаслідок виділення з аустеніту багатого хромом фериту. Велике значення при зварюванні нержавіючих та жаростійких сплавів має захист розплавленого металу від

					КРМ.ПМЗМ-21.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		11

впливу вологи та кисню. Зі зростанням відсоткового співвідношення Cr і Ni у сплаві через їхню взаємодію при зварюванні з вологою схильність до утворення пористості зростає. Також відбувається інтенсивне горіння легуючих елементів: Cr, титану, марганцю, кремнію та ін. Оскільки поверхня, що взаємодіє із забрудненнями, збільшується зі збільшенням розмірів ванни розплавленого металу, для зменшення пористості швів необхідно прагнути до мінімального перерізу швів при зварюванні їх сплавів та зварюванні на максимальних швидкостях, слід уникати приготування у вологому середовищі, оскільки це призводить до пористості, підростання зерна та «розтріскування» [4].

1.3 Аналіз способів ремонтного зварювання та наплавлення нержавіючих сталей

Попит на застосування жаростійких сталей постійно збільшується в машинобудуванні, а тим більше в нафтогазопереробних галузях промисловості [1].

Економічна ефективність використання жароміцних сталей у порівнянні з іншими сталями полягає у підвищенні довговічності обладнання та заміні на тривалий час зупинок та планових ремонтів обладнання, що працює цілодобово, за рахунок підвищеної міцності та довговічності.

Навіть незважаючи на хороші експлуатаційні властивості жаростійких сталей, по закінченню часу та впливу високих температур виникає необхідність відновлювати обладнання, зокрема деталей, виготовлених із даних сталей. Найвідомішим та універсальним способом відновлення є наплавлення [5].

Існують різні способи наплавлення жаростійких сталей [6]:

Газове наплавлення – один із способів зварювання плавленням, що відбувається в умовах часткового оплавлення основного металу при використанні як джерело нагрівання високотемпературного полум'я, що отримується при спалюванні суміші горючого газу з киснем [7].

					КРМ.ПМЗМ-21.00.00.000.ПЗ	Арк
						12
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

Горючий газ, що використовується при газовому наплавленні, повинен відповідати таким вимогам:

- висока температура полум'я при горінні;
- висока швидкість горіння;
- висока теплота згоряння [6].

Киснево-ацетиленове полум'я, що забезпечує нагрівання до високих температур, найбільше підходить для газового наплавлення, саме тому поняття газового зварювання зазвичай асоціюється зі зварюванням цим полум'ям. При наплавленні, на відміну зварювання, бажана невелика глибина проплавлення основного металу, тому наплавлення виконують методом швидкого зварювання (метод Лінди). При наплавленні таким способом використовується пальник із соплом великого діаметру, що нагріває основний метал науглецювальним полум'ям [7].

Газове наплавлення забезпечує наступні переваги:

- незначне проплавлення основного металу;
- можливість наплавлення дрібних деталей складної форми;
- зменшення ймовірності виникнення тріщин, оскільки процес наплавлення включає попередній підігрів та подальше уповільнене охолодження виробу;
- низька вартість зварювального обладнання.

Водночас для газового наплавлення характерні й недоліки:

- низька продуктивність при наплавленні масивних деталей, що вимагають тривалого попереднього підігріву;
- висока кваліфікація зварювальника [6].

Дугове наплавлення покритим електродом - наплавлення цим способом, ґрунтується на використанні електродів у вигляді стрижнів з покриттям, яке здійснюють зазвичай вручну, тому такий спосіб називають також ручним дуговим наплавленням. Електродне покриття служить для захисту ванни рідкого металу від кисню та азоту повітря, стабілізації дуги, підвищення технологічності

					КРМ.ПМЗМ-21.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		13

процесу наплавлення та введення легуючих елементів до складу наплавленого металу [2].

Карбонатно-рутилові, основні та високорутилові покриття широко використовуються в практиці дугового зварювання. До складу електродного покриття також вводяться шлакоутворювальні та газоутворюючі компоненти, розкислювачі, стабілізуючі та легуючі добавки.

Дугове наплавлення покритим електродом відрізняється невисокою вартістю обладнання, можливістю ручного наплавлення, що забезпечує широке використання цього методу для наплавлення не тільки чорних, а й кольорових металів [8].

Ручне наплавлення поступається автоматичним і напівавтоматичним способам за швидкістю виконання процесу [9].

Дугове наплавлення під флюсом - дуга при напавленні електродними матеріалами (дротом, стрічкою) приховане під шаром гранульованого флюсу, що попередньо насипається на поверхню основного металу [7].

Можливість наплавлення при великому струмі та високій погонній енергії дає цьому методу високу продуктивність при високій якості наплавленого металу, і з цієї причини цей метод займає важливе місце в області автоматичного наплавлення поверхонь [8].

Дугове наплавлення під флюсом має такі переваги:

- висока продуктивність процесу при напавленні виробів простої форми з великою площею поверхні, що наплавляється;
- простота виконання процесу, що не вимагає високої кваліфікації зварювальника;
- можливість отримання гарного зовнішнього вигляду валика;
- хороші умови праці, пов'язані з відсутністю розбризкування електродного металу (оскільки дуга прихована під шаром флюсу).

Водночас цьому способу наплавлення притаманні такі недоліки:

					КРМ.ПМЗМ-21.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		14

- більш висока вартість обладнання, ніж для ручного дугового наплавлення покритими електродами;

- непридатність для наплавлення дрібних виробів складної форми, як зазначено в роботі [10].

Наплавлення електродним дротом під флюсом може бути здійснене в багатьох варіантах з використанням наплавлювального дроту різноманітного складу і різних флюсів. При напавленні цим способом в повну міру використовують технологічні прийоми підвищення продуктивності, включаючи застосування багатоелектродних зварювальних головок, нагрівання наплавлювального дроту електроопором і застосування присадкових матеріалів [10].

Багатоелектродне наплавлення здійснюють зазвичай способом, при якому дуга виникає між двома електродами. Перевага цього способу пов'язана з непрямим дуговим нагріванням основного металу, що забезпечує невелике його проплавлення у поєднанні з високою швидкістю плавлення електродного дроту [11].

Використання нагрівання дроту електроопором при дуговому напавленні під флюсом характеризується тим, що збільшення вильоту електродного дроту супроводжується підвищенням швидкості наплавлення і зниженням ступеня впливу основного металу на склад напавленого шару [12].

При звичайному одноелектродному напавленні під флюсом, щоб уникнути надмірного проплавлення основного металу, необхідне застосування наступних заходів:

- ретельний вибір наплавлювального матеріалу з урахуванням впливу основного металу на склад напавленого шару;

- обмеження глибини проплавлення шляхом більш щільного накладання валиків;

- забезпечення належної товщини напавленого шару за рахунок багат шарового наплавлення [13].

					КРМ.ПМЗМ-21.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		15

Наплавлення електродною стрічкою під флюсом. Наплавлення даним способом виконують за допомогою електроду у вигляді широкої сталеві стрічки, розташованої в процесі наплавлення практично під прямим кутом до основного металу.

Наплавлення стрічковим електродом має такі переваги:

- отримання плоского валика наплавленого металу, досить великої ширини (приблизно рівної ширині стрічкового електрода);
- можливість наплавлення шару необхідної товщини за один-два проходи, що обумовлено малою глибиною проплавлення основного металу та у зв'язку з цим незначним його впливом на склад наплавленого шару (частка розчинення становить 10-20%);
- висока продуктивність у зв'язку з можливістю наплавлення з високою швидкістю при великій силі струму наведено в роботі [12].

Розглянутий спосіб отримав швидкий розвиток і знайшов широке застосування для наплавлення корозійно-стійкої сталі AISI 321, сплаву «Nikonel» та інших корозійно-стійких наплавлювальних матеріалів [6].

Електродугове наплавлення порошковим дротом - наплавлення без захисного середовища, здійснюється порошковим дротом за відсутності подачі флюсу або захисного газу в зону дуги. Наплавлення відкритою дугою порошковим дротом має такі переваги:

- простота використовуваного обладнання та технологій за рахунок відсутності застосування захисних газів та потоків;
- можливість наплавлення в польових умовах, оскільки вітер практично не впливає на процес наплавлення;
- порівняна простота введення легуючих елементів у наплавлений метал, склад якого можна регулювати в широких межах [14].

Проблема наплавлення цим способом, пов'язана з значним димовиділенням, була вирішена розробкою спеціальної димової насадки.

					КРМ.ПМЗМ-21.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		16

Наплавлення в середовищі вуглекислого газу. Газовий захист електроду забезпечується в умовах потоку газу з боку подачі електродного дроту (матеріалу поверхні), що захищає зону дуги від навколишнього повітря [15].

Як захисний газ використовують CO_2 , хоча останнім часом поширена практика наплавлення в суміші вуглекислого газу з аргоном та іншими інертними газами. Усі ці варіанти носять загальну назву наплавлення електродом, що плавиться в середовищі захисного газу [12].

Під час проведення зносостійкого наплавлення в CO_2 використовується суцільний дріт або порошковий дріт. Основною перевагою захисту в CO_2 є можливість збільшення продуктивності процесу за рахунок виконання зварювання в автоматичному або напівавтоматичному режимі. Недолік цього методу, властивий іншим методам з використанням захисних газів, пов'язаний з неможливістю роботи на відкритому повітрі через вплив вітру на наплавлення [12].

Наплавлення в середовищі інертного газу - спосіб полягає в дуговому наплавленні при захисті зони дуги аргоном, гелієм чи іншим інертним газом. Наплавлення в середовищі інертного газу здійснюють у двох варіантах: плавким і вольфрамовим електродами [9].

Наплавлення плавким електродом, в середовищі захисного газу характеризується тим, що дуга виникає між основним металом і електродним наплавлювальним матеріалом. Наплавлення відбувається за умов автоматичної подачі електродного дроту. Як захисний газ найчастіше використовують аргон, хоча при роботі в середовищі чистого аргону дуга втрачає стабільність при наплавленні будь-якого металу, окрім алюмінієвих сплавів. З метою стабілізації дуги при наплавленні сталі до аргону додають до 20% кисню або вуглекислого газу, що суттєво впливає на процес наплавлення. Тому, завдання отримання напавленого металу із заданими властивостями вимагає ретельного вибору складу захисного газу [16].

					КРМ.ПМЗМ-21.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		17

Поверхня після плавлення неплавким вольфрамовим електродом в середовищі інертного газу характеризується тим, що дуга виникає між основним металом і вольфрамовим електродом. Поверхневий процес аргонної дуги, як і поверхня газу, відбувається в умовах подачі поверхневого стрижня та його плавлення дугою. Використання механізованих засобів подачі матеріалу з постійною швидкістю дозволяє наносити покриття в автоматичному або напівавтоматичному режимі [15].

Використання інертного газу усуває потребу в потоці, тому цей метод особливо ефективний при наплавленні кольорових металів, високолегованих сталей та інших матеріалів, чутливих до окислення та азотування. Висока якість наплавленого металу гарантується широким асортиментом матеріалів для присадок [13].

Всі перелічені способи мають як переваги, так і недоліки, що не дозволяє використовувати їх масово.

Таким чином, в результаті розгляду проблемних частин зварювального виробництва теплообмінника встановлено, що при отриманні зварних з'єднань жароміцної та нержавіючої сталі при аргонно-дуговому зварюванні деталей теплообмінника печі, велика ймовірність отримання дефектів, таких як поява холодних тріщин, пористості та підростання зерна.

При виробництві теплообмінника виникають дефекти, які необхідно виправляти, що підвищує вартість та спричиняє простій виробничого обладнання.

Необхідно провести матеріалознавчий аналіз якості зварних швів жароміцної та нержавіючої сталі, отриманих методом аргонно-дугового зварювання (TIG), ручного дугового зварювання, виявити причини утворення дефектів, вибрати оптимальні режими TIG для отримання бездефектних зварних швів.

Таким чином, метою роботи є вивчення особливостей формування структури після термообробки у вигляді відпалу при різних технологічних

					КРМ.ПМЗМ-21.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		18

режимах, при TIG зварюванні аустенітної нержавіючої сталі AISI 321, а також дослідження твердості після термообробки отриманих зразків.

					КРМ.ПМЗМ-21.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		19

2 Технологічна підготовка деталей до відновлення та методи усунення дефектів

2.1 Підготовка деталей для відновлення

У більшості випадків деталі, що надходять на відновлення, сильно забруднені, вкриті іржею, фарбою та мають інші забруднення [17]. Тому вони мають бути попередньо очищені та дефектовані.

Очищення може бути кількох рівнів:

1. Макроочищення - процес видалення з поверхні найбільших частинок, що заважають розбиранню, дефектації та механічній обробці.

2. Мікроочищення – видалення забруднень від мастила, залишків емульсії, солей миючих розчинів, пилу тощо.

3. Активуюче очищення - травлення металу та очищення поверхонь від залишків ПАР, захисних плівок та сторонніх речовин.

Забруднення поверхонь деталей видаляють у різний спосіб. Наприклад, для видалення рідких і твердих забруднень з поверхні широко використовуються спеціальні миючі засоби, використовуються синтетичні миючі засоби, розчини яких за миючою здатністю в кілька разів перевершують розчини каустичної соди та різних лужних сумішей. Розчини синтетичних миючих засобів можна використовувати для очищення деталей із чорних, кольорових та легких металів та сплавів.

Забруднення також видаляються розчинниками – гасом, бензином, уайт-спіритом, дизельним паливом. В основному вони використовуються для очищення деталей і вузлів від забруднень мастилом, знежирення поверхонь від асфальто-смолистих забруднень [18].

Очищення від нагару, накипу, корозійних відкладень може здійснюватись хімічними, механічними, хіміко-термічними та іншими методами. Деталі зі сталі

					КРМ.ПМЗМ-21.00.00.000.ПЗ	Арк
						20
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

та чавуну можна очистити від нагару хімічним методом, заснованим на використанні лужних розчинів підвищеної концентрації, що описувалися у роботі [19].

Для очищення деталей від окалини, іржі, підготовки поверхні до фарбування, гальваніки та інших покриттям, а також для різних операцій обробки поверхні деталей бомбардують твердими частинками, що містяться у великій кількості води, що циркулює в камері (зазвичай частинки абразивів або скла [20].

Кількісні дані, що дозволяють робити висновки про властивості та якість виявлення несправностей та замовлення деталей, заносяться до списків дефектів. Ця інформація надалі, після статистичної обробки, дозволяє прогнозувати можливе зношування деталей.

Під час виявлення несправності виконуються такі операції. Спочатку при зовнішньому огляді неозброєним оком або за допомогою лупи, контролем на дотик, постукуванням виявляються такі пошкодження деталей: тріщини, зазубрини, злами, отвори, вм'ятини, задири, корозію, окрихчування. Крім того, за допомогою універсального та спеціального вимірювального інструменту визначаються геометричні параметри деталей. Для виявлення прихованих дефектів, перевірки герметичності, еластичності, перевірки стану частин деталей використовують спеціальні пристосування [21].

Технологічна підготовка деталей до ремонту та відновлення поверхні, крім очищення, знежирення та травлення, включає також операції, пов'язані з механічним видаленням дефектного металевих шару [22].

Наплавлення на погано підготовленій поверхні призводить до непроварів, утворення пор та заглиблень, забруднення шва неметалевими включеннями.

Отвори, канавки або борозенки на поверхні деталі, що зварюється, які необхідно зберегти, закладаються мідними, графітовими або вугільними вставками. Спосіб кріплення вставки перед наплавленням підбирається для кожної деталі окремо.

					КРМ.ПМЗМ-21.00.00.000.ПЗ	Арк
						21
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

Деталі, що не піддаються наплавленню, за необхідності захищають від бризок оксидів сухим або вологим азбестовим картоном або скловолокном.

Відновлювані деталі в залежності від матеріалу та його стану (виду термічної або хіміко-термічної обробки) перед наплавленням можуть піддаватися загальному попередньому нагріванню, ступінь якого залежить від схильності металу до тріщиноутворення (технологічної міцності). У деяких випадках перед наплавленням виріб піддають високому відпуску для зняття залишкових напружень або відпалу для усунення зміцнюючої структури.

Для правильної організації підготовки деталей до наплавлення та виконання наплавлювальних робіт необхідно після огляду та вимірювання зношеності деталей скласти карту технологічного процесу ремонту [21].

У ній мають бути відображені причини та характер зношування, умови роботи деталей, обсяг робіт, вид і спосіб наплавлення, марка та діаметр електродів або дротів, режим і технологія наплавлення, час на виконання робіт, послідовність операцій, припуски на механічну обробку, необхідність попередньої та подальшої термічної обробки [21].

При виборі методу відновлення виробу, окрім підвищення його зносостійкості, необхідно враховувати особливості способів покриття і їх використання при відновленні певних деталей. При виборі облицювального матеріалу особливу увагу слід приділити властивостям наплавленого металу, найбільш характерними до роботи деталі, щоб його міцність і зносостійкість не поступалися характеристикам нерозплавленої деталі. Можливість нанесення будь-якого методу покриття також залежить від рентабельності кожного конкретного методу для кожної деталі.

Вибір методу нанесення покриття (ручний або автоматичний) багато в чому визначається однорідністю та масою деталей, що реставруються.

В економічному розрахунку вибору методу наплавлення необхідно враховувати такі фактори: вартість заміни деталі наплавленням у порівнянні з вартістю виготовлення нового виробу традиційними методами (куванням,

					КРМ.ПМЗм-21.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		22

литтям, штампуванням тощо); вартість механічної та термічної обробки (до і після наплавлення) порівняно з вартістю обробки нової деталі; якість продукції (у тих випадках, коли це залежить від деталі, що зварюється); вартість експлуатації та ремонту машини або пристрою протягом тривалого часу до та після збирання зварних деталей; зміни в продуктивності; вплив обробки поверхні на витрату дефіцитних матеріалів; організація роботи та механізація обробки поверхонь.

Особливої уваги вимагає вибір електрозварювального обладнання при виборі оптимального методу наплавлення. Деякі метали та сплави можна використовувати лише певним чином. У той же час багато методів наплавлення потребують спеціалізованого обладнання.

Вибір методу відновлення залежить від розміру та конфігурації деталі та частки основного металу в наплавленому шарі.

2.2 Дефекти, що з'являються при зварюванні нержавіючої сталі і жароміцних сталей

Сталь, розглянута в роботі, досить складно зварювати, тому що вона має яскраво виражену схильність до утворення гарячих тріщин і мікротріщин в області поблизу зварного шва та безпосередньо в шві. Ці дефекти виникають через появу в сплаві крупнозернистої макроструктури (мають міжзеренний характер) [19].

Метал зварних з'єднань, якщо говорити про аустенітний склад, характеризується особливою формою кристалізації (називається комірчасто-дендритна), яка викликає появу фаз з низькою температурою плавлення і дуже великих стовпчастих кристалів. Збільшити міцність швів можна за допомогою спеціальних технологій, що дозволяють усунути зазначену металеву конструкцію. Суть таких прийомів зазвичай полягає у подрібненні кристалів, а також у зменшенні кількості вмісту шкідливих домішок S та P у металі [17].

					КРМ.ПМЗМ-21.00.00.000.ПЗ	Арк
						23
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

Дуже часто з ГТ борються за рахунок зменшення ступеня проплавлення металу та використання зварювальних матеріалів, виготовлених із сталі для електрошлакового або вакуумного плавлення. У деяких випадках ризик руйнування можна значно знизити за рахунок збільшення ліквідаційних добавок (наприклад, бору) до таких показників, які дозволяють отримати евтектику на кристалах [18].

Якщо ці методи не підходять, використовується універсальний метод запобігання тріщинам, який передбачає зміну картини кристалізації зварних з'єднань, що призводить до збільшення ступеня розчинності ліквідаційних добавок у первинному фериті, що є в них. При зміні схеми відзначається плутанина та уточнення структури кристалів фериту та аустеніту, що значно знижує активність руйнування. Процес модифікації зварного шва здійснюється шляхом додавання легуючих елементів, таких як молібден, хром, алюміній чи кремній [29].

Зварні з'єднання таких сталей не повинні змінювати свої механічні (примітно дуже високі) характеристики протягом тривалого часу експлуатації при високих температурах. Виконати цю умову непросто через те, що у металі шва за його швидкого охолодження після зварювання спостерігається закріплення нерівноважних структур [19]. Вони знижують пластичні характеристики зварного з'єднання вже за нормальної температури близько +350°C (оскільки відбуваються дифузійні процеси).

Крім того, при температурах від +500 до +650 °C відзначається формування α -фази і водночас випадання карбідів, від +350 до +500 °C (при виконанні операції термічного старіння) – утворення крихкості [9]. Метал також стає дуже крихким при зберіганні за температури близько 800 °C (це також призводить до зниження міцності з'єднання). Щоб мінімізувати ці негативні явища в жароміцних сплавах, робляться спроби знизити вміст вуглецю (у металі зварного шва і в основному металі).

					КРМ.ПМЗМ-21.00.00.000.ПЗ	Арк
						24
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		



Рисунок 2.1 - Поширений дефект – тріщина зварного шва

У жароміцних сталях у зоні термічного впливу часто утворюються тріщини, викликані зниженням міцності та пластичних параметрів основного металу в процесі його термообробки, як стверджували автори в роботах [28, 29]. Такі дефекти пов'язані з тим, що кисень та вуглець у великих кількостях, будучи тензоактивними елементами, здатні викликати утворення евтектик із низькою температурою плавлення. А при тривалій експлуатації конструкцій із жароміцних сталей інтерметаліди та карбіди (дрібнодисперсні) часто виявляються в зоні зварного шва, що робить з'єднання крихким як зазначено в роботі [22].

Всі ці проблеми вирішуються покриттям спеціальним металевим шаром із двофазною структурою, що не має нічого спільного з основним металом [29]. Але в процесі експлуатації зварних конструкцій відбувається посилення додаткового шару, що через деякий час знову призводить до утворення деформованої ділянки і тих самих тріщин. Усунути їх можна шляхом високотемпературної аустенізації (близько 1100 °С) та подальшого самозатвердіння або стабілізуючого відпалу. Останнє проводиться за температури не менше 750 °С.

					КРМ.ПМЗМ-21.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		25

2.3 Дослідження причин та механізму виникнення холодних тріщин

Жаростійкі сталі відносяться до групи важкозварюваних металів, зварюваність яких забезпечується при спеціальних технологіях зварювання та використання спеціальних присадкових матеріалів [2].

Для жаростійких сталей характерною особливістю є поява мікро та макротріщин. Звичайно, говорити про якесь єдине рішення - безглуздо. Для кожного окремого металу має бути проведене дослідження з приводу того, яку температуру для зварювання раціонально використовувати і наскільки кожен окремий матеріал буде схильний до корозійних впливів [3].

Найбільш правильним рішенням буде повномасштабні випробування, які слід провести, щоб визначити, наскільки метал схильний до руйнування [25]. Також потрібно розуміти, що для якісного зварювання жароміцних металів необхідно буде отримати механічні властивості з'єднань та швів, які будуть максимально наближені до основного металу.

Ці властивості сталі негативно позначаються на ремонтних роботах шляхом наплавлення, особливо у випадку польових робіт. Тому, актуальним стає питання розробки ефективного методу відновлення деталей із жароміцних сталей.

2.4 Характеристика існуючих способів усунення процесу появи холодних тріщин

Наразі найбільш поширеним методом відновлення є газове наплавлення. Основним недоліком цього процесу порівняно з жароміцними сталями є необхідність попереднього нагрівання деталі, а потім супутнього її нагрівання [6]. Недоліком цього методу також є те, що в процесі відновлення відбувається сильне розбризування рідкого металу [7].

					КРМ.ПМЗМ-21.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		26

Поява CO₂, що має недоліки, має безліч позитивних аспектів, тому ми розглянемо існуючі можливості для запобігання негативним явищам.

Автори В.В. Чигарьов, В.П. Іванов, І.С. Псарьова у своїй роботі «Підвищення працездатності деталей та інструменту наплавленням гетерогенного шару» пропонують удосконалити технології наплавлення для зниження ймовірності утворення тріщин» [6].

Наплавлення робочого шару слід проводити у вигляді шаруватої композиції, в якій суміжні шар виконуються матеріалами з різними модулями пружності, забезпечується необхідне співвідношення пластичних і властивостей міцності, що перешкоджає подальшому розвитку тріщин [6].

Ділянки наплавленого металу, орієнтовані таким чином, щоб напрям ймовірного підростання тріщини відповідав напрямку максимального опору розтріскуванню, також можуть виступати як перешкоди для розтріскування. Для цього робочу поверхню потрібно зварити не прямими швами. При цьому з розвитком тріщини періодично з'являються ділянки з високим опором її розвитку (поперечні перерізи шва) [6].

Одним із способів обмеження процесів зародження та розвитку тріщин є отримання поверхні шва кільцевими швами з попереднім формуванням дискретних ділянок шва у вигляді точок або коротких поперечних валиків на шляху майбутньої поверхневої траєкторії кільцевого шва [9].

Автори Мозок В. М., Лебедєв В. А. у роботі «Нові можливості ремонтів деталей важкої техніки імпульсно-дуговим зварюванням та наплавленням поза ремзаводами» пропонують для якісного ремонту великогабаритних деталей і вузлів користуватися гетерогенним присадним металом та спеціальною технікою накладання швів [7].

Як спеціальна техніка наплавлення ремонтного шва зазвичай застосовується зворотноступінчастий спосіб при довжині ділянки до 120–150 мм, або, наприклад, «гіркою» [7].

					КРМ.ПМЗМ-21.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		27

Існує низка інших методів, включаючи використання модульованих режимів роботи механізованого обладнання, використання імпульсної подачі електродного дроту та інші типи імпульсних методів дуги [6].

Хочу зауважити, що останнім часом все з більшим успіхом при наплавленні використовуються способи аргонно-дугового зварювання із застосуванням спеціальних присадок, зокрема, при відновлювальних роботах у польових умовах, зі створенням особливих типів наплавлених поверхонь, що також зазначено в роботі [8].

Таким чином, вивчивши всі роботи можна зробити висновок, що найбільш раціональним способом відновлення деталей, виготовлених із жаростійких сталей є наплавлення в середовищі газового захисту із застосуванням присадок, та контролем температури нагріву основного металу при дії зварювальної дуги.

Під час проведення відновлювального зварювання необхідно пам'ятати, що хімічний склад наплавленого металу суттєво відрізняється від хімічного складу основного металу. Тому, під час наплавлення має виконуватися ряд технологічних вимог [6].

Насамперед такою вимогою є мінімальне змішування наплавленого шару з основним металом, що розплавляється при виконанні шарів. Тому в процесі наплавлення необхідно отримувати наплавлений шар з мінімальним проплавленням основного металу, тому що в іншому випадку зростає частка основного металу у формуванні наплавленого шару. Це призводить до непотрібного розведення наплавленого металу основним, що розплавляється [13].

По-друге, при наплавленні необхідне забезпечення мінімальної зони термічного впливу та мінімальних напружень та деформацій. Ця вимога забезпечується за рахунок зменшення глибини проплавлення, а також регулюванням параметрів режиму, погонної енергії та інших технологічних заходів [13].

Перегрів деталей понад 200 °С призводить до утворення холодних тріщин.

					КРМ.ПМЗМ-21.00.00.000.ПЗ	Арк
						28
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

3 Методичні підходи експериментальних досліджень

3.1 Експериментальні зварювальні заходи

На базі ПРАТ "Івано-Франківськцемент" проводилися експериментальні зварювальні роботи для підбору режимів відновлювального зварювання з використанням наступного обладнання: зварювальна установка Vitals Professional ac/dc-2000 Tig alu puls (рис.3.1), для TIG зварювання та ручного дугового методом ММА. Для TIG зварювання рекомендується використання газоподібного аргону вищого ґатунку за ГОСТ 10157-2016 (99,993%).



Рисунок 3.1 - Установка зварювальна Vitals professional ac/dc-2000 tig alu puls

					КРМ.ПМЗМ-21.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		29

Електрод вольфрамовий ПЛ (діам. 3 мм) – використовується для зварювання ТІГ в інертних газах (рис.3.2). Робота повинна виконуватись на постійному струмі. Електроди призначені для зварювання вуглецевих, низьколегованих та нержавіючих сталей, міді, титану. Оксид ітрію використовується як добавка до сплаву, що робить його стійким до високих температур, забезпечує підвищену стабільність дуги. Його використовують при зварюванні відповідальних елементів.



Рисунок 3.2 - Електрод вольфрамовий неплавкий

Для ТІГ зварювання нержавіючої сталі теплообмінника будемо застосовувати прутки зварювального дроту ОК Tigrod 19.85 (NiCr20Mn3Nb) (рис.3.3) діам. 2,6 мм - на основі нікелевого сплаву, призначений для зварювання жароміцних нікелевих сплавів 60ВТ, EI-868, Inconel 600, N006600, Wr. 2.4816 та ін. Робота в контактi з агресивними середовищами при температурах від -196 до 550 °С. Застосовується для зварювання низьколегованих хромомолібденових жароміцних сталей перлітного класу з високолегованими сталями аустенітного класу, за робочих температур експлуатації до 650 °С. Для зварювання високоміцних криогенних сталей, легованих 5 або 9% Ni, мартенситних сталей, що важко зварюються зі сталями аустенітного класу, а також виливків з тугоплавких сталей обмеженої зварюваності, для наплавлення перехідних шарів

					КРМ.ПМЗМ-21.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		30

та антикорозійних покриттів на низьковуглецеві та низьколеговані конструкційні сталеві вироби та жароміцні.



Рисунок 3.3 - Прутки зварювального дроту ОК Tigrod 19.85

Зварювалися 6 зразків, габаритними розмірами 100x100x3 мм, із застосуванням різних методів та параметрів зварювання, після чого проводилися їх випробування.

Проведені дослідження параметрів зварювання та процес вибору оптимального режиму для отримання високоякісного зварного з'єднання, дозволили обрати оптимальний спосіб зварювання – аргонодугове, зі зварювальним струмом у діапазоні 70-100 А, виліт електрода 5-10 мм, та витрата аргону 6-8 л/хв. З використанням зварювальної установки Vitals AC/DC 2000, вольфрамового електрода ПЛ діаметром 3 мм, зварювального дроту ОК Tigrod 19.85 діаметром 2,6 мм.

3.2 Методи підготовки та дослідження зразків

Матеріалом дослідження є сплав аустенітної нержавіючої сталі AISI 321 у кількості шести зразків. Металографічні дослідження проводились у лабораторії кафедри будівництва. Випробування проводилися на устаткуванні:

- твердомір ТК-2М (рис.3.4), мікротвердомір ПМТ-3;
- муфельна піч;

					КРМ.ПМЗМ-21.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		31

- шліфувальний верстат;
- полірувальний верстат;
- металографічний мікроскоп ММО-1600АТ;
- мікроскоп МБС-10;
- набір для візуального та вимірювального контролю ЛМ-01.



Рисунок 3.4 – Твердомір ТК-2М

					КРМ.ПМЗМ-21.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		32



Рисунок 3.5 – Муфельна піч

Зразки для аналізу мікроструктури вирізалися в поперечній площині (рис. 3.7).



Рисунок 3.6 – Мікроскоп металографічний ММО-1600АТ

					КРМ.ПМЗМ-21.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		33



Рисунок 3.7 – Зразки для металографічних досліджень

З метою гомогенізації отриманої дендритної структури наплавленого металу частина зразків була піддана термічній обробці шляхом нагрівання до заданих температур з різним часом витримки нагрівання, з охолодженням на повітрі (таблиця 3.1). Всі зразки поміщалися в піч після досягнення заданої температури.

Таблиця 3.1 – Режими термічного оброблення зразків

№ зразка	1	2	3	4	5	6
Час витримки, хв.	30	60	30	60	30	60
Температура нагріву, °С	800	800	900	900	1000	1000

Після термообробки зразки піддавалися стандартній процедурі шліфування, полірування та травлення.

Травлення поверхні шліфів здійснювалося 10% розчином щавлевої кислоти.

Металографічні дослідження зразків проводили із використанням оптичного мікроскопа ММО-1600АТ.

4 Дослідження зварних з'єднань сталі AISI 321

4.1 Формування моделі утворення холодних тріщин

З метою прогнозування та формування математичної моделі утворення холодних тріщин (ХТ) у зварних з'єднаннях сталей у роботі використовуватимемо концептуальну модель Е.Л. Макарова, яка ґрунтується на обліку співвідношень дійсних та критичних значень структурного, водневого та силового факторів [14].

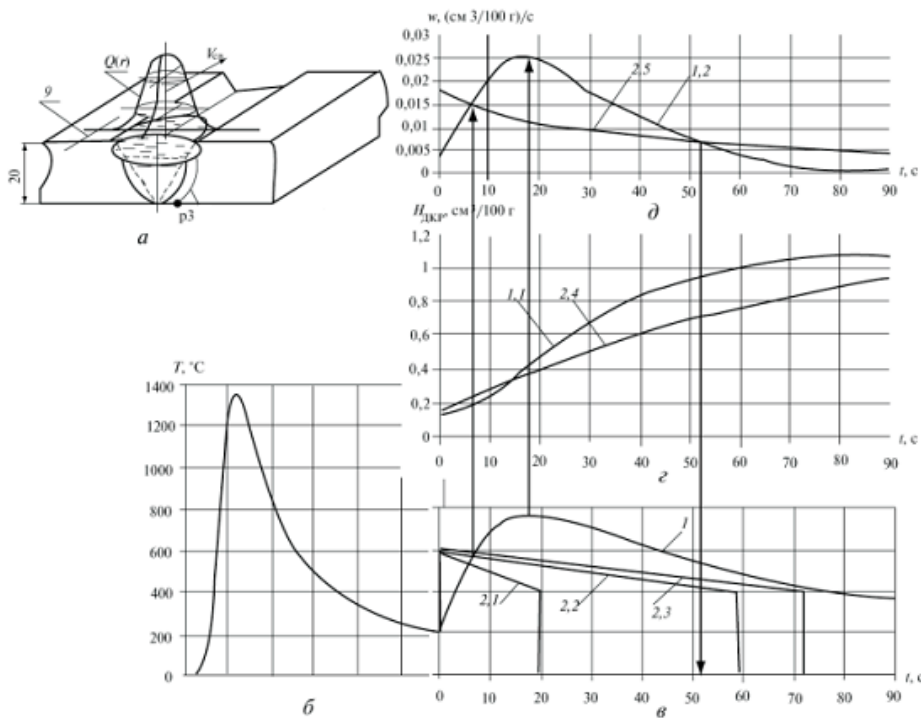
Виділимо основний чинник, що впливає переважно на утворення холодних тріщин і є найскладнішим для визначення – структурний чинник [14].

Автором Макаровим Е.Л. виявлено що при однопрохідному зварюванні структура металу шва формується на етапі охолодження в основному в процесі поліморфного γ - α перетворення аустеніту, тому опис структурного фактора розміром аустенітного зерна і фазовим складом структури виявляється достатнім для прогнозування показника опірності сталей утворенню холодних тріщин.

Робота буде спрямована на дослідження процесу утворення холодних тріщин при багат шаровому зварюванні, тому потрібно вивчити процеси сегрегації вуглецю в кристалах мартенситу, виділення тонкодисперсних проміжних карбідів тощо – це процеси, які відбуваються при повторному нагріванні.

Дослідження проводитиметься за методом, представленим у роботах А.В. Коновалова [14-16].

					КРМ.ПМЗМ-21.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		35



а - схема зварного з'єднання; б - розрахунковий зварювальний термічний цикл першого проходу в точці p_3 ; в - 1 - розрахунковий зварювальний термічний цикл другого проходу; 2.1, 2.2, 2.3 - лабораторний термічний цикл повторного нагріву; г - 1.1 - модельна крива (прогноз) зміни показника опірності сталі холодним тріщинам у точці p_3 під впливом зварювального термічного циклу другого проходу; 2.4 - крива зміни показника опірності сталі холодним тріщинам, побудована за експериментальними значеннями критичної концентрації водню нагріву; д - 1.2, 2.5 - швидкості зміни опірності сталі холодним тріщинам під впливом термічного циклу зварювання другого проходу та повторного нагрівання лабораторного термічного циклу

Рисунок 4.1 - Результати модельної оцінки опірності сталі при двопрхідному зварюванні та результати порівняльного аналізу

4.2 Визначення зварюваності

Перед початком проведення дослідження, а саме зварювання різних сплавів, розраховуємо вуглецевий еквівалент $C_{\text{екв}}$ [16].

Таке значення, як вуглецевий еквівалент сталі (C_{eq}) використовується для оцінки зварюваності сталі. При визначенні вуглецевого еквівалента враховується

хімічний склад сталі, оскільки він дуже великий. Вуглець (С) особливо сильно впливає на зварюваність [17]. Щоб визначити схильність металу до утворення тріщин, використовуються такі формули розрахунку вуглецевого еквівалента:

$$C_{\text{екв}}=C+\text{Mn}/6+(\text{Cr}+\text{Mo}+\text{V})/5+(\text{Ni}+\text{Cu})/15\%$$

Дана формула прийнята для розрахунку в Європейському стандарті.

$$C_{\text{екв}}=C+\text{Mn}/6+\text{Si}/24+\text{Ni}/40+\text{Cr}/5+\text{Mo}/4, \%$$

Ця формула для визначення вуглецевого еквівалента сталі в стандартах Японії.

$$C_{\text{екв}}=C+\text{Mn}/20+\text{Ni}/15+(\text{Cr}+\text{Mo}+\text{V})/10, \%$$

Така формула вуглецевого еквівалента пропонується Британським інститутом зварювання.

Однак, як з'ясувалося на практиці, для мікролегованих сталей із низьким вмістом вуглецю ці рівняння не можуть охарактеризувати зниження міцності через зростання зерна. Герман Дюрен вивів формулу вуглецевого еквівалента мікролегованих сталей, що досить точно характеризує їх схильність до холодного розтріскування:

$$C_{\text{екв}}=C+\text{Si}/25+(\text{Mn}+\text{Cu})/16+\text{Cr}/20+\text{Ni}/20+\text{Mo}/40+\text{V}/15\%$$

Значення вуглецевого еквівалента дозволяє визначити, до якого класу він належить, і навіть необхідно визначити температуру попереднього нагрівання. Визначається за такою формулою:

$$C=C_{\text{екв}}+C_s,$$

де С - загальний еквівалент вуглецю.

$C_{\text{екв}}$ - хімічний еквівалент вуглецю, що обчислюється за формулами, наведеними вище;

C_s - еквівалент вуглецю, залежно від товщини листа, мм. Обчислюється за такою формулою:

$$C_s=0,005 \cdot S \cdot C_{\text{екв}}.$$

У результаті отримуємо: $C=C_{\text{екв}} \cdot (1+0,005 \cdot S)$

					КРМ.ПМЗМ-21.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		37

Крім вуглецевого еквівалента, існує кілька параметричних формул для визначення та оцінки зварюваності сталей, найбільш популярною з яких є формула Іто-Бессіо:

$$P_{cm} = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/15 + 5B, \%$$

$$P_w = P_{cm} + H/60 + K/(40 \cdot 104) \%$$

де K - коефіцієнт інтенсивності жорсткості, який Іто та Бессіо застосовували при розрахунках на основі даних, які вони отримали при оцінці зварюваності сталей з U -подібним розробленням кромки.

$K = K_0 \cdot S$, де K - константа, що дорівнює 69; S - товщина листа, мм. Дослідження, проведені пізніше, показали, що константу $K=69$ можна застосовувати для приблизних визначень величини D_0 у разі, коли зварюються листи великої товщини, до 150 мм включно [15].

P_{cm} - коефіцієнт, що характеризує зниження міцності внаслідок структурного перетворення сплаву;

H - кількість розчиненого водню в металі, що утворює зварний шов, вимірюється мл/100г. У Японських стандартах величина $H=0,64$, у Європейських $H=0,93$.

Численні виміри показали, що з $P_w > 0,286$, виникає ризик виникнення холодних тріщин у зварному з'єднанні [18].

Якщо йдеться про небезпеку утворення гарячих тріщин у металі шва, то зварюваність сталі за цим критерієм можна оцінити за допомогою показника HCS, що розраховується за формулою:

$$HCS = (C \cdot 1000) / (3Mn + Cr + Mo + V)$$

Якщо величина $HCS > 4$, що вийшла, виникає ризик утворення гарячих тріщин. Однак, якщо виконується велика товщина, то ризик виникнення даного пошкодження виникає вже за показника $HCS > 1,6 \dots 2$.

На практиці одним з основних і частих дефектів зварного шва, що важко виявляються, є холодні тріщини. Тому, найбільш популярною оцінкою

					КРМ.ПМЗМ-21.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		38

зварюваності сталі є визначення C_{eq} вуглецевого еквівалента за формулами, наведеними вище [19].

При дуговому зварюванні вуглецевих і низьколегованих сталей зміцнення ЗТВ основного металу зазвичай відбувається через перетворення аустеніту на мартенсит в результаті швидкого охолодження металу шва. Ступінь зміцнення залежить від складу сплаву та швидкості охолодження. У випадку зварювання вуглецевих та низьколегованих сталей композиційний ефект визначається емпірично визначеним вуглецевим еквівалентом (C_{eq}). Зазвичай визначення C_{eq} використовується формула, прийнята Міжнародним інститутом зварювання.

У Японії наведена нижче таблиця зазвичай використовується для оцінки попереднього підігрівання вуглецевих і низьколегованих сталей.

У цих формулах С та інші легуючі елементи вказані у відсотках по масі.

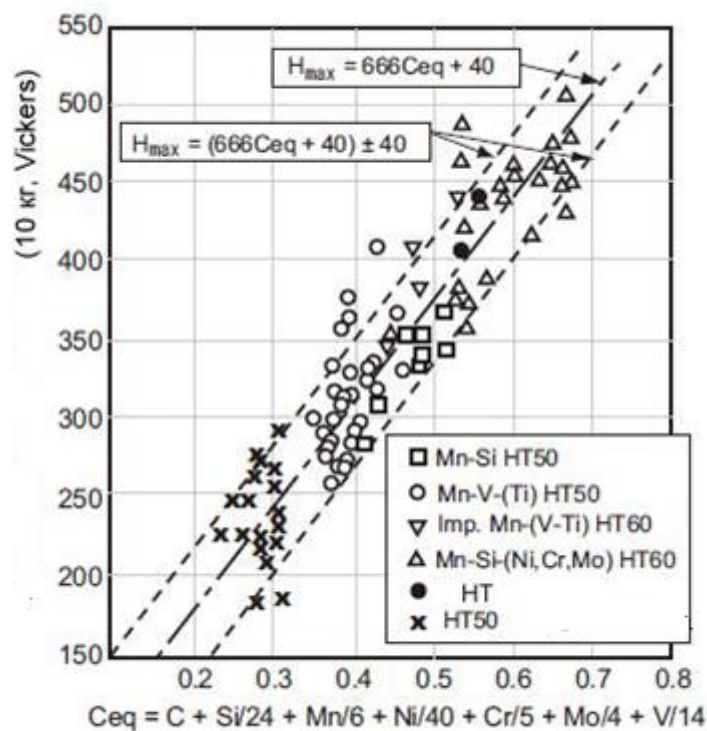


Рисунок 4.2 - Максимальна твердість HAZ

Як показано на рисунку 4.2, максимальна твердість HAZ збільшується зі збільшенням C_{eq} , підтвержуючи сильний та прямий вплив вуглецю на

твердість. Інші легуючі елементи також впливають на твердість, але меншою мірою. Загалом вони впливають на гартування зварних швів.

Як показано на рисунку 4.2, максимальну твердість HAZ вуглецевої або низьколегованої сталі можна визначити за формулою $H_{\max} = (666 C_{\text{eq}} + 40) \pm 40$. Однак основне застосування цієї концепції - визначення не твердості, а мінімальної температури попереднього нагрівання, необхідної для запобігання утворенню твердого мартенситу або мікроструктури з низькою пластичністю.

Ця мікроструктура разом із усадкою зварного шва та вмістом вуглецю в металі зварного шва може викликати холодне розтріскування зварного шва. Як показано на рис. 4.3, утворення підшовних тріщин - холодних тріщин, що утворилися в ЗТВ - збільшується зі збільшенням C_{eq} .

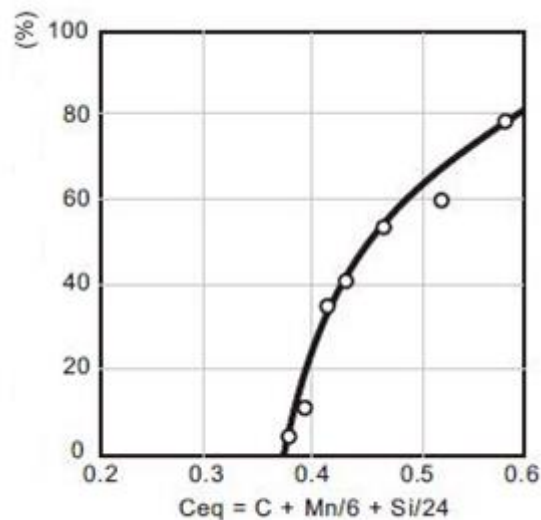


Рисунок 4.3 - Показник C_{eq}

З вказаних вище причин C_{eq} є індикатором, який може допомогти визначити ступінь попереднього підігрівання або зварюваності основного металу. Чим вище значення C_{eq} , тим більша твердість і вища температура попереднього нагріву. Ось чому C_{eq} може бути включений у характеристики матеріалів та будівельні норми для зварних конструкцій, як рекомендований або обов'язковий стандарт при виборі сталі та проведенні зварювальних процедур.

					КРМ.ПМЗМ-21.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		40

Під час проведення дослідження проводилися розрахунки зі схильності до утворення холодних тріщин при зварюванні, що можна виявити за допомогою зразків технології зварювання, спеціалізованих методів механічних випробувань зварних зразків ("машинних" методів) та методів розрахунку [20]. Застосування перших двох експериментальних методів регламентується ГОСТ 26388, що визначає типи, розміри зразків та випробувальних пристроїв, а також способи зварювання [21].

Використання обчислювальних методів для оцінки схильності до холодного розтріскування засноване на їх взаємозв'язку з здатністю сталі, що гартується, під час зварювання, яка збільшується зі збільшенням ступеня легування матеріалу і насичення металу шва і ЗТВ [22]. Тому, в даний час широко використовуються такі параметричні рівняння:

1. Розрахунок значення еквівалента вуглецю $C_{\text{екв}}$, % за формулою:

$$C_{\text{ЭКВ}} = C + \frac{\text{Mn}}{6} + \frac{\text{Cr} + \text{Mo} + \text{V}}{5} + \frac{\text{Ni} + \text{Cu}}{15}.$$

Вважається, що при $C_{\text{екв}} < 0,4\%$ сталь не схильна до утворення холодних тріщин. При $C_{\text{екв}} > 0,45\%$ при зварюванні стає можливим формування загартованих структур у металі зварного з'єднання, що за умови насичення металу воднем і високих зварювальних напружень може призвести до утворення тріщин [16].

2. Розрахунок значення твердості металу в навколошовній ділянці ЗТВ:

$$HV_{\text{max}} = 90 + 1050C + 47Si + 75Mn + 30Ni + 31Cr. (2)$$

Щоб запобігти утворенню холодних тріщин, при зварюванні ефективно використовувати нагрівання. Це знижує швидкість охолодження металу шва та ЗТВ, запобігає утворенню мартенситу та створює сприятливі умови для видалення дифузного водню як зазначено в роботі [23].

3. Розрахунок температури попереднього підігріву $T_{\text{п}}$ °С, що виключає появу холодних тріщин.

$$T_{\text{п}} = 1440P_w - 392. (3)$$

					КРМ.ПМЗМ-21.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		41

На діаграмі показана залежність структури сталей від еквівалентів нікелю Ni_{eq} і хрому Cr_{eq} , які розраховуються за такими формулами:

$$Ni_{екв} = \% Ni + 30 \cdot \% C + 0,5 \cdot \% Mn + 12 \cdot \% N, (7)$$

$$Cr_{екв} = \% Cr + \% Mo + 1,5 \cdot \% Ti, (8)$$

За відсутності азоту у складі сталі у розрахунку $Ni_{екв}$ коефіцієнт перед марганцем дорівнюватиме не 0,5, а 1,5.

Нікелевий еквівалент характеризує сумарну дію аустенітно-стабілізуючих елементів, хромовий еквівалент - що містяться в сталі ферито-стабілізуючих елементів. Розраховані значення Ni_{eq} і Cr_{eq} нанесені на осі ординат та абсцис відповідно. Місця перетину потрапляють у ту чи іншу фазову область, що дозволяє визначити структурний клас сталі. Діаграма Шеффлера також може використовуватися для визначення структурного і фазового стану металу в зоні плавлення при зварюванні сталей з різними присадковими матеріалами.

4.3 Фізико-механічні властивості та хімічний склад досліджуваних матеріалів

Фізико-механічні властивості сталі AISI 321 [5].

Питома вага: 7920 кг/м³.

Термообробка: Загартування 1050 - 1100°C, вода.

Температура кування: початки 1200 °С, кінця 850 °С. Перерізи до 350 мм охолоджуються на повітрі.

Твердість матеріалу: $HV 10^{-1} = 179$ МПа.

Зварюваність матеріалу: без обмежень, способи зварювання: РДЗ (електроди ЦТ-26), ЕШЗ та КТЗ. Рекомендується наступне термооброблення.

Оброблюваність різанням: у загартованому стані при $HV 169$ і $\sigma_B=610$ МПа.

					КРМ.ПМЗМ-21.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		43

Флокеночутливість: нечутлива.

Жаростійкість: у повітрі при $T=650\text{ }^{\circ}\text{C}$ 2-3 група стійкості, при $T=750\text{ }^{\circ}\text{C}$ 4-5 група стійкості.

Межа витривалості: $\sigma^{-1} = 279\text{ МПа}$, $n = 107$.

Властивості та особливості електрошлакового зварювання сталі AISI 321: аустенітна хромонікелево-титанова сталь AISI 321 є найбільш широко застосовуваною в промисловості через можливість успішного використання в різних умовах експлуатації. Вона має високу корозійну стійкість у ряді рідких середовищ, стійка до міжкристалітної корозії після зварювального нагріву, має відносно низьку крихкість від тривалого впливу високих температур і може використовуватись як термостійкий матеріал за температури $\sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$. Будучи високопластичною в умовах глибокого холоду, ця сталь використовується в установках для отримання рідкого кисню [24].

Використання у промисловості: деталі, що працюють до $600\text{ }^{\circ}\text{C}$. Зварні апарати та посудини, що працюють у розведених розчинах азотної, оцтової, фосфорної кислот, розчинах лугів та солей та інші деталі, що працюють під тиском при температурі від -196 до $+600\text{ }^{\circ}\text{C}$, а за наявності агресивних середовищ до $+350\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Хімічний склад нержавіючої сталі AISI 321 представлений у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 - Хімічний склад сталі AISI 321

C	Cr	Fe	Mn	Ni	P	S	Ni	Ti
≤ 0.12	17-19.0	осн.	≤ 2.0	9-11.0	≤ 0.035	≤ 0.020	≤ 0.8	≤ 0.8

Сталь AISI 321 – нержавіюча титановмісна сталь аустенітного класу. Хімічний склад регламентований ГОСТ 5632-72 нержавіючої сталі аустенітного класу.

Переваги: висока пластичність та ударна в'язкість.

					КРМ.ПМЗМ-21.00.00.000.ПЗ			Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата				44

Оптимальною термічною обробкою для цих сталей є гартування, після гартування механічні властивості характеризуються максимальною в'язкістю і пластичністю, не високою міцністю і твердістю.

Аустенітні сталі використовують як жароміцні при температурах до 600 °С. Основними легуючими елементами є Cr-Ni. Однофазні сталі мають стійку структуру однорідного аустеніту з незначним вмістом карбідів Ti (для попередження міжкристалітної корозії). Така структура отримується після загартування до температур 1050-1080 °С. Сталі аустенітного та аустенітно-феритного класів мають відносно невеликий рівень міцності (700-850 МПа).

Незамінним елементом будь-яких інженерних конструкцій є залізо. Залізо у вигляді різноманітних високоміцних нержавіючих сталей – другий по застосуванню метал. Скрізь, де навантаження не розподілене по великій площі, а зосереджене в точці або кількох точках, сталь виграє у алюмінію. Конструкція зі сталі, розміри якої не повинні «плисти» під навантаженням, виходить майже завжди компактнішою, а іноді навіть легшою за алюмінієву. Сталь набагато краще переносить вібрацію, більш стійка до нагрівання, сталь дешевша, за винятком самих екзотичних сортів.

Розглянемо ретельніше вплив легуючих компонентів на характеристики нержавіючої сталі. Її основними легуючими елементами є Cr (хром) та Ni (нікель). Високий вміст хрому в марці AISI 321 (від 17 до 19%) забезпечує здатність металу до пасивації та зумовлює сильні антикорозійні характеристики сталі.

Додавання нікелю (від 9 до 11%) переводить сталь до класу аустенітів. Ця властивість має виняткове значення, що дозволяє поєднувати технологічність нержавіючої сталі з розширеним комплексом експлуатаційних характеристик. Такі сталі добре прокатуються в холодному і гарячому стані, мають високу, порівняно з феритними сталями, корозійну стійкість в агресивних середовищах, у тому числі сірчаної кислоти. Вміст нікелю і хрому в сплаві специфічно впливає на стабільність аустеніту при охолодженні температури обробки (1050-

					КРМ.ПМЗМ-21.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		45

1100 °С) на твердий розчин. Для того, щоб сталь мала повністю аустенітну структуру при температурі, що перевищує 900 °С, достатньо наявності 0,1% вуглецю (С). Це обумовлено сильним аустенітоутворювальним впливом даного хімічного елемента.

Крім впливу основних легуючих елементів слід враховувати наявність у сплаві титану, алюмінію та кремнію, які додають йому феритні властивості. Додавання до складу сильного карбідоутворюючого елемента – титану – (Ті) дозволяє усунути схильність сталі до міжкристалітної корозії. Вступаючи в реакцію з вуглецем (С), він утворює тугоплавкий карбід ТіС, виключаючи зменшення концентрації сплаву хрому (Сr) шляхом утворення його карбідів.

Кремній (Si), вміст якого в AISI 321 не більше 0,8%, підвищує густину сталі та дегазує його. Додавання даного елемента збільшує міцність матеріалу та межу плинності, проте трохи знижує пластичність, що ускладнює холодне прокатування. Введенням марганцю (Mn) викликає уповільнення швидкості підростання зерна, що сприяє отриманню дрібнозернистої сталі. Граничний вміст фосфору (P) у сталі марки AISI 321 не може перевищувати 0,035%. Цей показник має критичне значення, оскільки цей вид сталі використовується в криогенній техніці, а фосфор негативно впливає на механічні властивості сплаву. Виникає сильна первинна ліквіація при кристалізації, за низьких температур знижуються пластичні характеристики металу. Основними перевагами сталі марки AISI 321 є висока ударна в'язкість та пластичність. До недоліку можна віднести відносно низьку стійкість до корозії в середовищах, що містять іони хлору, а також сірчаної та соляної кислот [26].

Зварні шви конструкцій, які працюють у контакті з агресивними рідинами, повинні, перш за все, бути стійкими до міжкристалітної корозії [25].

Пластинчасті електроди, виготовлені з гарячекатаних листів, що використовуються для електрошлакового зварювання, містять не менше 0,10% С. При такому вмісті вуглецю через повільне охолодження, характерне для

					КРМ.ПМЗМ-21.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		46

електрошлакового зварювання, можлива схильність шва до міжкристалітної корозії [25]. Цьому сприяє товста кристалічна структура металу шва.

При використанні флюсів, окислення титану, що міститься в електроді, невелике і не перевищує 20%. Однак, навіть невелике зниження концентрації титану в шві з вмістом 0,1% призводить до зниження корозійної стійкості. Тому при зварюванні рекомендується використовувати електроди з низьковуглецевих сталей, щоб його концентрація у шві не перевищувала 0,08%. Якщо концентрація основного металу становить 0,12%, слід використовувати пластинчастий електрод, що містить трохи більше 0,03% С [26].

Підростання зерен у зоні термічного впливу не знижує механічних властивостей зварних з'єднань; проте, це вкрай небажане з погляду корозійної стійкості зони термічного впливу, особливо в зоні, що безпосередньо межує до стику. Коли метал, що зварюється, нагрівається до температур вище 1200-1250°C, карбіди титану розчиняються в аустеніті [26].

При наступному повільному охолодженні, особливо в критичному діапазоні температур (875-450 °C), яке може спричинити розкладання твердого розчину, карбідна фаза виділяється по межах зерен аустеніту, а останній збагачений хромом. В результаті метал, що зварюється, піддається дії міжкристалітної корозії. Щоб цього не сталося при зварюванні під флюсом, необхідно використовувати сталь AISI 321 із строго контрольованим хімічним складом: вміст вуглецю не повинен перевищувати 0,06%, співвідношення титану та вуглецю Ti/C має бути не менше 7 [25].

Інший спосіб усунути схильність зварного шва поблизу лінії плавлення до корозії – це нагрівання протягом 3–4 годин при температурі 850–900 °C з повітряним охолодженням [25].

Сталь і електрод у стані постачання (після гартування у воді від 1100°C) зазвичай мають майже чисту аустенітну структуру з дуже невеликим вмістом, не більше 1% фериту. Через дендритну сегрегацію метал зварного шва містить до

					КРМ.ПМЗМ-21.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		47

7,5% δ -фериту. Це призводить до різкого падіння міцності за умов сильного холоду [25].

Зварні шви на сталі AISI 321 помітно поступаються основному металу в пластичності, що пояснюється дендритною ліквідацією вуглецю. Причиною зниженої ударної в'язкості зварних швів є недостатня стабільність аустеніту при наднизьких температурах. В умовах глибокого холоду можливий розпад аустеніту за схемою $A - M$ або $A - a + K''$, де A – аустеніт, M – мартенсит, a – вторинний ферит, K'' – вторинні карбіди. Наявність невеликої кількості первинного фериту у разі немає вирішального значення. Про це свідчать результати таких дослідів. Частину зразків піддали гартуванню на повітрі після годинного нагріву при 1080°C , завдяки чому була ліквідована дендритна ліквідація вуглецю, але збережена феритна складова. Ударна в'язкість шва підвищилася вдвічі [26].

Таким чином, підвищення ударної в'язкості зварного шва на сталі AISI 321 можна досягти усуненням дендритної ліквідації вуглецю шляхом високотемпературного нагріву. У деяких випадках може бути застосована і місцеве термооброблення швів [26].

Простішим способом підвищення ударної в'язкості металу шва є збільшення вмісту Ni в зварному шві до 12-14%, що забезпечує стабільну аустенітну структуру. Для отримання шва з таким вмістом Ni можна використовувати сталеві електроди типу X23Ni18. При цьому зварні шви без термічної обробки зберігають досить високу пружність за умов сильного холоду. У разі використання сталі AISI 321, як жароміцний матеріал необхідно обмежити вміст первинного фериту у шві до 5%. Це запобігає небезпеці перетворення $\delta - \sigma$ у зварному шві та забезпечується використанням пластинчастих електродів із сталі AISI 321 [27].

При відсутності сталі з високим вмістом вуглецю використовуються електроди з вмістом 0,07-0,08%, а метал шва додатково науглецьовується, наприклад, шляхом подачі зерен деревного вугілля або графіту на поверхню

					КРМ.ПМЗМ-21.00.00.000.ПЗ	Арк
						48
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

шлакової ванни безпосередньо для її отримання. При зварюванні металу перерізом 100×100 мм достатньо забезпечити 1,7 г зерен розміром 1-3 мм. Вміст вуглецю в зварному шві також можна збільшити, ввівши в шлакову ванну 10% від маси шлаку суміші Na₂CO₃ (82-86%) та SiC (14-18%) або використовуючи композитний електрод з AISI 321 та вуглецеві сталі [28].

Шви сталі AISI 321 відрізняються товстою стовпчастою макроструктурою. Литий метал зварного шва містить феритний компонент через дендритну сегрегацію. Під впливом сильного холоду кількість феромагнітної складової збільшується в основному металі та зварному шві. Наприклад, у сталі AISI 321, яка в стані поставки містить 2,5-3% фериту після 30 хвилин знаходження у рідкому азоті (-196°C), кількість магнітної складової збільшується до 7-9% (при кімнатній температурі), та у зварних швах 7,5 - 8,5 та 10-12% відповідно [29].

Цікаво, що після впливу сильного холоду в зоні термічного впливу спостерігається дрібніша структура, ніж при паянні. Гартування руйнує стовпчасту мікроструктуру зварних швів і сприяє певному розчиненню феритного компонента. Зберігається стовпчаста макроструктура, характерна для аустенітних зварних швів [30].

Розрахунок значення еквівалента вуглецю, показав:

$$C_{\text{екв}} = C + \text{Mn}6 + \text{Cr} + \text{Mo} + \text{V}5 + \text{Ni} + \text{Cu}15 = 4,19\%$$

При $C_{\text{eq}} > 0,45\%$ у процесі зварювання стає можливим утворення в металі звареного шва зміцнених структур, які за умови насичення металу воднем і високих зварювальних напружень можуть призводити до утворення таких тріщин.

Розрахунки для сталей, представлених у дослідженні, показали, що в процесі зварювання в металі зварного шва стає можливим утворення зміцнювальних структур, які при насиченні металу воднем і високих зварювальних напруженнях можуть призводити до утворення холодних тріщин.

					КРМ.ПМЗМ-21.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		49

4.4 Дослідження мікроструктури зразків до термооброблення

Дослідження структури зварного шва у вихідному стані без термообробки показало, що за структурою зразок можна розділити на дві основні зони, що відрізняються різною структурою та властивостями: основний метал (метал заготовки), метал зварного шва та зона термічного впливу, що чітко видно на рисунку 4.5.

Структура основного металу – аустеніт із включеннями феритної фази у вигляді невеликих видовжених включень.

На ділянках зварного шва спостерігається зона дендритних кристалів. Ця зона утворена великою кількістю послідовних зварювальних ванн, що знаходяться в основі та в кожному попередньому шарі наплавленого металу.

Слід особливо наголосити, що отриманий наплавлений метал - щільний без дефектів зварювання у вигляді пор, газових бульбашок та тріщин. Типова дендритна мікроструктура наплавленого металу зображена на рисунку 4.5, чітко проглядаються межі між шарами наплавлення (рисунок 4.5 а,б,в,г).

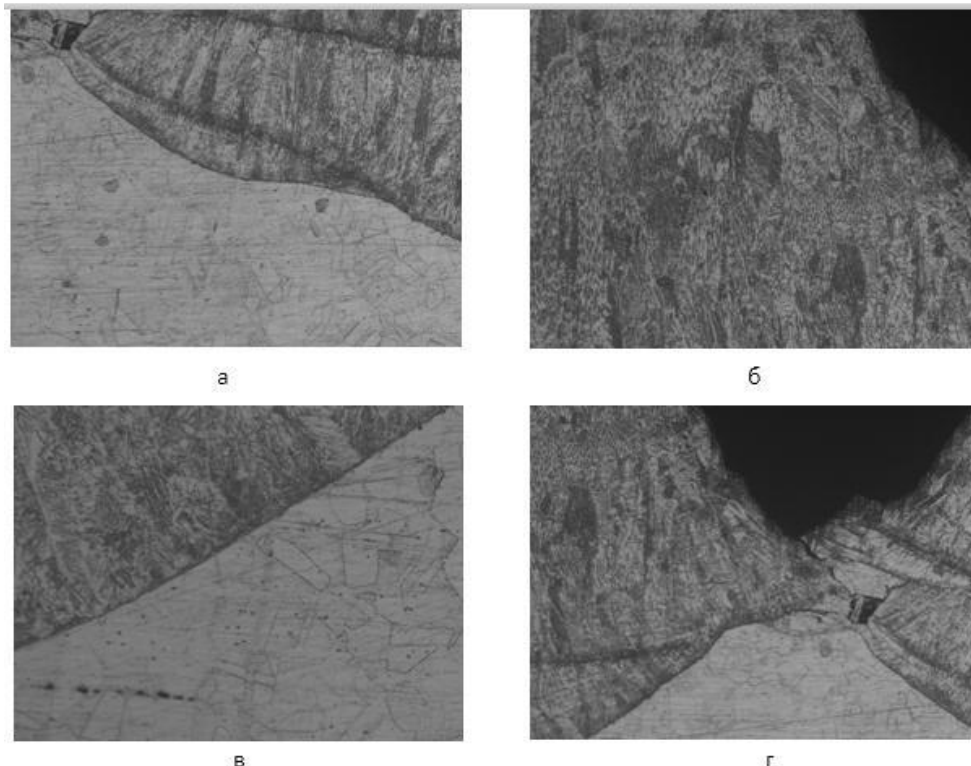


Рисунок 4.5 – Мікроструктура наплавленого металу вихідного зразка, x100

					КРМ.ПМЗМ-21.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		50

Основні осі дендритів спрямовані у бік тепловідведення при кристалізації і охолодженні наплавлених шарів і утворюють певний кут з віссю z (рисунок 4.5 а). Цей кут можна контролювати зміною швидкості руху зварювального пальника під час виконання зварного шва. Добре помітні окремі межі наплавлених шарів, товщина яких коливається від 500 до 1000 мкм.

Таким чином, структура наплавленого металу зразка у вихідному стані стовпчаста, дендритна, характерна для наплавленого металу зварних швів без термооброблення.

4.5 Вплив термічного оброблення на структурний стан зварного шва аустенітної сталі AISI 312

Проведено металографічне дослідження мікроструктури зразків після термооброблення (гомогенізації) при різних температурах нагріву та час витримки згідно з таблицею 3.1.

У структурі зразка №1 та №2 після термообробки за режимом 1 та 2 перекристалізації наплавленого металу не спостерігається. Структура зварного шва зберегла дендритну будову. Видно межі наплавлених шарів, проте структура стала рівновісніша порівняно зі структурою вихідного зразка.

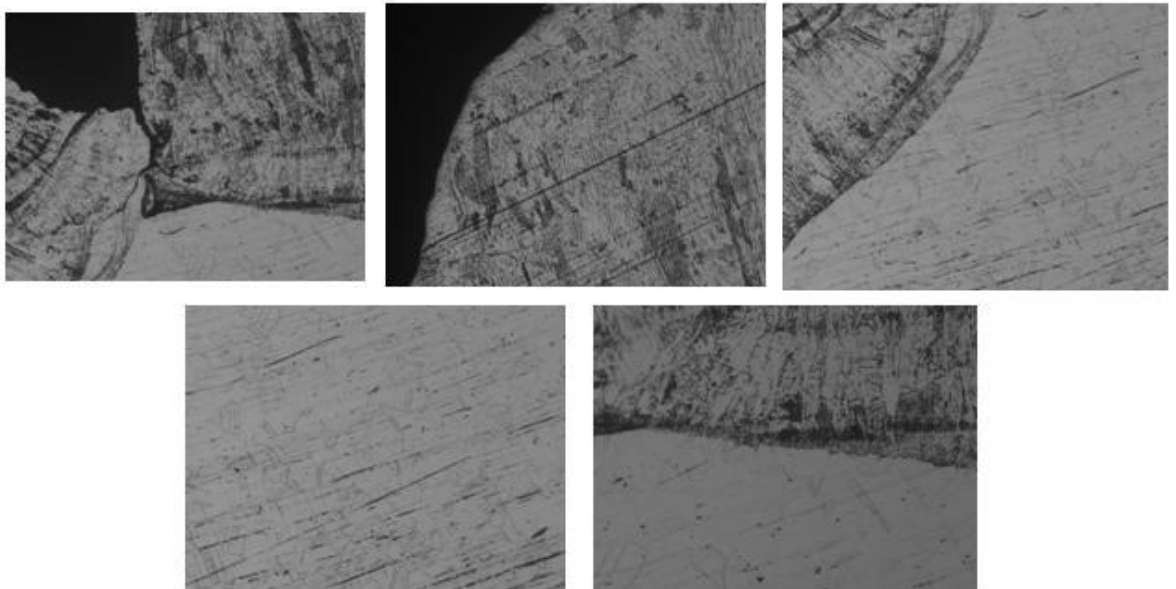


Рисунок 4.6 – Структура наплавленого металу зразків №1 та №2 після термооброблення за режимами №1 та №2 (800 °C)

					КРМ.ПМЗМ-21.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		51

У зварному шві зразків №3 та №4, термооброблених за режимами №3 та №4, спостерігається часткова перекристалізація дендритної структури. Проте дендритна спрямованість зерен збереглася, але меж між шарами наплавлення не спостерігається. Структура наплавленого металу зразків представлена на рисунку 4.7.

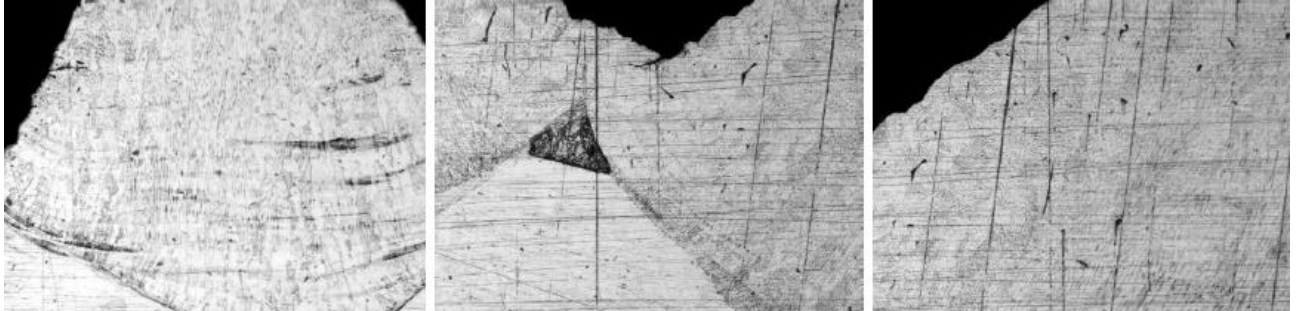


Рисунок 4.7 – Структура наплавленого металу зразків №3 та №4 після термообробки за режимами №3 та №4 (900°C, 30 хв., 60 хв.)

У структурі зварного шва зразка №5, термообробленого за режимом №5, відбулася повна перекристалізація. Структура шва стала аустенітною. Чітко спостерігається межа, що збереглася між основним металом і металом шва. Структура зварного шва зразка представлена на рисунку 4.8.

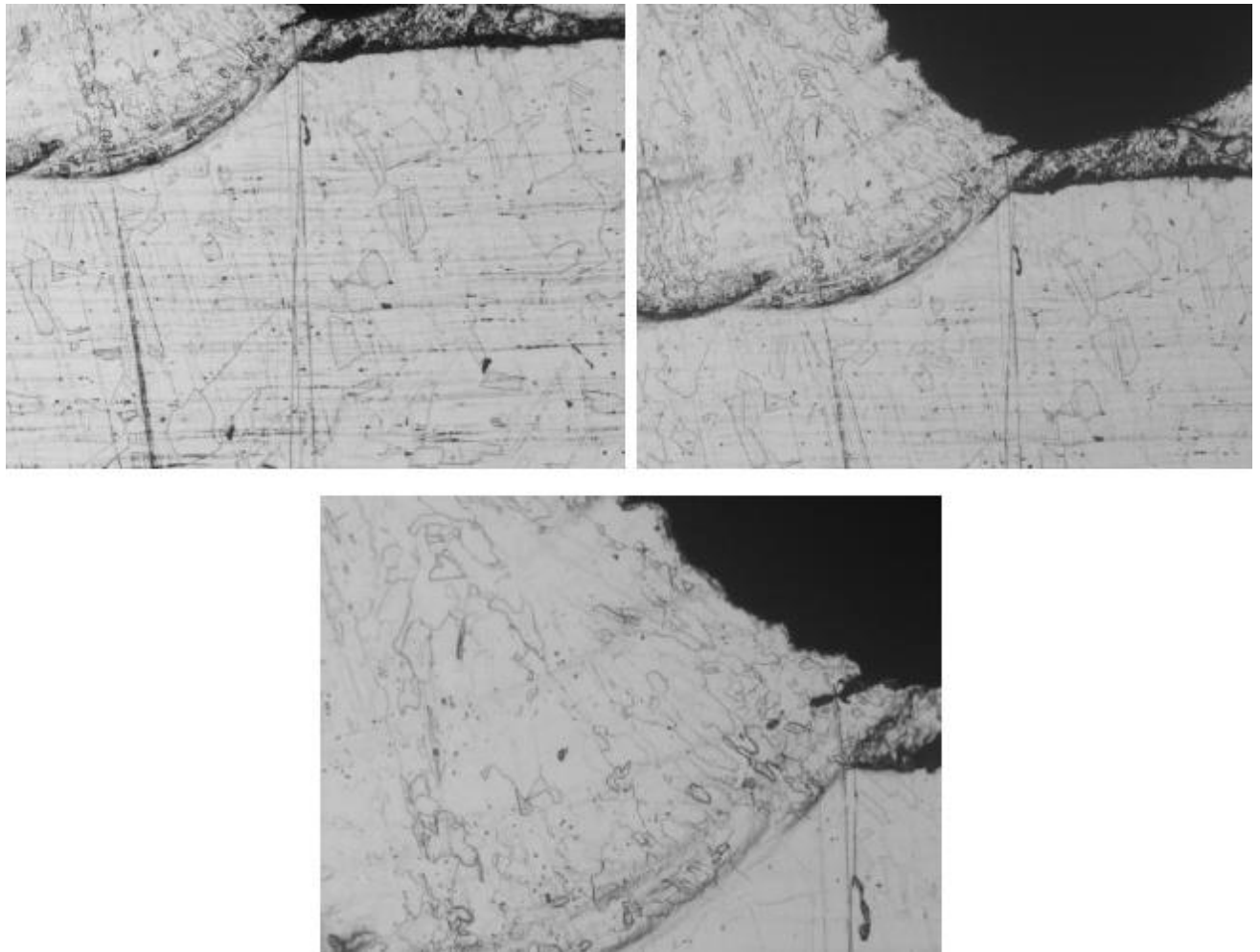


Рисунок 4.8 – Структура зварного шва зразка №5 після термооброблення за режимом №5, $\times 100$ (1000 °C, 30 хв.)

У структурі зварного шва зразка №6, термообробленого за режимом №6, відбулася повна перекристалізація. Структура шва стала аустенітною. Межа між основним металом та наплавленням практично не спостерігається. Величину зерна структури зразка №6 і №5 можна порівняти, що вказує на відсутність підростання зерна при термообробленні за режимом №6. Структура металу зварного шва зразка представлена на рисунку 4.9.

					КРМ.ПМЗМ-21.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		53

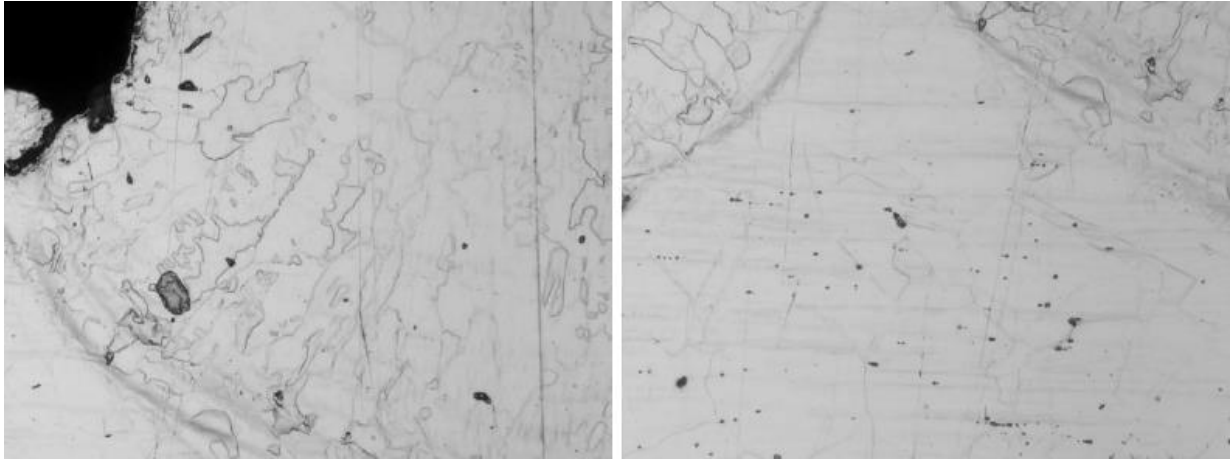


Рисунок 4.9 – Структура металу зварного шва зразка №6 після термооброблення за режимом №6, х200 (1000 °С, 60 хв.)

Твердість металу зразка у вихідному стані до термооброблення:

- основний метал – 175 НВ;
- метал зварного шва – 192 НВ.

Твердість металу зразка після термооброблення за режимом №6:

- основний метал – 148 НВ;
- метал зварного шва – 152 НВ.

					КРМ.ПМЗМ-21.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		54

ВИСНОВКИ

Методом TIG зварювання виконані зварні зразки нержавіючої сталі аустенітного класу марки AISI 321. Проведені дослідження параметрів зварювання та процес вибору оптимального режиму для отримання високоякісного зварного з'єднання, обрали оптимальний спосіб зварювання – аргонодугове, зі зварювальним струмом у діапазоні 70-100 А, виліт електрода 7 мм, та витрата аргону 6-8 л/хв. З використанням зварювальної установки Vitals AC/DC 2000, вольфрамового електрода діаметром 3 мм, зварювального дроту ОК Tigrod 19.85 діаметром 2,6 мм.

Вивчено мікроструктури зразків отриманих у поперечному перерізі заготовки. Зразок можна розділити на основні зони, що відрізняються структурою та властивостями: метал шва, основний метал та зона термічного впливу. Структура металу шва є дендритна (стовпчаста структура), осі дендритів орієнтовані у напрямку тепловідведення при кристалізації. Структура кореневої зони зварного шва сформована більш рівновісними кристалами, що мають так само, як і метал шва, дендритну, але більш дисперсну будову.

Після гомогенізації відпалу з різною витримкою при різних температурних режимах було виявлено, що на третьому і четвертому режимах термооброблення починають з'являтися кардинальні зміни мікроструктури, а саме зароджується процес рекристалізації. На зразках №3 та №4 ще проглядаються залишки дендритної структури у наплавленому металі. На п'ятому та шостому режимах термооброблення відбувається повна рекристалізація наплавленого металу. Структура металу зварного шва стала аустенітною.

У ході виконання роботи було виявлено, що оптимальним режимом гомогенізуючого відпалу є режим №6, при якому структура наплавленого металу стає аустенітною та практично зникає межа між основним та

					КРМ.ПМЗМ-21.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		55

наплавленим металом. Зростання зерна при термообробці за режимом №6 не спостерігається.

Також спостерігали ефект вирівнювання твердості основного та наплавленого металу в результаті термооброблення. Після оптимального режиму відпалу (режим №6) значення твердості наплавленого металу максимально наближається до значення твердості основного металу і становить відповідно 152 та 148 НВ.

Отримання за відпалу в зварному шві аустенітної структури дозволяє зняти зварювальні напруження в зварному шві, що має позитивно позначатися на стійкості зварних з'єднань, виконаних ТІГ зварюванням, до міжкристалітної корозії (МКК) в агресивних середовищах.

					КРМ.ПМЗМ-21.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		56

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Вишемирський В.Є. Стан та основні напрямки розвитку зварювального виробництва ВАТ «Нафтогаз» // Зварювання та діагностика. - 2009. - №1. - С. 16-19.

2. Єльцов В.В. Відновлення та зміцнення деталей машин: електронний навч. посібник/В.В. Єльцов. К., ЗНТУ, 2015.

3. Жоголев В.Є., Романов Ю.Г. Модель впливу термовпливів на стійкість сталей до тріщиноутворення // К., ЗНТУ. 1997. Т. 70. № 3. С. 476-480.

4. Зубченко А.С., Колосков М.М., Каширський Ю.В. Марочник сталей та сплавів.: Інноваційне машинобудування, 2021.

5. Кононенко В.Я. Зварювання в середовищі захисних газів неплавким електродом. – К., ТОВ "Ніка-Принт", 2007. - 266 с.

6. Комп'ютерне проектування та підготовка виробництва зварних конструкцій / С.А. Куркін та ін; За ред. С.А. Куркіна, В.М. Ховів. К: КНТУ, 2002. 464 с.

7. Макаров Е.Л. Холодні тріщини при зварюванні легованих сталей. К: Машинобудування, 1981. 248 с.

8. Макаров Е.Л., Коновалов А.В. Система комп'ютерного аналізу зварюваності та технології зварювання конструкційних легованих сталей // Зварювальне виробництво. 1995. № 3. С. 6-9.

9. Мозок В. М., Лебедев В. А. Нові можливості ремонтів деталей важкої техніки імпульсно-дуговим зварюванням і наплавленням поза ремзаводів // Металообробка. - 2009. - №4. – С. 16–19.

10. Петрова В.А., Баканов А.А., Вальтер А.В., Тріщиностійкість зварних з'єднань, методи зміцнення та контроль якості складового інструменту // V Міжнародна науково-практична конференція «Інноваційні технології та

					КРМ.ПМЗМ-21.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		57

економіка в машинобудуванні»: збірник праць. - Київ: Вид-во КНУ, 2014. - С. 380-385.

11. Прохоров Н.М. Фізичні процеси у металах при зварюванні. Елементи фізики металів та процес кристалізації. К: Металургія, 1968. У 2 т. Т. 1. 695 с.

12. Сараєв Ю.М., Чинахов Д.А. Проблеми розробки ресурсозберігаючої технології зварювання середньолегованих сталей// Сучасні технології в машинобудуванні: збірник матеріалів науково-практичної конференції. – Київ. - 2000. - Ч.І. - С. 125-127.

13. Зварювання та матеріали, що зварюються: У 3 т. Т. 1. Зварюваність матеріалів / За ред. Е.Л. Макарова. М: Металургія, 1991. 528 с.

14. Теорія зварювальних процесів/А.В. Коновалов та ін; За ред. В.М. Нерівний. К: Вид-во КНУ, 2007. 752 с.

15. Федько В.Т., Киянов С.С., Шматченко В.С., Сапожков С.Б. Застосування двострумінних соплових пристроїв для зварювання в середовищі захисних газів // Автоматизація та сучасні технології. - 2003. - №3. - С.12-18.

16. Чигарьов В.В. Підвищення працездатності деталей та інструменту наплавленням гетерогенного шару / В.В. Чигарьов, В.П. Іванов, І.С. Псарєва // Захистметалургійних машин від поломок: зб. наук. пр./ПДТУ. – Маріуполь. - 2003. - Вип. 7. - С. 234-237.

17. Чинахов Д.А., Вплив режимів зварювання плавленням на структуру та властивості сполук із легуваних сталей: монографія / Д.А. Чинахов; Київ: Вид-во КНУ, 2010. - 114 с.

18. Чинахов Д.А., Григор'єва Є.Г. Особливості використання порошкового дроту для наплавлення в СО₂ зношеної поверхні деталей // Актуальні проблеми машинобудуванні. - 2015. - №2. - С. 143-147.

19. Чинахов Д.А. Роль газодинамічного впливу струменя захисного газу на процеси зварювання плавким електродом: монографія / Д.А. Чинахов; Київ: Вид-во КНУ, - 2011. - 151 с.

					КРМ.ПМЗМ-21.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		58

20. Lebedev V.A., Maksimov S.Yu. Reduction in power consumption and weld quality control in welding using a controllable pulsed feed of electrode wire / International Congress on Advances in Welding Science and Technology for Construction, Energy and ansportation Systems (AWST-2011). 24–25 October 2011. – Antalya, Turkey. – 371–373 p.18 ISSN.

21. Chinakhov D.A. Study of thermal cycle and cooling rate of steel 30HGSA singlepass weld joints [Electronic resorces] // Applied Mechanics and Materials. – Vols. 52-54. – 2011. – p. 442-447.

22. Linda Almström, Camilla Söderström. Alternative materials for hightemperature and high-pressure valves. Degree Project of 30 credit points Master of Science in Engineering Mechanical Engineering, specialisation in Materials Engineering. 2010

23. H.L. Du, P.K. Datta, I. Inman, R. Geurts, C. Kübel Microscopy of wear affected surface produced during sliding of Nimonic 80A against Stellite 6 at 20°C. Published in "Materials Science and Engineering A357 (2003) 412-422.

24. J. Jiang, F.H. Stott, M.M. Stack, Wear, 203-204 (1997) 615-625.

25. X.Y. Li, K.N. Tandon, Wear, 245 (2000) 148-161.

26. S. Datta, I. Inman, H.L. Du, Q. Luo, Microscopy of glazed layers formed during high temperature wear, Invited Talk at the Institute of Materials, Tribology Meeting, London, November 2001.

27. W. Betteridge, J. Heslop, The Nimonic Alloys, Edward Arnold (Publishers) Limited London, 1974.

28. CO2 and argon laser vascular welding: Acute histologic and thermodynamic comparison. George E. Kopchok BS Rodney A. White MD Geoffrey H. White MD Roy Fujitani MD Jerry Vlasak MD Leon Dykhovsky MD Warren S. Grundfest MD.// Lasers in Surgery and Medicine. Volume8, Issue6. 1988. Pages 584-588. (<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1532-849X.2006.00082.x>)

29. Crosslinking of extracellular matrix proteins: A preliminary report on a possible mechanism of argon laser welding. Dr. Louann W. Murray Ph.D Lyndon Su

					KPM.ПМЗМ-21.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		59

George E. Kopchok Rodney A. White MD.// Lasers in Surgery and Medicine.
Volume9, Issue5. 1989. Pages 490-496.
(<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/lsm.1900090512>)

30. Evaluation of gas metal arc welding with alternating shielding gases for use on AA6082T6. Stuart W Campbell, Alexander M Galloway, Norman A McPherson, Andrew Gillies.// Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. Volume: 226. Issue: 6. 2012. Page(s): 992-1000.
(<https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0954405412439672>)

					КРМ.ПМЗМ-21.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		60

ДОДАТКИ

					КРМ.ПМЗМ-21.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		61