

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Навчально-науковий Інститут матеріалознавства та зварювання
імені Є.О. Патона
Кафедра смарт технологій з'єднань та інженерії поверхні**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Ігор СМІРНОВ

«__» _____ 2022 р.

**Дипломний проєкт
на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою «Споріднені технології зварювання
та ресурсозбереження»
спеціальності 131 «Прикладна механіка»
на тему: «Дугове наплавлення антикорозійного шару в корпусі реактора
ВВЕР-1000»**

Виконав:

студент IV курсу, групи ЗП-81

Григоращенко Микола Іванович

Керівник:

Доцент, к.т.н.

Степанов Денис Володимирович

Консультант з Охорони праці:

Зав. каф., професор, д.т.н., професор,

Левченко Олег Григорович

Консультант з Економічного розділу:

Доцент, к.е.н.,

Тимошенко Наталія Юріївна

Рецензент:

Ст. викл.,

Дубнюк Віктор Леонідович

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2022 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
НН Інститут матеріалознавства і зварювання ім. Є.О. Патона
Кафедра смарт технологій та з'єднань та інженерії поверхні

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 131 «Прикладна механіка»

Освітньо-професійна програма «Споріднені процеси зварювання і ресурсозбереження»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Ігор СМІРНОВ

«__» _____ 2022 р.

ЗАВДАННЯ
на дипломну роботу студенту
Григоращенку Миколі Івановичу

1. Тема проекту «Дугове наплавлення антикорозійного шару в корпусі реактора ВВЕР-1000», керівник роботи Степанов Денис Володимирович, к.т.н, затверджені наказом по університету від «09»червня 2022 р. № 992-с
2. Термін подання студентом роботи 16 червня 2022 року
3. Вихідні дані до роботи: корпус реактора ВВЕР-1000, матеріал корпусу, вимога до властивостей наплавленого шару
4. Зміст пояснювальної записки: конструкція, умови роботи та матеріали корпусів енергетичних атомних реакторів з водяним теплоносієм, матеріали, що застосовуються для виготовлення та наплавлення корпусів, порівняння способів наплавлення покриття корпусів реактора.
5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) креслення виробу А1, загальний вид обладнання для наплавлення А1, розподіл кільцевих залишкових напружень після наплавлення А1, матеріали для наплавлення А1, схема технологічного процесу А1.

6. Консультанти розділів роботи*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Левченко О.Г. професор		
Економіка	Тимошенко Н.Ю., доцент		

7. Дата видачі завдання 30 травня 2022 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Аналіз стану проблеми	04.06.2022	
2	Вибір способу наплавлення	08.06.2022	
3	Порівняння автоматизованого і ручного способів	12.06.2022	
4	Розробка технології	13.06.2022.	
5	Заходи з охорони праці	15.06.2022	
6	Розробка економічного обґрунтування прийнятих рішень	17.06.2022	

Студент

Микола ГРИГОРАЩЕНКО

Керівник

Денис СТЕПАНОВ

АНОТАЦІЯ

Тема дипломної роботи – «Дугове наплавлення антикорозійного шару в корпусі реактора ВВЕР-1000».

Дипломна робота написана на 69 сторінках, містить 20 рисунків, 12 таблиць, 27 формул та 35 посилань.

Ключові слова: атомний реактор, ВВЕР-1000, дугове наплавлення, автоматизоване наплавлення, наплавлення стрічкою, залишкові напруження.

У вступі обґрунтовано актуальність теми, порівняння атомної енергетики з іншими способами одержання електроенергії.

У першому розділі описано атомний реактор ВВЕР-1000, розглянуті складнощі у виготовленні, проблеми що виникають при експлуатації.

У другому розділі розглядаємо матеріали що використовують при виготовленні корпусів. Розглянуто рекомендовані для наплавлення матеріали та їх зарубіжні аналоги.

У третьому розділі виконано порівняння двох рекомендованих способів ручного дугового штучним електродом і автоматизованого стрічкою. Визначено залежності структури металу від параметрів наплавлення.

У четвертому розділі наведено автомат для наплавлення, розглянуто його модулі.

У п'ятому розділі розроблена технологія для наплавлення внутрішньої стінки корпусу реактора.

У шостому розділі проведено аналіз можливих загроз, способів їх уникнення.

У сьомому розділі виконано розрахунок економічної доцільності вибраного способу наплавлення.

ANNOTATION

Thesis topic - "Arc surfacing of the anti-corrosion layer in the reactor vessel WWER-1000".

Thesis is written on 69 pages, contains 20 figures, 12 tables, 27 formulas and 35 references.

Key words: nuclear reactor, WWER-1000, arc surfacing, automated surfacing, tape surfacing, residual stresses.

The introduction substantiates the relevance of the topic, the comparison of nuclear energy with other methods of obtaining electricity.

The first section describes the WWER-1000 nuclear reactor, discusses the difficulties in manufacturing, problems that arise during operation.

In the second section we consider the materials used in the manufacture of housings. The materials recommended for surfacing and their foreign analogues are considered.

The third section compares the two recommended methods of manual arc with an artificial electrode and automated tape. The dependences of the metal structure on the surfacing parameters are determined.

The fourth section presents the surfacing machine, its modules are considered.

In the fifth section, the technology for surfacing the inner wall of the reactor vessel is developed.

The sixth chapter analyzes the possible threats, ways to avoid them.

In the seventh section, the calculation of the economic feasibility of the chosen method of surfacing.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1 КОНСТРУКЦІЯ, УМОВИ РОБОТИ ТА МАТЕРІАЛИ КОРПУСІВ ЕНЕРГЕТИЧНИХ АТОМНИХ РЕАКТОРІВ З ВОДЯНИМ ТЕПЛОНОСІЄМ	9
1.1 Конструкція реакторів	9
1.2 Деякі особливості виготовлення та експлуатації реакторів	13
2 МАТЕРІАЛИ, ЩО ЗАСТОСОВУЮТЬСЯ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ТА НАПЛАВЛЕННЯ КОРПУСІВ	17
2.1 Низьколеговані перлітні сталі.....	17
2.2 Аустенітні нержавіючі хромонікелеві сталі	19
3 ПОРІВНЯННЯ СПОСОБІВ НАПЛАВЛЕННЯ ПОКРИТТЯ КОРПУСІВ РЕАКТОРА	24
4 АПАРАТУРА ДЛЯ НАПЛАВЛЕННЯ КОРПУСІВ.....	44
5 РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ НАПЛАВЛЕННЯ.....	49
6 ОХОРОНА ПРАЦІ	52
7 ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ	58
ВИСНОВКИ.....	65
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	66

					ЗП 81.04.0000.000		
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат			
Розроб.		Григорашенко М.І.			Дугове наплавлення антикорозійного шару в корпусі реактора ВВЕР-1000		
Перевір.		Степанов Д.В.					
Н. Контр.		Чорний А.В.					
Затверд.		Смирнов І.В.					
					Літ.	Арк.	Акрушів
						6	69
					КПІ ім. Ігоря Сікорського, НН ІМЗ ім. Є.О. Патона, гр. ЗП-81		

ВСТУП

Споживання енергії у всьому світі безперервно збільшується. Люди переходять із вживання нафтогазових продуктів у бік використання електроенергії. Активно ведеться боротьба за екологію.

Гідроелектростанції важкі у виробництві, вимагають певного рельєфу створення якого сильно порушує екосистему найближчої місцевості.

Вітряні електростанції на даний момент показують сумні показники з виділення електроенергії, і хоч це і вважається екологічно чистим виробництвом, шуми створювані лопастями спочатку не помітні, але через якийсь час спостерігається зникнення тварин в радіусі пари кілометрів від зони розташування ВЕС, найближчі селища пустують, люди скаржаться на поганий сон та головний біль.

Сонячна електростанція є найбільш екологічно чистою, але при цьому кількість енергії, що виділяється критично низька, а витрати на створення панелей які вловлюють сонячне світло досить великі.

Теплова електростанція при значному споживанні вугілля/нафти та викидах в атмосферу видає велику кількість енергії. Забезпечена сучасними системами очищення продуктів спалювання вугілля, ТЕС викидає за один рік в атмосферу за різними оцінками від 7 до 120 тис. т. оксидів сірки, 2-20 тис. т оксидів азоту, 700-1500 т попелу (без очищення вдвічі-втричі більше) і виділяє 3-7 млн. тонн вуглекислого газу, крім того, утворюється понад 300 тис. т золи, що містить близько 400 т токсичних металів (миш'як, кадмій, свинець, ртуть) [1].

Атомна електростанція до цього дня вважається одним із найнебезпечніших способів отримання електроенергії, на приклад тому весь світ пам'ятає про аварії на Фукусімі та Чорнобильській АЕС. Але не дивлячись на можливу небезпеку АЕС є найпродуктивнішим способом отримання енергії, при всіх оманах кількість радіації, що виділяється при виробленні 1 ГВт. год електроенергії на АЕС дає колективну дозу опромінення - 2,5 чол-Зв, а на ТЕС 4 чол-Зв. Колективна доза опромінення населення України за рахунок теплової енергетики склала в 1991 р

					ЗП 81.04.0000.000.ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

[1]. 767 чол-Зв та за рахунок атомної - 188 чол-Зв. Таким чином, Атомні електростанції є найкращим компромісом у плані отримання електроенергії та забруднення планети.

В Україні більша частина атомних енергетичних реакторів відноситься до типу ВВЕР-1000, корпус якого виготовлено із товстостінних кованих обичайок із низьколегованої високоміцної сталі марки 15Х2НМФА, які з'єднуються між собою за допомогою зварювання кільцевими швами. Для захисту від корозії внутрішня поверхня корпусу наплавлена антикорозійним шаром із аустенітного матеріалу.

Важливим завданням удосконалення ядерних реакторів на теплових нейтронах є підвищення потужності корпусних водоводяних реакторів до 1000 - 2000 МВт. Їх створення потребує вирішення наступних проблем: Подовження ресурсу безпечної експлуатації діючих корпусів реакторів (КР), для обґрунтування якого необхідно враховувати залишкові напруження (ЗН), які виникають в результаті зварювального або наплавного нагріву, та їх перерозподіл після термообробки. Технологічні параметри дугового антикорозійного наплавлення можуть значно впливати на мікроструктурний фазовий склад зони термічного впливу (ЗТВ) основного матеріалу, корпусної сталі 15Х2НМФА, а також на розподіл залишкових напружень.

Найбільш відповідальним вузлом енергоблоку є корпус атомного реактора. Матеріали та технологія виробництва, що використовується при виготовленні корпусів повинні забезпечувати максимальну надійність і безпеку роботи ядерних енергетичних установок,

Антикорозійна наплавка один із найскладніших і трудомістких технологічних процесів у виробництві корпусів енергетичних атомних реакторів. Досить сказати, що операції пов'язані з наплавленням корпусу реактора середньої потужності на західноєвропейських заводах займає до півроку.

					ЗП 81.04.0000.000.ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 КОНСТРУКЦІЯ, УМОВИ РОБОТИ ТА МАТЕРІАЛИ КОРПУСІВ ЕНЕРГЕТИЧНИХ АТОМНИХ РЕАКТОРІВ З ВОДЯНИМ ТЕПЛОНОСІЄМ

1.1 Конструкція реакторів

Реактор енергетичний ВВЕР-1000 призначений вироблення теплової енергії з допомогою ланцюгової реакції розподілу атомних ядер. Реактор водоводяний, гетерогенний, корпусного типу, що працює на теплових нейтронах з водоводяним теплоносієм-уповільнювачем (вода під тиском) показано на рис. 1.1.



Рисунок 1.1 – Корпус ВВЕР-1000

Реактор являє собою вертикальну циліндричну посудину з еліптичним днищем, усередині якої знаходиться активна зона та внутрішньокорпусні пристрої. Зверху він закритий герметичною кришкою, закріпленою шпильками, на якій розташовуються електромагнітні приводи механізмів органів регулювання та захисту реактора (приводи СУЗ) та патрубки для виведення кабелів датчиків внутрішньореакторного контролю. У верхній частині корпусу в два ряди знаходяться вісім патрубків для підведення та відведення теплоносія, по два на кожну з чотирьох петель, чотири патрубки для аварійного підведення теплоносія

					ЗП 81.04.0000.000.ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

у разі розгерметизації першого контуру та один патрубок для контрольно-вимірювальних приладів.

Примусова циркуляція теплоносія здійснюється за чотирма замкнутими петлями першого контуру за рахунок роботи основних циркуляційних насосів (ОЦН). Вода першого контуру, охолоджена в парогенераторах, надходить у реактор через нижній ряд напірних патрубків, проходить вниз по кільцевому зазору між корпусом і внутрішньокорпусною шахтою, потім через еліптичне перфороване днище і опорні труби шахти входить в ТВС. З ТВС через перфоровану нижню плиту БЗТ нагрітий теплоносій виходить у міжтрубний простір БЗТ, а потім кільцевий зазор між шахтою і корпусом і через чотири верхніх вихідних патрубка корпусу виходить з реактора.

Регулювання реактивності і, тим самим, тепловиділення здійснюється переміщенням органів регулювання з твердим поглиначем, а також зміною концентрації борної кислоти теплоносії.

Корпус реактора призначений для розміщення внутрішньокорпусних пристроїв (СКУ) та активної зони реактора. При конструюванні та виготовленні корпусів ВВЕР ставилося завдання забезпечення багаторічної (не менше 40 років) надійної експлуатації реактора у різних режимах. Корпус реактора працює в дуже жорстких умовах: високі тиск і температура теплоносія, потужні потоки радіоактивного випромінювання, значні швидкості теплоносія, який навіть за високого ступеня чистоти є корозійно-активним середовищем.

На внутрішній поверхні фланця корпусу реактора виконаний борт для спирання внутрікорпусної шахти. На верхньому торці фланця корпусу є 54 різьбових гнізда під шпильки головного роз'єму М 170х6 і дві У-подібні кільцеві канавки для розміщення в них пруткових нікелевих ущільнювальних прокладок, а також передбачена контактна поверхня для щільного прилягання фланця кришки.

Зона патрубків складається з двох обичайок, у кожній з яких є по 4 головні циркуляційні патрубки Ду850 - у нижній обичайці для входу теплоносія, у верхній - для виходу. На рівні осей верхнього та нижнього рядів патрубків Ду850

					ЗП 81.04.0000.000.ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

розташовані по 2 (всього 4) отвори з патрубками Ду350 (0351х36 м) для організації аварійного охолодження активної зони реактора.

На рівні верхнього ряду патрубків Ду850 виконаний один патрубок для виведення імпульсних ліній корпусу реактора («зірочка»). Кожна імпульсна лінія на виході з патрубка має спеціальний пристрій, що відключає. З корпусу реактора проекту-320 виведено 9 імпульсних ліній.

Для контролю протікання головного роз'єму в тілі фланця корпусу реактора виконані свердління, що закінчуються різьбовими отворами, в яких встановлені штуцери для підключення трубопроводу контролю протікання між прокладками.

На внутрішній поверхні верхньої обичайки зони патрубків нижче за рівень вихідних патрубків Ду850 приварено кільце - роздільник потоку теплоносія. Внутрішній діаметр кільця обраний з умови нульового натягу між ним і шахтою реактора при робочій температурі для мінімізації байпасного перетікання ненагрітого теплоносія з «холодних» в «гарячі» петлі ГЦТ минаючи активну зону реактора (у холодному стані РУ цей зазор дорівнює 6 мм).

Ядерним паливом служить спечений двоокис урану, збагачений ураном - 235 до 3,3 %. Для першого завантаження використовується паливо нижчого збагачення (1-2%). Конструктивно корпус реактора зазвичай виконується як циліндрична зварюкована встановлена вертикальна посудина зі сферичним або еліптичним днищем та кришкою . У стінці корпусу, симетрично осі циліндра, в один або два яруси, розташовуються патрубки. Охолоджена парогенераторах вода надходить через впускні патрубки в корпус реактора. Стікаючи вниз, вона омиває твели в активній зоні і, нагріта, виводиться через випускні патрубки з корпусу парогенератор. У зоні патрубків стінки корпусу мають потовщення. Чим вище продуктивність реактора, тим більші його розміри та товщина стінок.

Нині усім АЕС з ВВЕР-1000 реалізовано трирічний паливний цикл, тобто, кожна ТВС використовується у реакторі протягом річних кампаній. Проте ведуться активні наукові розробки щодо переходу на чотирирічну кампанію.

У конструкцію радянських реакторів ВВЕР закладено такі основні рішення.

					ЗП 81.04.0000.000.ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1) для корпусу реактора застосовується високоміцна низьколегована сталь, що забезпечує мінімальні габарити, масу та можливість транспортування його залізницями.

2) Корпус реактора виготовляється з цілісних обічанок, без поздовжніх зварних швів, що підвищує надійність експлуатації реактора.

3) Нижня частина корпусу реактора, де розташована активна зона, виконується у вигляді цілої циліндричної оболонки з еліптичним днищем без будь-яких вирізок та отворів. Вхідні та вихідні патрубки для приєднання головних циркуляційних трубопроводів, а також інші комунікації розташовуються вище верхньої частини активної зони не менше ніж на 1 м. Це забезпечує підвищену міцність реактора та збереження активної зони в аварійних ситуаціях, пов'язаних з розушчільненням першого контуру.

4) Внутрішньокорпусні пристрої виймані, що забезпечує можливість їх ремонту, заміни та контролю внутрішньої поверхні корпусу.

5) Обладнання СУЗ, системи контролю над роботою реактора розміщується у верхній частині реактора.

6) Опора розташована серед частини реактора, що забезпечує мінімальні температурні деформації при переході реактора з холодного стану в гаряче. Опорою служить кільцевий борт, що становить єдине ціле зі стінкою корпусу.

7) Еліптичне днище корпусу виготовляється з однієї цільноштампованої заготовки, без поздовжніх зварних швів, що підвищує його надійність.

Деякі параметри ВВЕР-1000

Електрична потужність, 2x500 Мвт

Теплова потужність, 3000 Мвт

К.К.Д. брутто, 33 %

Тиск пару перед турбиною, 60 ат.

Тиск у першому контурі, 160 ат.

Кількість петель 4

Витрати води через реактор, 76000 м³/год

Температура води на вході в реактор, 289 °С

					ЗП 81.04.0000.000.ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Еквівалентний діаметр, 3,12 м.

Висота, 3,5 м.

Кількість паливних касет 151

Діаметр стрижневого твела, 9,1 мм.

Кількість стрижней у касеті 331

Крок ґратки, 12,6 мм.

Завантаження урану, 66 т.

Середня глибина вигорання палива в стаціонарному режимі, 26-40 Мвт/доба

Середній час роботи між перевантаженням палива, 7000 год

Середнє збагачення палива підживлення в стаціонарному режимі, 3,3-4,4 %

Середня питома енергонапруженість об'єму активної зони, 111 квт/л

Середнє лінійне навантаження, 176 вт/см

Початковий запас реактивності при 20 °С, 22,5 %

Кількість механізмів регулювання, 109

Сумарна ефективність органів керування при 20 °С, 6,2 %

1.2 Деякі особливості виготовлення та експлуатації реакторів

Численні зварювальні та наплавні операції при спорудженні реакторів визначають появу значних залишкових зварювальних напруг. Ці напруги, складаючись зі змінюю робочими напружками реактора, можуть стати причиною його крихкого руйнування внаслідок малоциклової втоми. Тому після зварювання та наплавлення окремих елементів корпусу проводиться відпустка для зняття напруги. Потім елементи збирають у вузли, зварюють сполучні шви, після чого слід відпустка. У процесі виготовлення корпусу відпустку доводиться багато разів повторювати. У процесі експлуатації вузли реактора контактують із теплоносієм. На межі розділу конструкційний матеріал – теплоносій розвиваються корозійні процеси. Корозія є причиною

значної частини аварій ядерних енергетичних установок. Накопичення продуктів корозії в першому контурі, активація їх в активній зоні та відкладення

					ЗП 81.04.0000.000.ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

на елементах конструкції ускладнюють обслуговування реактора, ускладнюють проведення ремонтних робіт. Наплавлення аустенітними нержавіючими сталями значно підвищує корозійну стійкість внутрішніх робочих поверхонь елементів реакторів.

Швидкість загальної корозії аустенітних нержавіючих сталей у воді, в статичних умовах, при температурі 280 - 350 °С становить 0,8 - 4,0 мкм/рік, а в пароводяній суміші за наявності кисню, при температурі до 600 °С і тиску до 350 кг/мм² вона дорівнює 5 - 10 мкм/рік. У промислових установках під дією радіації та при циркуляції води та пари швидкість корозії дещо підвищується, але до 600 °С залишається в допустимих межах.

Наявність у сталі або наплавленому шарі шлакових включень, тріщин, раковин, різних забруднень та інших неоднорідностей може призвести до розвитку місцевої корозії (виразкової, точкової або окремими плямами). Цей вид корозійних пошкоджень особливо небезпечний для тонкостінних оболонок твелів.

Розвитку місцевої корозії сприяють іони хлору, що знаходяться у воді. Їхня присутність посилює процеси депасивації поверхні металу. Тому допустима кількість хлоридів у воді реактора обмежується 0,1 мг/л.

Дуже небезпечна міжкристалітна корозія (МКК) аустенітних нержавіючих сталей. Витримка цих сталей при 550 - 650 °С призводить до випадання складних карбідів хрому та заліза за межами аустенітних зерен. Кордони збіднюються хромом, їх електрохімічна стійкість зменшується. Хімічний агент впроваджується в метал за межами, не торкаючись самих зерен /7/. Найбільш інтенсивно МКК розвивається у кислих середовищах за підвищеної температури. При температурі вище 100 ° та високому тиску МКК розвивається за наявності у воді та парі кисню більше 0,1 - 0,3 мг/кг.

Аустенітні нержавіючі сталі при спільному впливі напруг, що розтягують, і агресивного середовища, що містить хлориди і кисень, піддаються корозійному розтріскуванню. Це, наприклад, можливе в місцях з млявою циркуляцією теплоносія, де в результаті упарювання вміст хлоридів підвищується до небезпечної концентрації.

					ЗП 81.04.0000.000.ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

При вступі в активну зону у воді протікає радіоліз, що веде до утворення кисню та водню. Радіолітичний кисень, що утворився в перший період роботи реактора, витрачається на процес корозії. Зміст водню у воді першого контуру при цьому поступово збільшується до 5 - 50 н.см³/літр і придушується радіоліз. Для зв'язування кисню на початку роботи реактора в перший контур вводять гідразин, це неорганічна речовина, безбарвна, надзвичайно токсична, сильно гігроскопічна рідина з неприємним запахом.

Корпус реактора під час експлуатації піддається інтенсивному нейтронному опроміненню. При цьому конструкційні матеріали можуть істотно змінювати свою структуру та властивості. Основну роль у радіаційних пошкодженнях відіграє утворення точкових дефектів - вакансій та міжузельних атомів, а також виникнення областей із підвищеною температурою. Скупчення вакансій постійно розвиваються всередині зерен у мікропори та дислокаційні петлі.

Розвиток пір іноді веде до збільшення обсягу матеріалу. Так в аустенітних нержавіючих сталях (304, 304L та ін) в результаті утворення пір і втомних тріщин розпухання при інтегральних потоках $\approx 10^{23}$ нейтрон/см² може досягати 7-10 %.

Під впливом нейтронного опромінення зростає межа міцності і, особливо, межа плинності матеріалу, підвищується температура переходу в крихкий стан і знижується ударна в'язкість, що створює небезпеку крихкого руйнування. Помітне підвищення критичної температури крихкості у більшості низьколегованих сталей з дрібнозернистою структурою починається при опроміненні в потоці 10^{16} нейтрон/см². Після опромінення інтегральним потоком порядку 10^{20} нейтрон/см² критична температура крихкості зростає на 120 - 130 °С, величина ударної в'язкості при температурі вище критичної знижується на 30-50% [6].

Механічні характеристики матеріалу залежить від температури опромінення. Опромінення при 130 - 140 °С призводить до більш сильного хрупіння, ніж опромінення при 50 - 60 °С. Це зумовлено, ймовірно, рухом та коагуляцією точкових дефектів, або виділенням дисперсних карбідів та нітридів. Починаючи з 230-260 °С ефект опромінення зменшується завдяки рухливості та відпалу

					ЗП 81.04.0000.000.ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

дефектів. Далі зміна властивостей стала тим меншою, чим вище температура опромінення. При 450 - 500 °С опромінення інтенсивними інтегральними потоками практично не змінює властивості низьковуглецевих та низьколегованих сталей.

					ЗП 81.04.0000.000.ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 МАТЕРІАЛИ, ЩО ЗАСТОСОВУЮТЬСЯ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ТА НАПЛАВЛЕННЯ КОРПУСІВ

2.1 Низьколеговані перлітні сталі

При проектуванні та будівництві перших енергетичних реакторів як основний конструкційний матеріал використовували аустенітну хромонікелеву сталь. Пояснювалося це її високою корозійною стійкістю, що зводить до мінімуму забруднення певного контуру продуктами корозії. Однак, внаслідок низької міцності та високої вартості нержавіючих сталей, в даний час для виготовлення корпусів використовують низьколеговані перлітні сталі табл. 2.1. Сучасні корпусні сталі за нормальної та робочої температури повинні мати межу міцності $> 55 \text{ кг/мм}^2$ ($> 550 \text{ МПа}$). Межа плинності за нормальної температури має бути $> 35 \text{ кг/мм}^2$ ($> 350 \text{ МПа}$), а при робочій $> 28 \text{ кг/мм}^2$ ($> 280 \text{ МПа}$), згідно з вимогами ASME при проектуванні корпусу допустиме навантаження становить $18,9 \text{ кг/мм}^2$ (189 МПа).

З огляду на це навантаження розраховується товщина стінки корпусу. Патрубкова зона, ослаблена отворами, робиться товще корпусу. Корпусна сталь не повинна бути схильною до старіння та крихтування в умовах експлуатації. Сталь має бути дрібнозернистою і максимально чистою. Ефективним засобом одержання таких сталей є вакуумна плавка.

Зі сталей наведених у табл. 2.2. сталь 22К має невисокі механічні властивості та зазвичай застосовується для виготовлення трубопроводів та барабанів сепараторів. Інші сталі з табл. 2.1. використовуються для виготовлення корпусів реакторів. Механічні властивості сталей показані у табл. 2.2. Сталь І5Х2НМФА застосовується для виготовлення корпусів реакторів ВВЕР-1000 та ін. Поставляється за ТУ 428-61.

					ЗП 81.04.0000.000.ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.1 - Хімічний склад деяких корпусних перлітних сталей.

Марка сталі	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	Cu	S	P
								Не більше		
22К	$\frac{0,19}{0,26}$	$\frac{0,2}{0,4}$	$\frac{0,75}{1}$	$\leq 0,4$	$\leq 0,3$	-	-	-	0,045	0,045
15Х2МФА	$\frac{0,13}{0,18}$	$\frac{0,17}{0,37}$	$\frac{0,3}{0,6}$	$\frac{2,5}{3}$	$\leq 0,4$	$\frac{0,6}{0,8}$	$\frac{0,25}{0,35}$	-	0,025	0,025
15Х2НМФА	$\frac{0,13}{0,18}$	$\frac{0,17}{0,37}$	$\frac{0,3}{0,6}$	$\frac{1,7}{2,4}$	$\frac{1}{1,5}$	$\frac{0,5}{0,7}$	$\leq 0,12$	0,3	0,02	0,02
22NiMoCr37	$\frac{0,17}{0,27}$	0,4	$\frac{0,5}{1}$	$\frac{0,3}{0,5}$	$\frac{0,6}{1}$	$\frac{0,5}{0,8}$	-	-	0,025	0,025
A508 кл.2	0,27	$\frac{0,11}{0,39}$	$\frac{0,44}{0,96}$	$\frac{0,2}{0,5}$	$\frac{0,47}{0,93}$	$\frac{0,49}{0,76}$	$\leq 0,05$	-	0,025	0,025
A533В	0,25	$\frac{0,23}{0,32}$	$\frac{1,1}{1,55}$	-	$\frac{0,37}{0,73}$	$\frac{0,41}{0,64}$	-	-	0,035	0,04

Таблиця 2.2 - Механічні властивості корпусних перлітних сталей (після усіх етапів термообробки).

Марка сталі	Температура +20 °С					Температура +350 °С				
	δ_B , кгс/м м ²	δ_T , кгс/м м ²	δ , %	Ψ , %	a_n , (кгс·м)/с м ²	δ_B , кгс/м м ²	δ_T , кгс/м м ²	δ , %	Ψ , %	a_n , (кгс·м)/м м ²
22К	44	22	20	-	6	36	20	-	-	-
15Х2МФА	58	44	14	50	8	50	38	14	50	8
15Х2НМФА	62	50	15	55	6	55	45	14	50	-
A508 кл.2	55	35	18	38	-	-	-	-	-	-
A533В	55	35	18	-	-	-	-	-	-	-

Сталь 15Х2НМФА розроблена для виготовлення реакторів ВВЕР-1000. Ця сталь повинна виплавлятися в кислій мартенівській печі дуплекс-процесом або в основній електродуговій печі. ТУ 24-10-003-73 передбачають поставку сталі у вигляді поковок, листів (плит), листових заготовок та штампувань.

					ЗП 81.04.0000.000.ПЗ					Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						18

Західнонімецька сталь 22NiMoCr37 та аналогічна американська сталь ASME A508 кл.2 застосовується для корпусів зі стінками великої товщини, добре кується. З неї виготовляють кільцеві поковки, патрубки, фланці. Має хороші міцнісні та пластичні властивості. Ударна в'язкість зразків з V - подібним гострим надрізом (Шарпі) $\geq 5,2$ кгс.м/см² при 12 °С. Інша американська корпусна сталь ASME A533В кл.1 відмінно прокатується і поставляється у вигляді листів.

2.2 Аустенітні нержавіючі хромонікелеві сталі

Вода високої частоти, що використовується як теплоносій в реакторах ВВЕР, все ж є досить агресивним корозійним середовищем. Тому до корозійної стійкості конструкційних матеріалів першого контуру пред'являє жорсткі вимоги, задоволення яких доводиться застосовувати нержавіючі сталі типу 18/8 (або вірніше 20/10). Ці сталі в даний час використовуються для наплавлення внутрішньої поверхні корпусів, кришок днищ, патрубків та трубопроводів реакторів, а також для виготовлення оболонок твелів та інших елементів активної зони.

Склад деяких хромонікелевих сталей наведено у табл. 2.3. Сталі цього класу стійкі проти корозії у воді (до температури 360 °С) і у водяній перегрітій парі (до 650 °С). Сталі технологічні і мають досить високі механічні характеристики аж до температури 600 - 650°С, що дає можливість використовувати їх у реакторах з високим тиском теплоносія.

Властивості сталі значною мірою визначаються співвідношенням аустенізаторів та феритизаторів. Перші – знижує корозійну стійкість і підвищують пластичність, другі – підвищують корозійну стійкість та зміцнюють сталь.

					ЗП 81.04.0000.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

Таблиця 2.3 - Хімічний склад деяких корпусних перлітних сталей.

Марка сталі	C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P	Інші
						Не більше		
08X19H10Г2Б	0,1	$\frac{0,2}{0,45}$	$\frac{1,8}{2,2}$	$\frac{18,5}{20,5}$	$\frac{9,5}{10,5}$	0,02	0,03	$\frac{0,9}{1,3}$ ^{NB}
07X25H13	0,09	$\frac{0,5}{1}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{23}{26}$	$\frac{12}{14}$	0,018	0,025	-
$\frac{304L}{1.4306}$	0,03	≤1	≤2	$\frac{18}{20}$	$\frac{8}{12}$	-	-	-
$\frac{308L}{1.4316}$	0,025	≤0,4	≤1, 75	$\frac{19}{21}$	$\frac{8}{12}$	-	-	-
$\frac{309L}{1.4332}$	0,025	0,3	1,8	24	12,5	-	-	-
$\frac{309NB}{1.4556}$	0,025	0,4	2,1	24	12,5	-	-	0,8NB
$\frac{347L}{1.4555}$	0,025	0,35	1,7	20	10	-	-	0,6NB

Основним аустенізуючим елементом сталі є нікель. Збільшення змісту зазвичай підвищує пластичні властивості сталі. Аустенізуюча дія нікелю залежить від вмісту хрому. Дія забезпечення суто аустенітної структури необхідне співвідношення хрому до нікелю $\leq 1,8:1$. Однак, наплавлений метал з чисто аустенітною структурою схильний до утворення гарячих тріщин, внаслідок утворення легкоплавких стік по межах стовпчастих кристалів. Такі евтектики утворює сірка, вуглець, ніобій, кремній та, у деяких випадках, фосфор.

Двофазний наплавлений метал, типу 18/8 або 20/10, що містить 2 - 5% - фериту, більш стійкий до гарячих тріщин. Феррит частково розчиняє сірку, фосфор, ніобій та ін. домішки, а також порушує суцільність кордонів та перешкоджає транскристалізації.

Марганець покращує властивості сталі, підвищує її міцність, пластичність, сприяє отриманню аустенітної структури. Якщо при введенні марганцю в структурі зберігається феритна фаза, схильність наплавленого металу до утворення гарячих тріщин зменшується завдяки утворенню тугоплавкого сульфиду MnS.

					ЗП 81.04.0000.000.ПЗ				Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					20

Вуглець є основним легуючим аустенітоутворюючим елементом, що сприяє зміцненню сталі. Активно з'єднуючись із залізом і хромом він утворює карбіди, випадання яких за межами зерен аустеніту викликає міжкристалітну корозію. Підвищити стійкість сталі до МКК можна зниженням вмісту вуглецю нижче 0,03% - межі розчинності в аустеніті при кімнатній температурі або введенням до складу наплавленого металу активних карбідоутворювачів - титану та ніобію.

Хром – активний феритизатор. У поєднанні з молібденом, титаном, ніобієм та іншими елементами підвищує механічні властивості сталі, її теплостійкість, стійкість проти окислення. Зі збільшенням кількості хрому міцність та корозійна стійкість сталі зростає, але якщо хрому > 20% пластичність помітно знижується.

Кремній оберігає хром від окиснення, сприяє утворенню фериту та зміцненню металу. При вмісті кремнію до 2% підвищується стійкість сталей 18/8 проти тріщин та загальний опір корозії. Однак, у чисто аустенітних стадах типу 25/20 кремній викликає утворення гарячих тріщин.

Введення молібдену підвищує корозійну стійкість, міцнісні та пластичні характеристики сталі. Оскільки молібден сприяє утворенню фериту, то для збереження заданої структури одночасно підвищують вміст нікелю.

Феритизатори титан і ніобій вводяться в сталь для зв'язування надлишкового вуглецю та попередження МКК. Оскільки титан і ніобій знижують пластичність, їх вміст у сталі рекомендується обмежувати.

Схильність наплавленого металу до МКК вивчали Г.Тір та В.Адам. Випробування після відпустки різної тривалості проводилися за методом Штрауса. Результати випробування зразків, вирізаних із металу, наплавленого в один шар, представлені на рис. 2.1. Безпосередньо після наплавлення метал стійок проти МКК, але відпустка різко погіршує його властивості. Рентгеноструктурний аналіз карбідного осаду показав, що частина вуглецю пов'язана з ніобієм.

Зміна типу електродної стрічки, умов наплавлення та числа шарів було отримано наплавлений метал з різним співвідношенням Nb:C. Максимальну стійкість проти МКК показав метал при співвідношенні Nb:C = 15, причому

					ЗП 81.04.0000.000.ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

збільшення співвідношення велося за рахунок зниження вмісту вуглецю (рис. 2.2.).

У роботі звернуто увагу на важливості ролі хрому. Невелике зниження його змісту різко збільшує область, де проявляється МКК (рис. 2.3.).

Раніше наплавлення корпусів реакторів здійснили у два шари трьома проходами. Перший буферний шар наплавляють один прохід сталлю 07X25H13. Другий шар наплавляють у два проходи сталлю 08X19H10Г2Б. При цьому в останньому проході забезпечується склад ідентичний 08X19H10Г2Б, властивості якого відповідають вимогам ВП 1513-72 та ПК 1514 - 72 - документам, що регламентують технологічний процес та контроль наплавлення вузлів та конструкцій атомних енергетичних установок.

У західноєвропейських країнах і США наплавлення корпусів нині ведуть у два шари двома проходами (кожний шар виконується в один прохід). Для наплавлення першого шару використовують сталь 309L або 309NB. Наступний шар, залежно від вимог замовника, наплавляють сталлю 308L (іноді 304 або сталлю 347L, стабілізованої ніобієм). Зменшення числа проходів визначається можливістю застосування електродних стрічок та дротів, що містять менше 0,03% вуглецю.

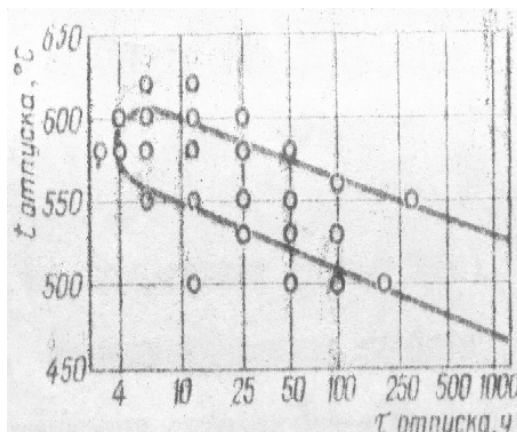


Рисунок 2.1 - Схильність наплавленого шару, що містить (%):

C - 0,058; Si - 0,96; Mn - 1,04; Cr - 18,65; Ni - 9,9; Nb - 0,52; N - 0,052 до міжкристалічної корозії: область всередині петлеподібної кривої - є міжкристалічна корозія.

					ЗП 81.04.0000.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

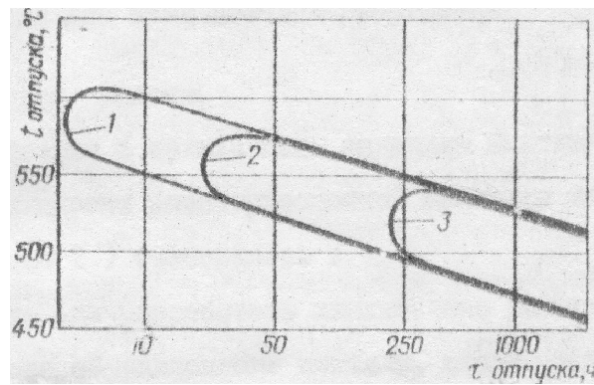


Рисунок 2.2 - Вплив вмісту вуглецю та ніобію в наплавленому металі на його схильність до міжкристалічної корозії:

- С - 0,058%; Nb - 0,52%; Cr - 18,65%; (Nb:C = 9);
 2) С - 0,047%; Nb - 0,66%; Cr - 19,7%; (Nb:C = 14);
 3) С - 0,034%; Nb - 0,51%; Cr - 19,15%; (Nb:C = 15).

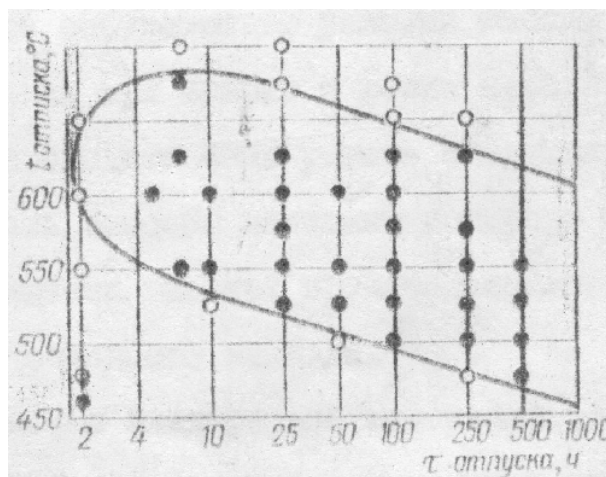


Рисунок 2.3 - Вплив зниженого вмісту хрому в наплавленому металі, що містить (%): С - 0,042; Si - 0,99; Mn - 0,92; Cr - 17,72; Ni - 10,1; Nb - 0,55; N - 0,038 на його схильність до міжкристалічної корозії: • - корозія, о - немає корозії.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЗП 81.04.0000.000.ПЗ

Арк.

23

3 ПОРІВНЯННЯ СПОСОБІВ НАПЛАВЛЕННЯ ПОКРИТТЯ КОРПУСІВ РЕАКТОРА

Для визначення технології нанесення покриття КР виконаємо порівняльний аналіз результатів розрахункового визначення мікроструктурного фазового складу та механічних властивостей в ЗТВ основного матеріалу деталі, а також розподілу залишкових напружень при різних технологічних режимах антикорозійного наплавлення і наступної термообробки. Для дослідження впливу технологічних параметрів дугового наплавлення на розподіл залишкових напружень використовувалась скінченноелементна модель патрубкової зони КР ВВЕР-1000, до складу якої входять характерні ділянки наплавлення циліндричної частини КР і внутрішньої поверхні патрубків Ду-850 (рис. 3.1).

Технологічні параметри для автоматичного дугового наплавлення під флюсом (ОФ-10) стрічковими електродами становили [3–6]: сила струму $I_{зв} = 600-750$ А, напруга $U_d = 32-36$ В, ширина стрічкового електроду $b = 40-60$ мм, температура попереднього та супутнього підігріву $T_p = 100-250$ °С, швидкість наплавлення $v_n = 7-10$ м/год. Для ручного дугового наплавлення покритими електродами [7, 8]: сила струму $I_{зв} = 130-150$ А, напруга $U_d = 26-30$ В, електрод діаметром 4-5 мм, температура попереднього та супутнього підігріву $T_p = 100-250$ °С, швидкість наплавлення $v_n = 3$ м/год. Після виконання наплавлення внутрішньої поверхні КР проходив термічну обробку за режимом високого відпуску для релаксації залишкових напружень. Максимальна температура термообробки (ТО) могла складати 610 °С [2, 6], 620 °С [2, 5], 650-670 °С [9], а тривалість витримки могла бути від 5 до 20 год. Хімічний склад основного матеріалу КР сталі 15Х2НМФА повинен відповідати вимогам ТУ 108-765-78 [10]. Теплофізичні і фізико-механічні властивості основного матеріалу і матеріалу наплавлення в залежності від температури приведені в [11].

При виконанні моделювання задавались наступні технологічні режими (табл. 3.1.): для автоматичного дугового наплавлення під флюсом циліндричної обичайки патрубкової зони проводилась варіація ширини стрічкового електроду b

					ЗП 81.04.0000.000.ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

та температури підігріву T_p , а також тривалості витримки при термообробці. Для внутрішньої поверхні патрубків Ду850, включаючи галтелі, моделювалось ручне дугове наплавлення покритими електродами при номінальному режимі.

Застосовувалось дві моделі джерела наплавного нагріву: стрічкове – для автоматичного дугового наплавлення під флюсом циліндричної обичайки КР та точкове (або нормально-кругове), яке імітує ручне наплавлення покритими електродами для внутрішньої поверхні патрубка Ду-850, а також галтелей.

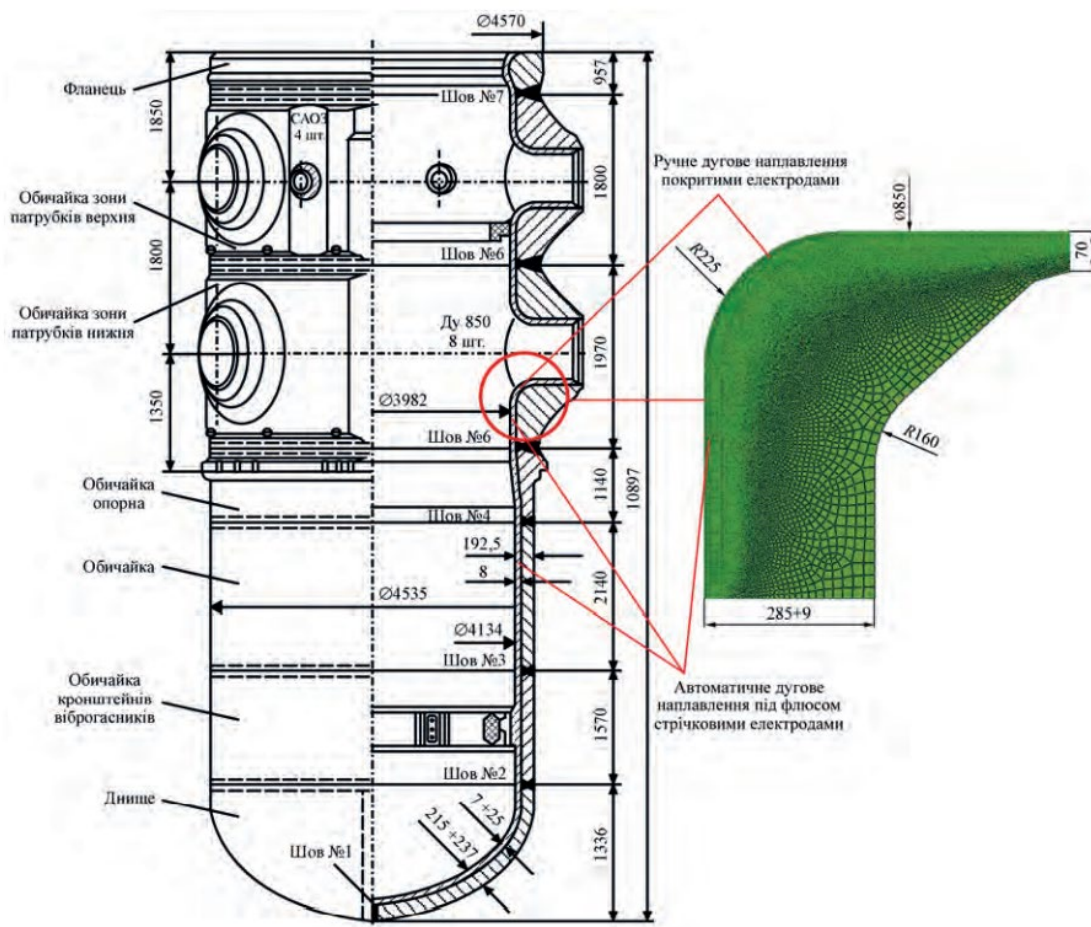


Рисунок 3.1 - Схема розташування зон ручного та автоматичного наплавлення антикорозійного шару на КР ВВЕР-1000 та скінченноелементна модель патрубкової зони [2].

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЗП 81.04.0000.000.ПЗ

Арк.

25

Таблиця 3.1 – Режими дугового наплавлення та термообробки, прийняті при розрахунках.

Сила струму $I_{зв}, A$	Напруга U_d, B	Коефіцієнт ефективності η	Ефективна погонна енергія, кДж/мм	Швидкість наплавлення $v_n, мм/с$	Ширина валика $b, мм$	Температура підігріву $T_p, ^\circ C$	Час витримки при ТО, год ($T = 650 ^\circ C$)
Ручне дугове наплавлення покритими електродами							
150	30	0,75	4,066	0,83	15	250	20
150	30	0,75	4,066	0,83	15	250	10
150	30	0,75	4,066	0,83	15	250	5
Автоматичне дугове наплавлення під флюсом стрічковими електродами							
650	32	0,9	9,36	2	40	250	20
700	32	0,9	14,608	1,4	60	150	20
700	32	0,9	14,608	1,4	60	250	20
700	32	0,9	14,608	1,4	60	250	10
700	32	0,9	14,608	1,4	60	250	5

Задача нестационарної теплопровідності при дуговому напавленні була вирішена у двовимірній постановці з припущенням швидкорухомого джерела нагріву та осьової симетрії при послідовному нанесенні наплавних проходів з покроковим простежуванням в часі від початку нагріву металу кожного наплавного проходу до охолодження до температури супутнього підігріву. Розподіл теплової потужності стрічкового джерела W_1 та точкового джерела W_2 у двовимірній постановці в циліндричній системі координат може бути представлений відповідними залежностями (1) і (2) [12]:

$$W_1(r, z, t) = \frac{2Q\sqrt{K_r K_z}}{\pi v_n t_n [1 + \sqrt{\frac{K_z}{\pi} b}]} \cdot \exp[-K_r(r - r_0)^2 - K_z(z - z_0)^2] \quad (1.1)$$

$$W_2(r, z, t) = \frac{2Q\sqrt{K_r K_z}}{\pi v_n t_n} \cdot \exp[-K_r(r - r_0)^2 - K_z(z - z_0)^2] \quad (1.2)$$

де r, z – координати (радіальна та осьова) розглянутої точки КР; r_0, z_0 – координати центру рухомого джерела нагріву; K_r, K_z – коефіцієнти зосередженості питомого теплового потоку; t_n – час нагріву; Q – ефективна потужність джерела нагріву ($Q = \eta I_{зв} U_d$); η – коефіцієнт ефективності джерела

					ЗП 81.04.0000.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

нагріву; v_n – швидкість наплавлення; b – ширина стрічкового електрода. Отримані розрахункові результати розподілів максимальних температур та характерні термічні цикли при наплавленні дозволили оцінити розміри зони плавлення (ЗП) і ЗТВ, а також швидкість охолодження металу зони наплавлень корпусу реактора при різних технологічних режимах (рис. 3.2., табл. 3.2.).

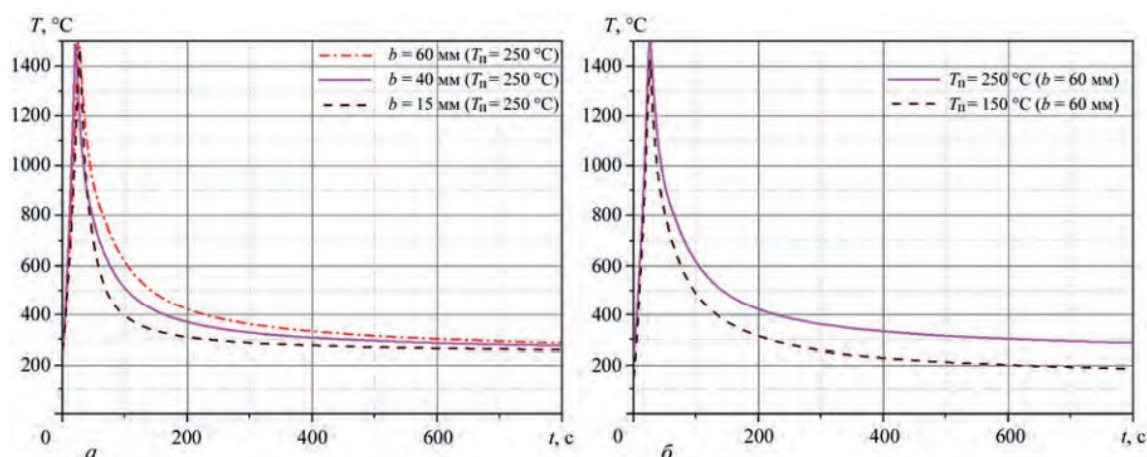


Рисунок 3.2 - Характерні термоцикли при варіації: а – ширини валика b ; б – температури підігріву T_n .

Результати отримані для різної ширини валика b : при автоматичному дуговому наплавленні стрічковими електродами – 40, 60 мм, при ручному дуговому наплавленні покритими електродами – 15 мм, та при різних температурах попереднього підігріву T_n для автоматичного наплавлення, що складають 150 та 250 °C.

Таблиця 3.2 - Результати розрахунку розміру ЗТВ і швидкостей охолодження для різних технологічних параметрів наплавлення.

Ширина валика b , мм	Температура підігріву T_n , °C	Глибина ЗП, мм	Глибина ЗТВ в основному матеріалі, мм	Швидкість охолодження w (800...500 °C), °C/c
15 (ручне наплавлення)	250	1	7	8-11
40	250	1	9	4-5
60	250	1	10	3-4
60	150	1	8	5-7

З точки зору мікроструктурних перетворень важливим є розмір (глибина) ЗТВ в основному матеріалі. Оскільки після другого шару наплавлення ЗТВ зсувається на величину ширини першого шару, то фактично глибина ЗТВ в основному матеріалі визначається в результаті наплавлення першого шару. По результатам (табл. 3.2., рис. 3.2) видно, що мінімальний розмір ЗТВ в основному матеріалі (глибина до 7 мм) і максимальна швидкість охолодження металу ЗТВ в діапазоні температур 800-500 °С (8-11 °С/с) отримані для ручного наплавлення покритими електродами патрубку Ду-850. Досить висока швидкість охолодження (5-7 °С/с) отримана для дугового наплавлення стрічковим електродом шириною $b = 60$ мм при температурі підігріву 150 °С. Найнижча швидкість охолодження (3-4 °С/с) і найбільша глибина ЗТВ в основному матеріалі (до 10 мм) отримана для режиму дугового наплавлення стрічковим електродом при $b = 60$ мм та температурі підігріву 250 °С (рис. 3.3.).

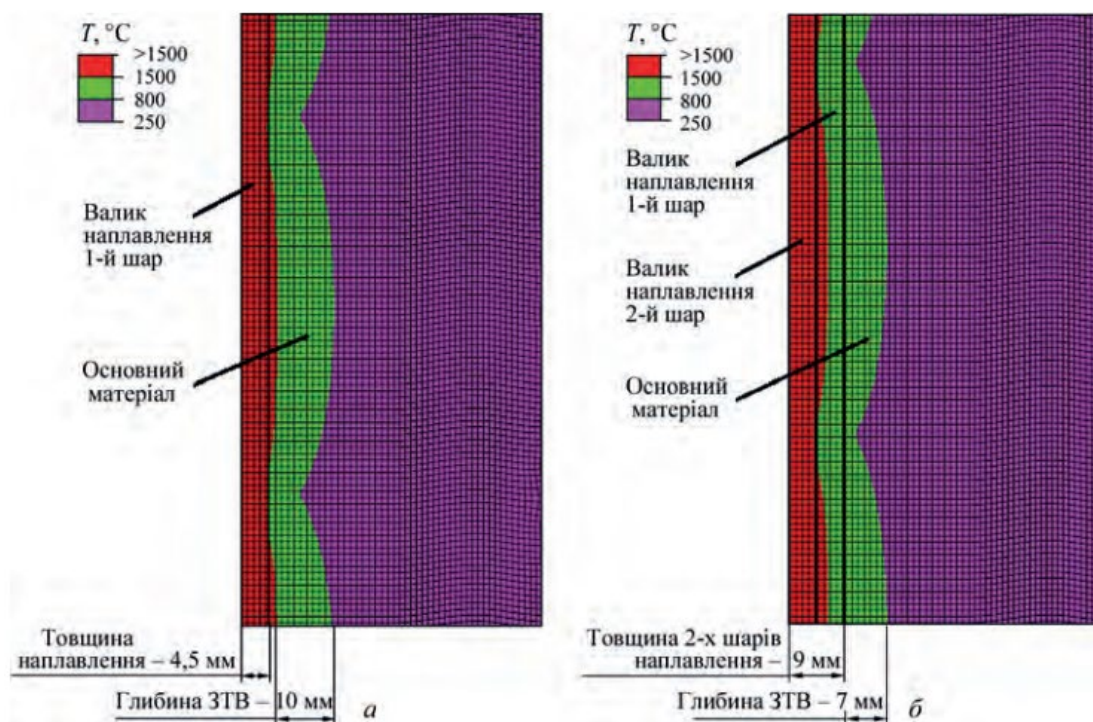


Рисунок 3.3 - Характерні розміри ЗП ($T > 1500$ °С) та ЗТВ (1500 °С $> T > 800$ °С) для дугового наплавлення під флюсом стрічковими електродами:
 a – першого шару; b – другого шару.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЗП 81.04.0000.000.ПЗ

Арк.

28

Внаслідок перемішування з основним металом хімічний склад ЗП може суттєво відрізнятись від присадкового матеріалу. Згідно [7] коефіцієнт перемішування g_o (%), а саме частка основного металу в наплавленому залежить від режиму наплавлення і визначається наступним чином:

$$g_o = \frac{F_o}{F_o + F_n} 100\% \quad (1.3)$$

де F_o – площа перерізу розплавленого основного металу; F_n – площа перерізу наплавленого металу. Мікроструктурний фазовий склад в ЗП з урахуванням перемішування основного і присадкового матеріалів може бути наближено визначений відповідно до структурної діаграми Шеффлера [13] на основі значень еквівалентного нікелю та хрому:

$$\left(\begin{array}{l} Ni_{eq} = \%Ni + 30 \cdot \%C + 0,5 \cdot \%Mn \\ Cr_{eq} = \%Cr + \%Mo + 1,5 \cdot \%Si + 0,5 \cdot \%Nb \end{array} \right) \quad (1.4)$$

Результати розрахунку коефіцієнта перемішування та наближеного мікроструктурного фазового складу в ЗП згідно з діаграмою Шеффлера при збільшенні погонної енергії від номінальної на 10, 20, 30, 40 % зведено в табл. 3.3. Розрахунковий мікроструктурний фазовий склад згідно діаграми Шеффлера [13] для різних ділянок КР при суттєвих відхиленнях величини погонної енергії від номінальної показав, що з точки зору формування аустенітної структури в ЗП підвищення погонної енергії на 30 % – критична величина для автоматичного дугового наплавлення під флюсом стрічковим електродом і на 40 % – критична величина для ручного дугового наплавлення покритими електродами.

Це свідчить про надійне формування аустенітної структури в ЗП (вміст фериту до 5-10 %) при номінальних значеннях погонної енергії. При математичному моделюванні температурних розподілів отримано, що критична величина коефіцієнта перемішування, при неперевищенні якої забезпечується формування аустенітної структури в ЗП, складає $g_o = 38-39$ % при номінальних величинах $g_o = 13-16$ % (табл. 3.3.). Тому при подальшому проведенні математичного моделювання мікроструктурного фазового складу, механічних властивостей і напружено-деформованого стану в зоні наплавлення КР не

					ЗП 81.04.0000.000.ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

враховували перемішування присадкового матеріалу з основним металом в ЗП та зміну хімічного складу матеріалу аустенітного наплавлення.

Для моделювання мікроструктурних фазових перетворень в ЗТВ низьколегованих сталей під час зварювання або наплавлення може застосовуватися підхід, заснований на використанні параметричних (регресійних) рівнянь, отриманих в ІЕЗ ім. Є.О. Патона [14, 15].

В даній роботі математичне моделювання мікроструктурних перетворень в ЗТВ сталі 15X2НМФА виконувалось на основі використання термкінетичної діаграми (ТКД) розпаду аустеніту для характерних циклів зварювання/наплавлення саме для сталі 15X2НМФА. Для цього було проведено фізичне моделювання мікроструктурних перетворень в ЗТВ основного матеріалу КР при дуговому наплавленні на установці Gleeble3800 і металографічний аналіз зразків сталі 15X2НМФА [12].

Таблиця 3.3 - Визначення коефіцієнта перемішування при варіації погонної енергії.

Підвищення погонної енергії від номінальної, %	Площа валика наплавлення, мм ²	Площа розплавленого основного металу, мм ²	Коефіцієнт перемішування go, %	N _{іeq}	C _{req}	Аустеніт в ЗП, %
0	180 (автоматичне дугове наплавлення під флюсом стрічковим електродом b = 40 мм)	26	13	14,7	22,5	90-95
10		52	23	13,7	20,3	95-100
20		86	32	12,8	18,1	100
30		110	38	12,2	16,8	a+m+ф
0	67 (ручне дугове наплавлення покритими електродами)	13	16	14,3	21,7	90-95
10		21	23	13,7	20,2	95-100
20		27	28	13,2	19	95-100
30		36	35	12,5	17,6	100
40		43	39	12,1	16,6	a+m+ф

Результати фізичного моделювання представлені в роботі [12] у вигляді двох побудованих ТКД розпаду аустеніту для характерних циклів

					ЗП 81.04.0000.000.ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зварювання/наплавлення з різною швидкістю охолодження w_j в інтервалі температур 800-500 °С і різних максимальних температур нагріву (1000 та 1350 °С). Для зручності проведення математичного моделювання мікроструктурних перетворень в ЗТВ сталі 15Х2НМФА було використано запропоновану в роботі [16] усереднену відносно максимальної температури нагріву зварювальну ТКД розпаду аустеніту, побудовану для різних швидкостей охолодження w_j в характерному інтервалі температур 800-500 °С (рис. 3.4., табл. 3.4.). На основі числових даних ТКД сталі 15Х2НМФА [16] (табл. 3.4.) можливо отримати інтерполяційні залежності для всіх параметрів ТКД (температури початку бейнітного B_s та мартенситного перетворення M_s , кінця бейнітного B_f та мартенситного перетворення M_f , максимальної частки мартенситу $V_{m,max}$ та бейніту $V_{b,max}$) для проміжних швидкостей охолодження w .

Таблиця 3.4 - Числові дані ТКД розпаду аустеніту сталі 15Х2НМФА в умовах характерного термічного циклу зварювання/наплавлення.

Швидкість охолодження w_j , °С/с	Температури перетворення на етапі охолодження, °С				Частка бейніт V_b / мартенсит V_m , %	Твердість HV1, кгс/мм ²
	B_s	B_f	M_s	M_f		
3	485	315	343	315	98/2	383
4	478	343	343	280	80/20	380
5	468	425	425	298	10/90	426

Експериментально було встановлено, що початкова мікроструктура зразків сталі 15Х2НМФА – бейнітна з незначною часткою мартенситу до 3-5 %. Твердість зразків за Віккерсом складає HV1 = 315-325 кгс/мм² (3150-3250 МПа). Розмір бейнітного зерна складає 15-20 мкм (8-9 бал зерна ASTM). Експериментальні дані добре узгоджуються з існуючими даними [17] щодо початкового мікроструктурного стану сталі 15Х2НМФА.

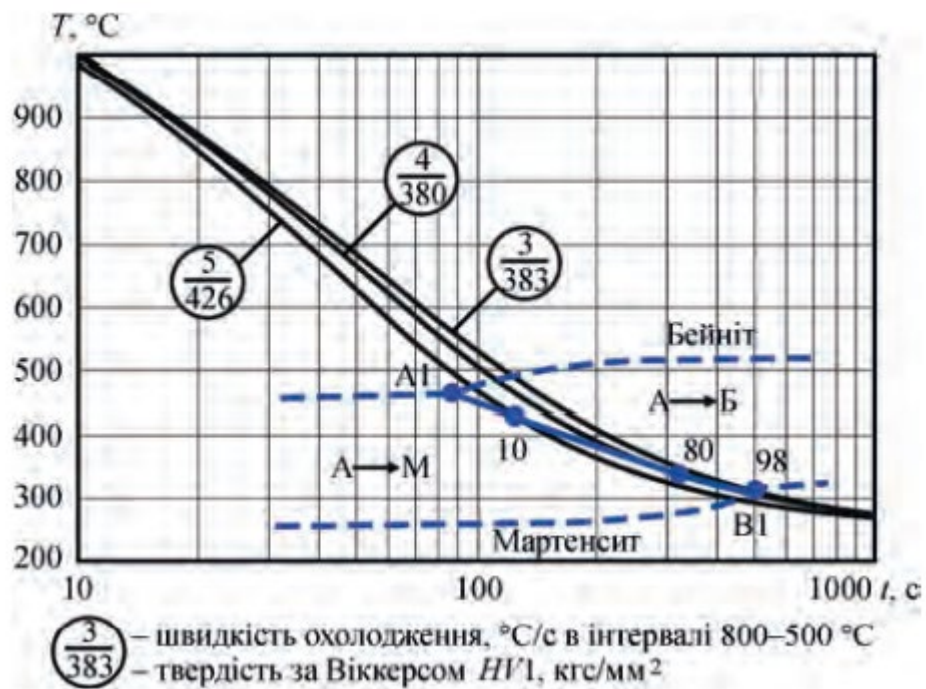


Рисунок 3.4 - Термокінетична діаграма розпаду аустеніту сталі 15Х2НМФА для характерних зварювальних циклів охолодження [16].

Отримані результати розрахунку масової частки кожної мікроструктурної фази в процесі наплавлення і в кінцевій мікроструктурі ЗТВ основного матеріалу після охолодження згідно числових даних ТКД сталі 15Х2НМФА представлені на рис. 3.5., 3.6. Розрахункові дані згідно рис. 3.5., які отримані на основі експериментальної ТКД розпаду аустеніту сталі 15Х2НМФА, показали, що в результаті нагріву при дуговому наплавленні під флюсом стрічковими електродами ($b = 60$ мм) відбулося утворення незначної частки мартенситу до 15 % при температурі підігріву $T_{\text{п}} = 250$ $^{\circ}\text{C}$ (швидкість охолодження 3-4 $^{\circ}\text{C}/\text{с}$) та утворюється переважний вміст мартенситу 90 % в кінцевій мікроструктурі при температурі підігріву $T_{\text{п}} = 150$ $^{\circ}\text{C}$ (швидкість охолодження 5-7 $^{\circ}\text{C}/\text{с}$) (рис. 3.5.).

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЗП 81.04.0000.000.ПЗ

Арк.

32

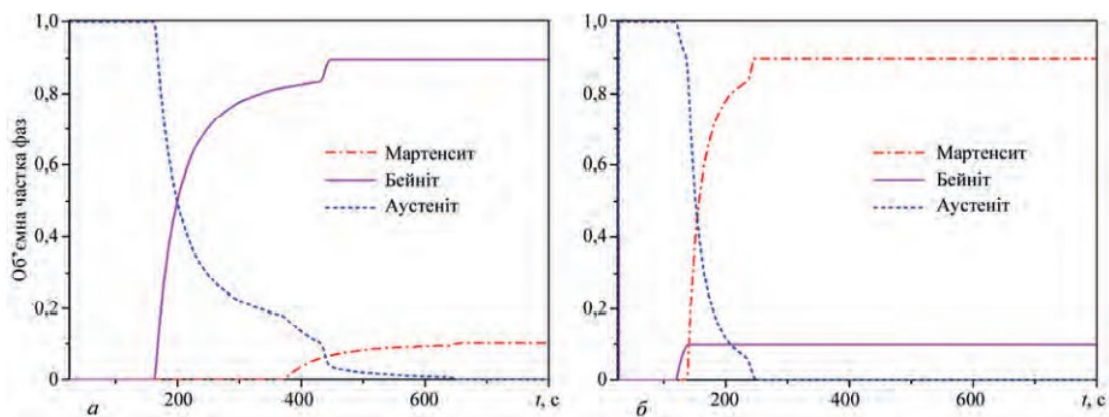


Рисунок 3.5 - Результати прогнозування кінетики розпаду аустеніту в металі 3ТВ металі при дуговому наплавленні стрічковим електродом ($b = 60$ мм) з попереднім підігрівом до 250 °C (а), 150 (б).

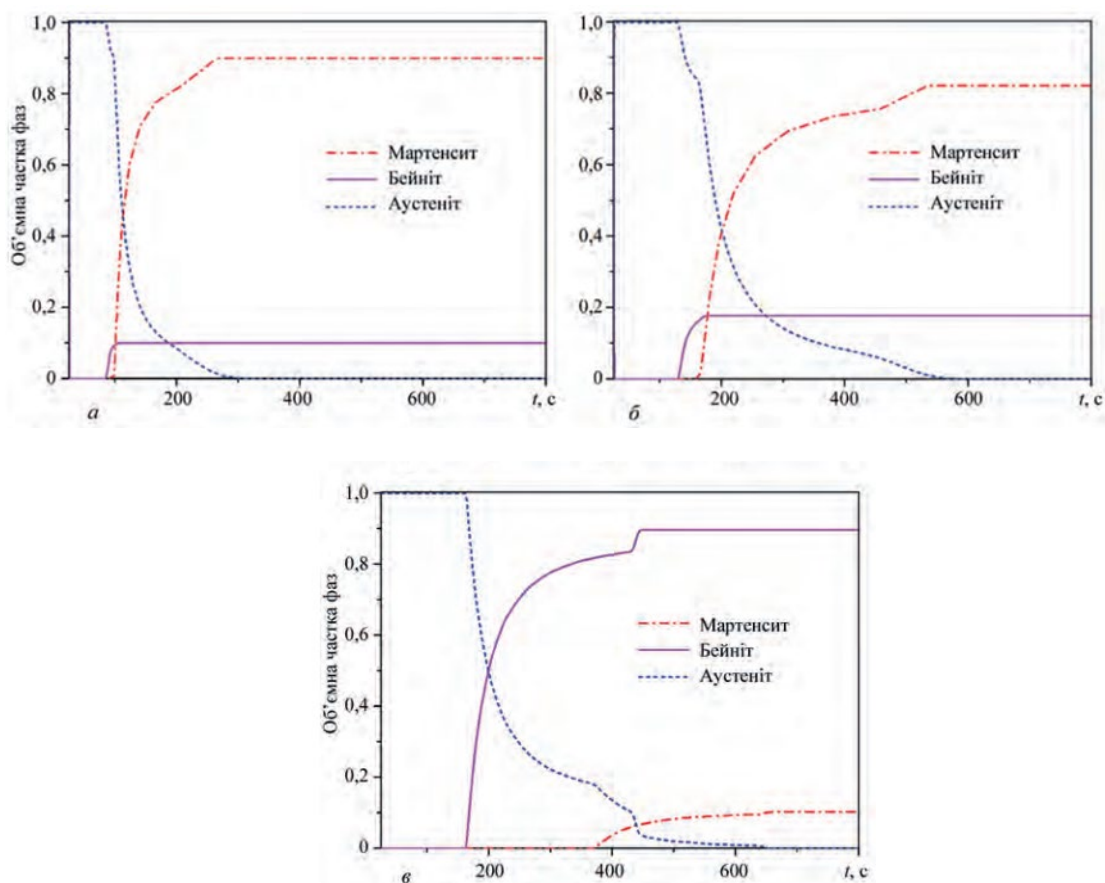


Рисунок 3.6 - Результати прогнозування кінетики розпаду аустеніта в металі 3ТВ при дуговому наплавленні з попереднім підігрівом 250 °C для різної ширини наплавного валика b : а – 15 мм (ручне наплавлення); б – 40 ; в – 60

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЗП 81.04.0000.000.ПЗ

Арк.

33

Порівняння результатів для двох величин ширини стрічкового електрода (рис. 3.6.) при антикорозійному наплавленні показало, що при ширині $b = 40$ мм в ЗТВ утворюється частка мартенситу 70-90 % ($w = 4-5$ °C/c), а при ширині $b = 60$ мм – до 15 % мартенситу. При ручному дуговому наплавленні покритими електродами ($b = 15$ мм) вміст мартенситу в кінцевій мікроструктурі після охолодження складає 90 %. Результати математичного моделювання мікроструктурного фазового складу ЗТВ сталі 15X2НМФА після двох шарів антикорозійного наплавлення для різних технологічних режимів зведені в табл. 3.5.

Таблиця 3.5 - Результати розрахунку мікроструктурного фазового складу в ЗТВ основного матеріалу КР (сталі 15X2НМФА) для різних технологічних режимів наплавлення.

Технологічний режим	Розрахункові дані згідно ТКД, %	
	Мартенсит	Бейніт
$b = 15$ мм (ручне наплавлення), $T_{\text{п}} = 250$ °C, $w = 8-11$ °C/c	90	10
$b = 40$ мм, $T_{\text{п}} = 250$ °C, $w = 4-5$ °C/c	70-90	10-30
$b = 60$ мм, $T_{\text{п}} = 250$ °C, $w = 3-4$ °C/c	15	85
$b = 60$ мм, $T_{\text{п}} = 150$ °C, $w = 5-7$ °C/c	90	10

Отримані розрахункові дані відносно утворення бейнітно-мартенситної мікроструктури сталі 15X2НМФА в результаті антикорозійного наплавлення КР достатньо добре узгоджуються з результатами, представленими в публікаціях [9, 18]. Зміна мікроструктурного фазового складу викликає зміну механічних властивостей в ЗТВ основного матеріалу КР.

Межа плинності кожної мікроструктурної фази визначалася в залежності від хімічного складу і температури на основі параметричних регресійних рівнянь [15].

					ЗП 81.04.0000.000.ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для моделювання напружено-деформованого стану матеріалу в зоні наплавлень КР використовувалась модель термов'язкопластичності [19], для якої розв'язок основоположних рівнянь отримано за допомогою методу скінченних елементів. Отримані результати за залишковими напруженнями з урахуванням мікроструктурних фазових перетворень на основі використання експериментальної ТКД при різних технологічних режимах дугового наплавлення. Врахування мікроструктурних перетворень і періодичності (в поперечному напрямку) накладання валиків при напавленні поверхні КР призводить до нерівномірного розподілу ЗН, появи ділянок стиску в ЗТВ основного матеріалу, а також впливає на кількісну величину напружень. На рис. 3.7.–3.9. представлено розподіл кільцевої $\sigma_{\theta\theta}$ та осьової σ_{zz} компонент ЗН в характерних перерізах 1-1, 2-2.

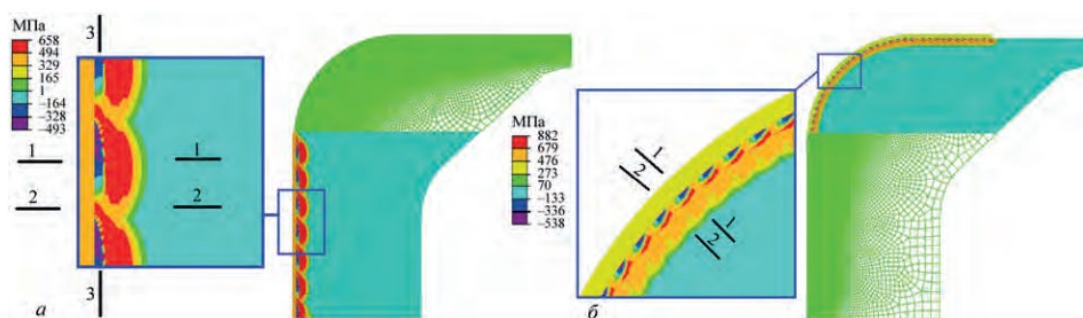


Рисунок 3.7 - Розподіл кільцевих ЗН $\sigma_{\theta\theta}$ в перерізі зони наплавлень КР: *а* – для автоматичного дугового наплавлення під флюсом стрічковими електродами; *б* – для ручного дугового наплавлення покритими електродами.

Порівнюючи розрахункові результати при різній ширині наплавного валика $b = 15, 40, 60$ мм (рис. 3.8., а, б), встановлено, що після двох шарів наплавлення для всіх випадків ширини валика в перерізі 1-1 в ЗТВ основного матеріалу отримано кільцеві ЗН стиску до $(-300 - -600)$ МПа, ширина зони стискаючих напружень дорівнює глибині ЗТВ в основному матеріалі, а в перерізі 2-2 в ЗТВ маємо кільцеві ЗН розтягу до 600 МПа. Після ручного дугового наплавлення ($b = 15$ мм) отримана в основному матеріалі патрубкової зони максимальна величина

кільцевих ЗН розтягу до 750 МПа, глибина ЗТВ до 7 мм і глибина зони напружень розтягу до 28 мм від поверхні наплавлення.

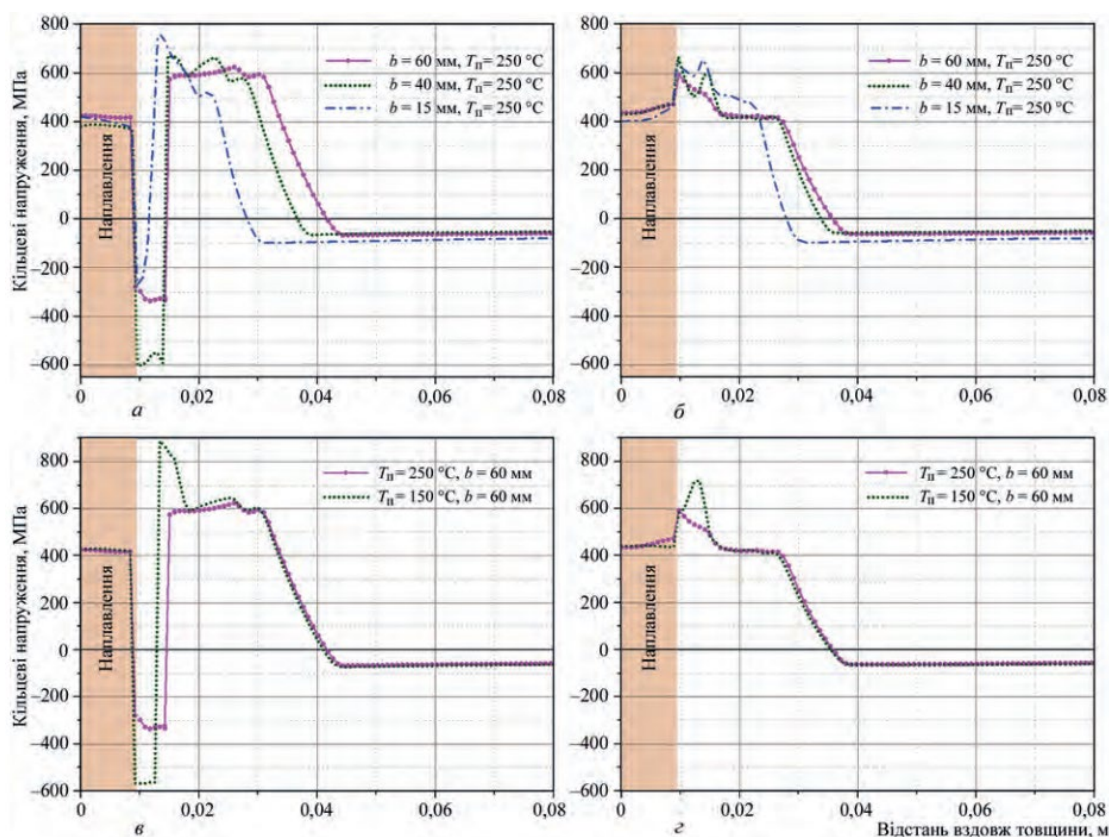


Рисунок 3.8 - Розподіл кільцевих ЗН $\sigma_{\theta\theta}$ по товщині КР після наплавлення. Варіація ширини валиків: *a* – переріз 1-1, *б* – 2-2. Варіація температури підігріву: *в* – переріз 1-1, *г* – 2-2.

При наплавленні стрічковим електродом при ширині валика $b = 60$ мм глибина ЗТВ основного матеріалу значно більше, складає до 10 мм, при $b = 40$ мм складає до 9 мм, глибина зони напружень розтягу досягає відповідно до 36 мм (переріз 2-2) – 42 мм (переріз 1-1) і 34 мм (переріз 2-2) – 36 мм (переріз 1-1) від поверхні наплавлення.

Максимальні кільцеві ЗН розтягу для обох величин ширини стрічкового електрода є близькими за величиною (600-650 МПа).

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЗП 81.04.0000.000.ПЗ

Арк.

36

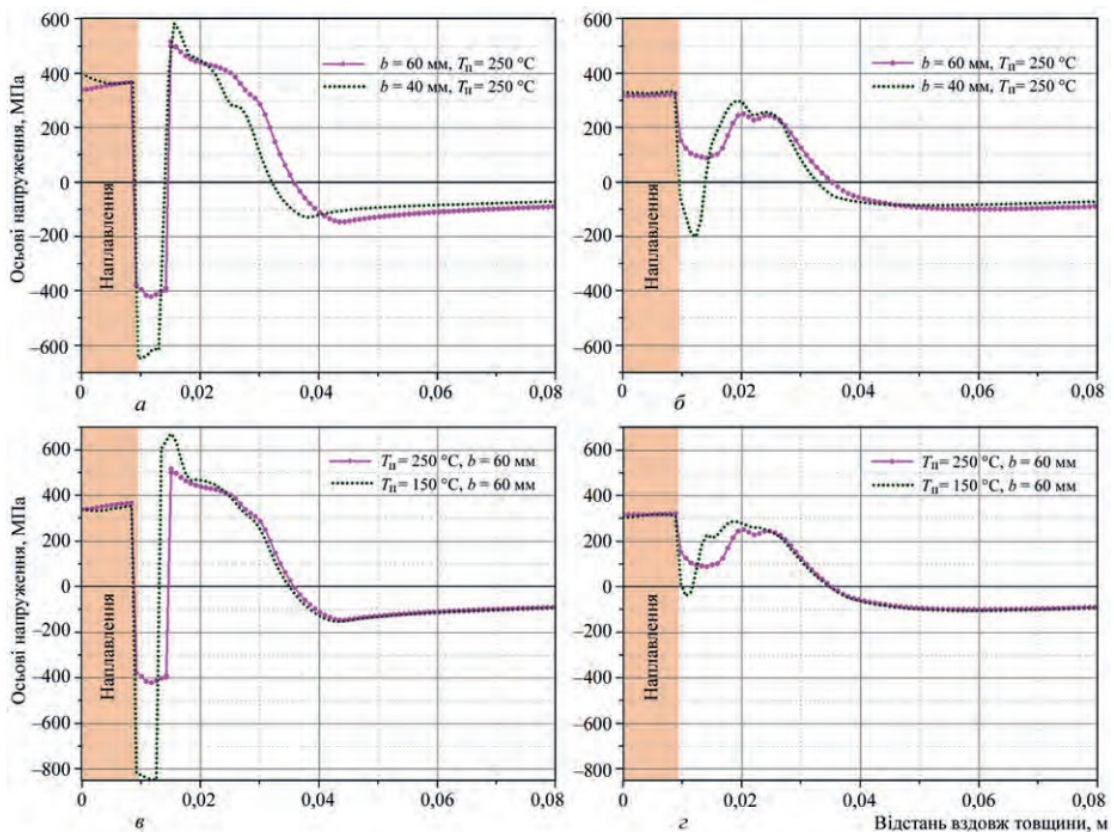


Рисунок 3.9 - Розподіл осьових ЗН σ_{zz} по товщині КР після наплавлення. Варіація ширини валиків: *a* – переріз 1-1, *б* – 2-2. Варіація температури підігріву: *в* – переріз 1-1, *г* – 2-2.

Для різної температури попереднього та супутнього підігріву наплавлення стрічковим електродом шириною $b = 60$ мм визначено (рис. 3.8., в, г), що в перерізі 1-1 основного матеріалу після наплавлення при температурі підігріву $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ утворюються в ЗТВ кільцеві ЗН стиску до -570 МПа, глибина ЗТВ в основному матеріалі до 8 мм, а при температурі підігріву $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ отримано стискаючі ЗН нижчі – на рівні до -330 МПа, але в більш широкій зоні ЗТВ основного матеріалу, до 10 мм. Кільцеві ЗН розтягу в основному матеріалі у випадку застосування електрода шириною $b = 60$ мм при температурі підігріву $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ локально досягають величини 840 МПа, при температурі $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ не перевищують 600 МПа, а глибина зони напружень розтягу досягає 42 мм від поверхні наплавлення. Стосовно осьової компоненти σ_{zz} на рис. 3.9. представлено розподіл ЗН після наплавлення по товщині циліндричної частини КР в характерних перерізах 1-1, 2-2 в залежності від ширини стрічкового електрода та

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЗП 81.04.0000.000.ПЗ

Арк.

37

температури підігріву. В ЗТВ основного матеріалу циліндричної частини КР наявні ЗН стиску (до $-400 - -825$) МПа в перерізі 1-1, до $(-30 - -200)$ МПа в перерізі 2-2. Величина ЗН розтягу в основному матеріалі з урахуванням мікроструктурних перетворень до $(500 - 620)$ МПа в перерізі 1-1 і до $(250-300)$ МПа в перерізі 2-2. При моделюванні технологічного процесу загальної (пічної) термічної обробки (ТО) задавався режим високого відпуску при температурі $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ тривалістю до 20 год. Для моделювання релаксації напружень використовували функцію температурної повзучості матеріалу, яка в роботі [20] визначалась на основі існуючих експериментальних даних для сталі 15Х2НМФА [9]. А саме, для розрахункового визначення деформацій повзучості за допомогою методу скінченних елементів використовувалось рівняння зв'язку швидкості еквівалентних деформацій повзучості $d\varepsilon_{eq}^c$ з інтенсивністю напружень σ_i у вигляді закону Нортона-Бейлі [21].

$$d\varepsilon_{eq}^c = A\sigma_i^n dt$$

де A , n – константи матеріалу, з урахуванням [9, 20] для сталі 15Х2НМФА $A = 0,17 \cdot 10^{-20}$ ($1/(\text{МПа}^6 \cdot \text{с})$), $n = 6$. ТО за режимом високого відпуску значно знижує рівень залишкових напружень в основному матеріалі КР, викликаних антикорозійним наплавленням.

На рис. 3.10.–3.14. приведені розподіли кільцевої та осьової компонент залишкових напружень по товщині КР після наплавлення і проведення ТО для різних технологічних режимів. В матеріалі аустенітного наплавлення через різницю з основним матеріалом в коефіцієнтах температурного розширення залишаються напруження розтягу на рівні межі плинності аустенітного матеріалу (до 400 МПа). Порівняння результатів кільцевих ЗН, які отримані в результаті моделювання ТО за режимом високого відпуску ($T = 650\text{ }^{\circ}\text{C}$, витримка 20 год).

При різній ширині наплавних валиків і при температурі попереднього підігріву $T_p = 250\text{ }^{\circ}\text{C}$ при наплавленні показало (рис. 3.10., а, б), що при ручному дуговому наплавленні покритими електродами ($b = 15$ мм) отримано в ЗТВ основного матеріалу залишкові напруження стиску величиною до -325 МПа. При автоматичному наплавленні стрічковим електродом шириною $b = 40$ мм в ЗТВ

					ЗП 81.04.0000.000.ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

основного матеріалу отримано зону напружень стиску величиною до -330 МПа (переріз 2-2) і до -500 МПа (переріз 1-1), при $b = 60$ мм в ЗТВ основного матеріалу отримано зону напружень стиску (-200 МПа) (переріз 1-1) та зону напружень розтягу на рівні 50 МПа (переріз 2-2). Максимальне значення кільцевих ЗН розтягу в основному матеріалі не перевищує 170 МПа.

Рівень кільцевих залишкових напружень в зоні стиску після ТО за режимом високого відпуску при більш низькій температурі попереднього підігріву $T_p = 150$ °С при наплавленні перевищують напруження при $T_p = 250$ °С внаслідок утворення більшої частки мартенситу. Так, при автоматичному наплавленні за допомогою стрічкових електродів шириною $b = 60$ мм при температурі попереднього підігріву $T_p = 150$ °С максимальні кільцеві напруження стиску сягають до ($-370 - -450$) МПа, ширина зони стиску досягає до 3 мм (переріз 2-2) – 7 мм (переріз 1-1) основного матеріалу, глибина зони напружень розтягу майже не змінюється – до 35 мм (переріз 2-2) і до 42 мм (переріз 1-1) від поверхні наплавлення (рис. 3.10., в, г).

На рис. 3.11. представлено розподіл осьової компоненти σ_{zz} ЗН по товщині циліндричної частини КР в характерних перерізах 1-1, 2-2 після наплавлення і ТО за режимом високого відпуску. Величина стискаючих осьових залишкових напружень з урахуванням мікроструктурних перетворень в ЗТВ в перерізі 1-1 сягає до ($-220 - -550$) МПа, в перерізі 2-2 до ($-50 - -500$) МПа. Максимальне значення осьових залишкових напружень розтягу в основному матеріалі не перевищує ($100-120$) МПа (переріз 1-1).

Нерівномірність розподілу ЗН (рис. 3.7., рис. 3.12.) після наплавлення ($T_p = 250$ °С) та ТО ($T = 650$ °С, витримка 20 год) в поперечному напрямку накладання валиків (переріз 3-3, на глибині 12 мм від поверхні наплавлення) представлена періодичністю значень кільцевих ЗН від -200 до 50 МПа (ширина стрічкового електроду $b = 60$ мм) і від -570 до -310 МПа (ширина стрічкового електроду $b = 40$ мм).

					ЗП 81.04.0000.000.ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

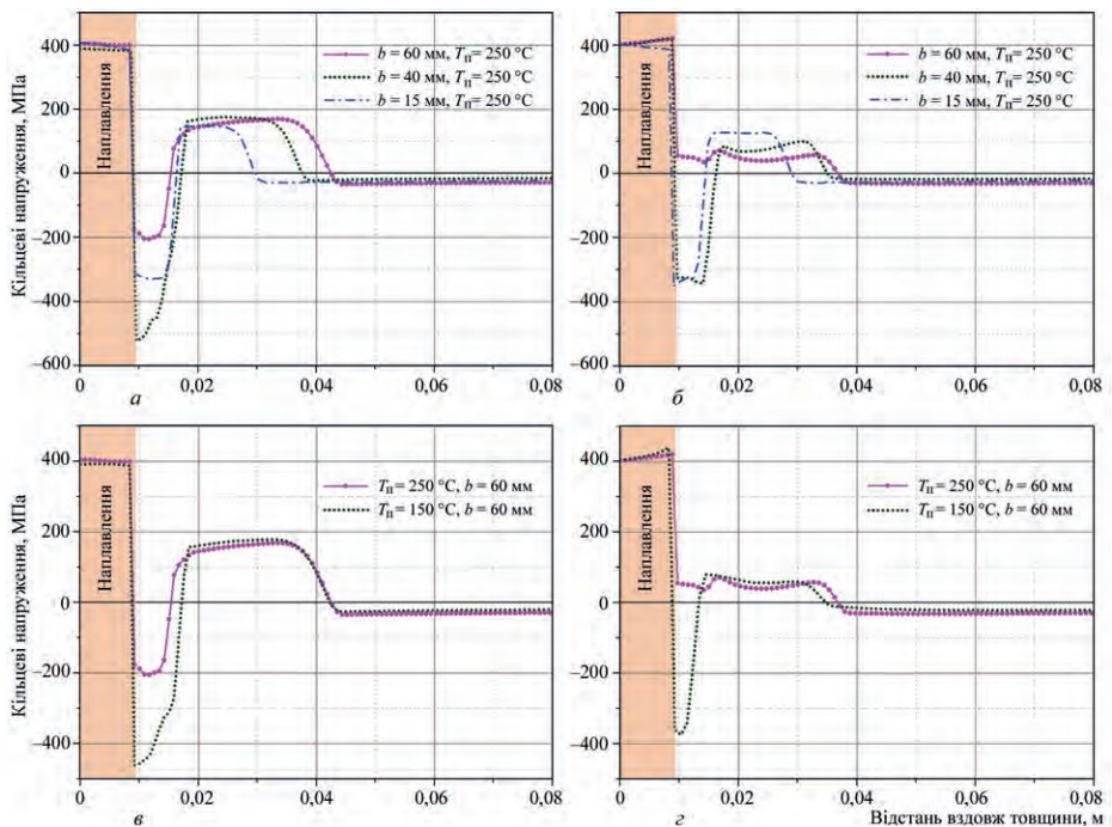


Рисунок 3.10 - Розподіл кільцевих ЗН $\sigma_{\beta\beta}$ по товщині КР після наплавлення та ТО ($T = 650\text{ }^{\circ}\text{C}$, витримка 20 год). Варіація ширини валиків: a – переріз 1-1, $б$ – 2-2. Варіація температури підігріву: $в$ – переріз 1-1, $г$ – 2-2.

Для випадку ручного дугового наплавлення ($b = 15\text{ мм}$) маємо майже рівномірну зону стиску кільцевих ЗН на рівні -350 МПа та незначну періодичність розподілу осьових ЗН від -420 до -350 МПа .

Осьові залишкові напруження у випадку наплавлення стрічковими електродами змінюються від -230 до -50 МПа ($b = 60\text{ мм}$) та від -500 до -375 МПа ($b = 40\text{ мм}$). Таким чином, результати розподілу кільцевої та осьової компонент залишкових напружень по товщині КР та в поперечному напрямку накладання валиків після наплавлення і ТО за режимом високого відпуску для різних технологічних режимів показали, що зменшення температури попереднього підігріву при наплавленні з 250 до $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ призводить до зменшення глибини ЗТВ і в той же час до суттєвого підвищення величини стискаючих кільцевих та осьових ЗН в ЗТВ основного матеріалу та ширини зони стискаючих

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЗП 81.04.0000.000.ПЗ

Арк.

40

ЗН за рахунок збільшення об'ємної частки мартенситної складової в кінцевій мікроструктурі.

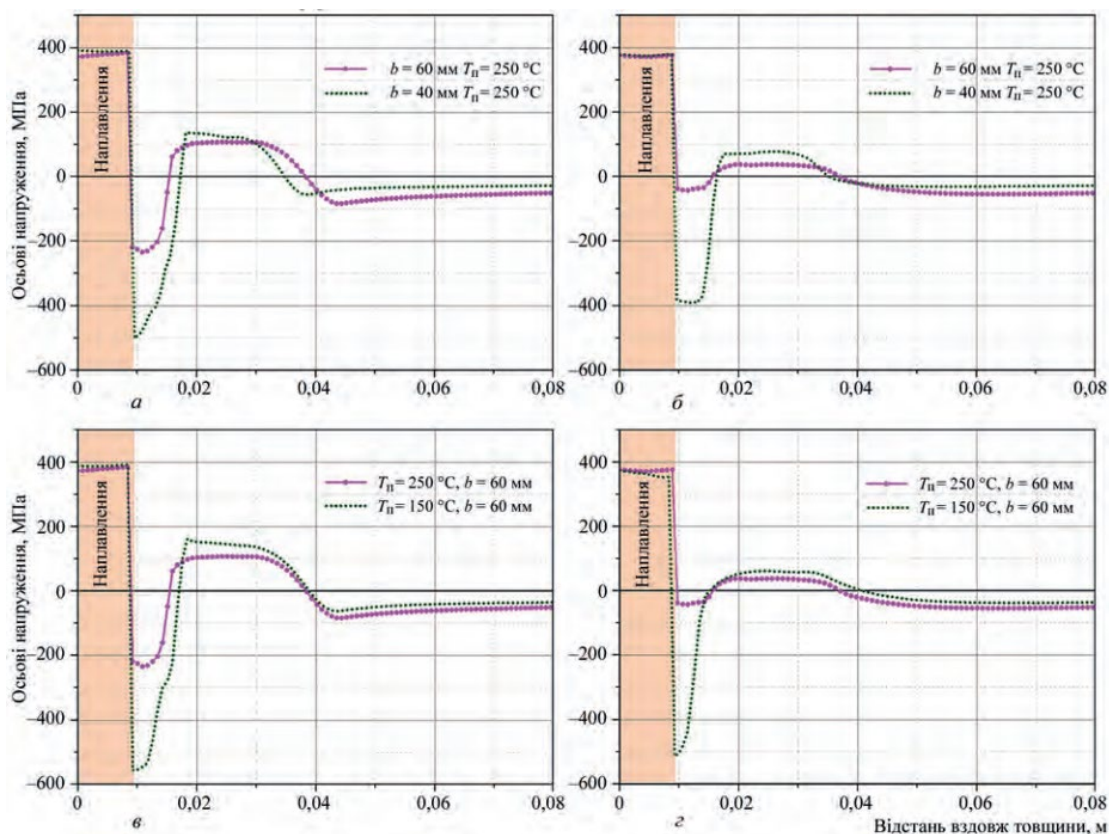


Рисунок 3.11 - Розподіл осьових ЗН σ_{zz} по товщині КР після наплавлення та ТО ($T = 650\text{ }^{\circ}\text{C}$, витримка 20 год). Варіація ширини валиків: а – переріз 1-1, б – 2-2. Варіація температури підігріву: в – переріз 1-1, г – 2-2.

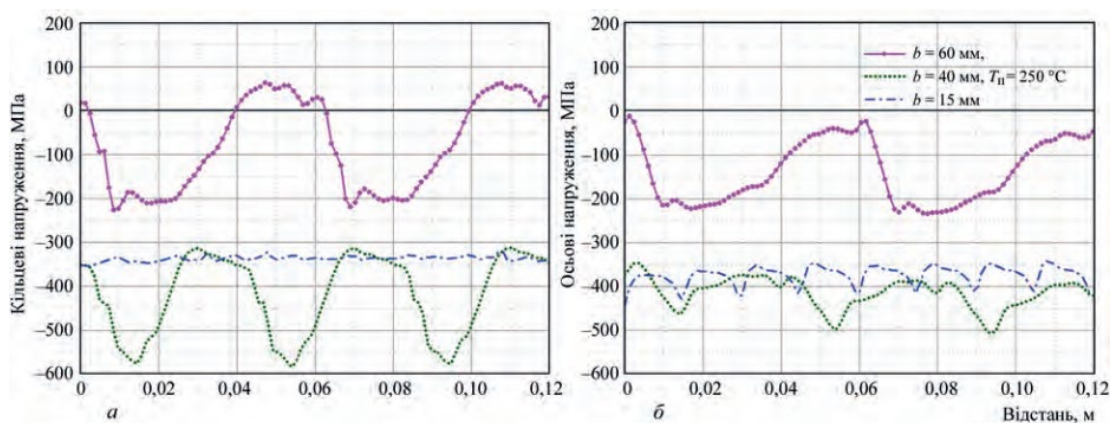


Рисунок 3.12 - Розподіл кільцевих $\sigma_{\phi\phi}$ (а) та осьових σ_{zz} (б) ЗН після наплавлення та ТО ($T = 650\text{ }^{\circ}\text{C}$, витримка 20 год) КР в ЗТВ основного матеріалу в перерізі 3-3 (в поперечному напрямку накладання валиків, на глибині 12 мм. від поверхні наплавлення).

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЗП 81.04.0000.000.ПЗ

Арк.

41

Збільшення ширини стрічкового електрода при наплавленні призводить до збільшення в основному матеріалі глибини ЗТВ, а також зони ЗН розтягу. При цьому за рахунок зменшення об'ємної частки мартенситної складової в кінцевій мікроструктурі встановлено звуження зони ЗН стиску та зниження величини стискаючих ЗН в ЗТВ, як кільцевих, так і осьових. Згідно табл. 3.1. варіювалася тривалість витримки при проведенні моделювання технологічної операції ТО за режимом високого відпуску при температурі $T = 650\text{ }^{\circ}\text{C}$, а саме 5, 10 та 20 год. Результати розрахунків розподілу по товщині кільцевих залишкових напружень в залежності від тривалості витримки при ТО для випадку наплавлення стрічковим електродом $b = 60\text{ мм}$ представлені на рис.3.13. та для випадку ручного наплавлення покритими електродами при $b = 15\text{ мм}$ представлені на рис. 3.14.

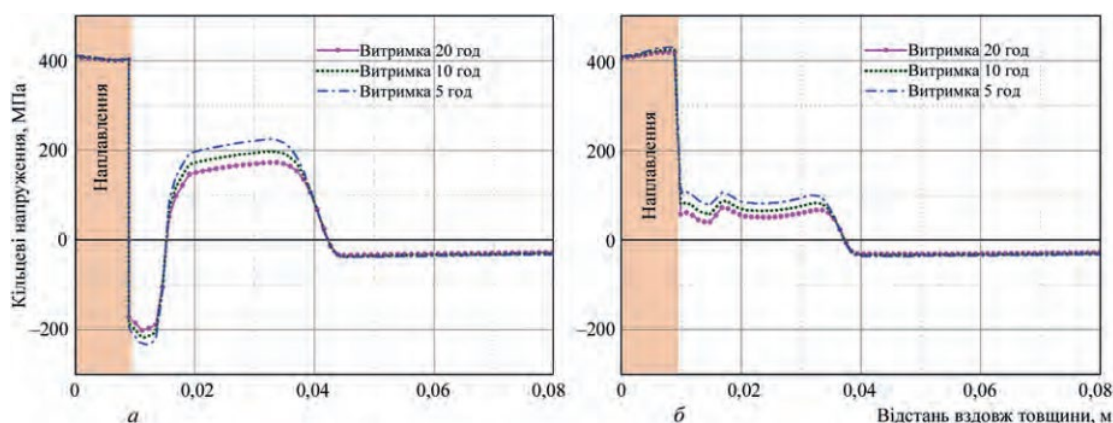


Рисунок 3.13 - . Розподіл кільцевих ЗН $\sigma_{\theta\theta}$ по товщині КР в двох характерних перерізах при варіації режиму термообробки (тривалості витримки при $T = 650\text{ }^{\circ}\text{C}$) для випадку дугового наплавлення під флюсом стрічковим електродом $b = 60\text{ мм}$: a – переріз 1-1, b – 2-2.

Результати (рис.3.13.) вказують на те, що максимальний рівень ЗН розтягу в основному матеріалі після 5 год витримки при ТО знизився до 220 МПа, після 10 год – до 200 МПа, після 20 год – до 170 МПа (переріз 1-1).

Максимальні значення стискаючих напружень в ЗТВ отримано також при 5 год тривалості витримки, а саме -235 МПа . Для ручного дугового наплавлення покритими електродами (рис. 3.14.) отримали зниження максимального рівня ЗН розтягу в основному матеріалі після 5 год витримки при ТО до 200 МПа, після 10

год – до 175 МПа, після 20 год – до 150 МПа (переріз 1-1). В ЗТВ основного матеріалу отримано зниження максимального значення стискаючих напружень при 5 год тривалості витримки до –330 - –350 МПа.

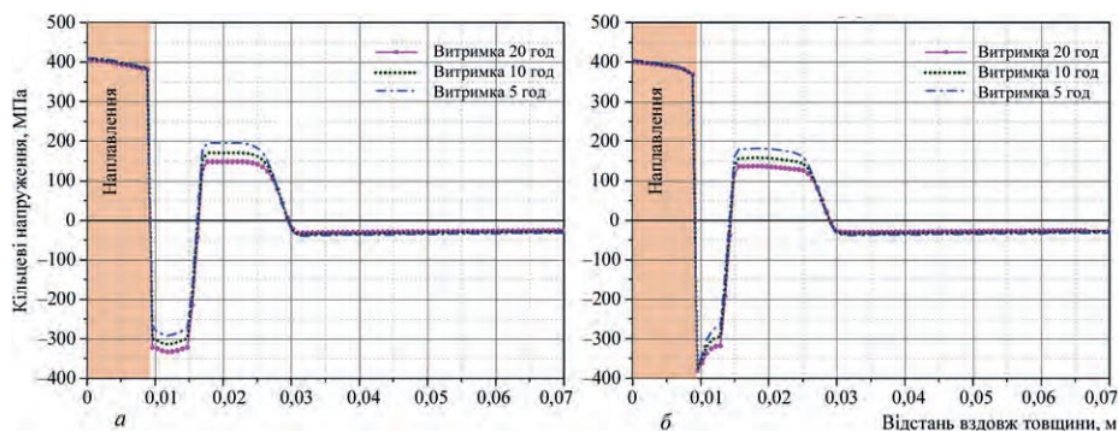


Рисунок 3.14 - Розподіл кільцевих ЗН $\sigma_{\beta\beta}$ по товщині КР в двох характерних перерізах при варіації режиму термообробки (тривалості витримки при $T = 650\text{ }^{\circ}\text{C}$) для випадку ручного дугового наплавлення покритими електродами $b = 15\text{ мм}$: a – переріз 1-1, b – 2-2.

Для КР ВВЕР-1000, виготовленого із низьколегованої високоміцної сталі 15Х2НМФА, провели дослідження наплавлення антикорозійного шару на внутрішню поверхню по двом різним технологіям: автоматичне дугове наплавлення під флюсом стрічковим електродом циліндричної частини КР та ручне дугове наплавлення покритими електродами. Були отримані розрахункові дані щодо кінетики розподілу температур, швидкостей охолодження, розмірів ЗП і ЗТВ і кінетики мікроструктурних фазових перетворень. Опираючись на ці дані можемо вибрати устаткування, підібрати матеріали, розробити технологію наплавлення внутрішньої поверхні КР.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЗП 81.04.0000.000.ПЗ

Арк.

43

4 АПАРАТУРА ДЛЯ НАПЛАВЛЕННЯ КОРПУСІВ

Для автоматичного наплавлення внутрішньої поверхні корпусів можемо використовувати автомат АД-231 типу АДФ 1204 УХЛ4, призначений для виконання широкого кола робіт по зварюванню та наплавленню різними електродами на постійному струмі. Використовується автомат в установках для наплавлення та верстатах при наплавленні тіл обертання, а також плоских деталей та виробів складної форми.

Завдяки змінним вузлам автомат дозволяє проводити наступні операції: Наплавлення суцільним дротом; широкошарове наплавлення дротяним електродом з поперечними коливаннями; наплавлення порошковою стрічкою; наплавлення порошковим дротом; широкошарове наплавлення стрічкою.

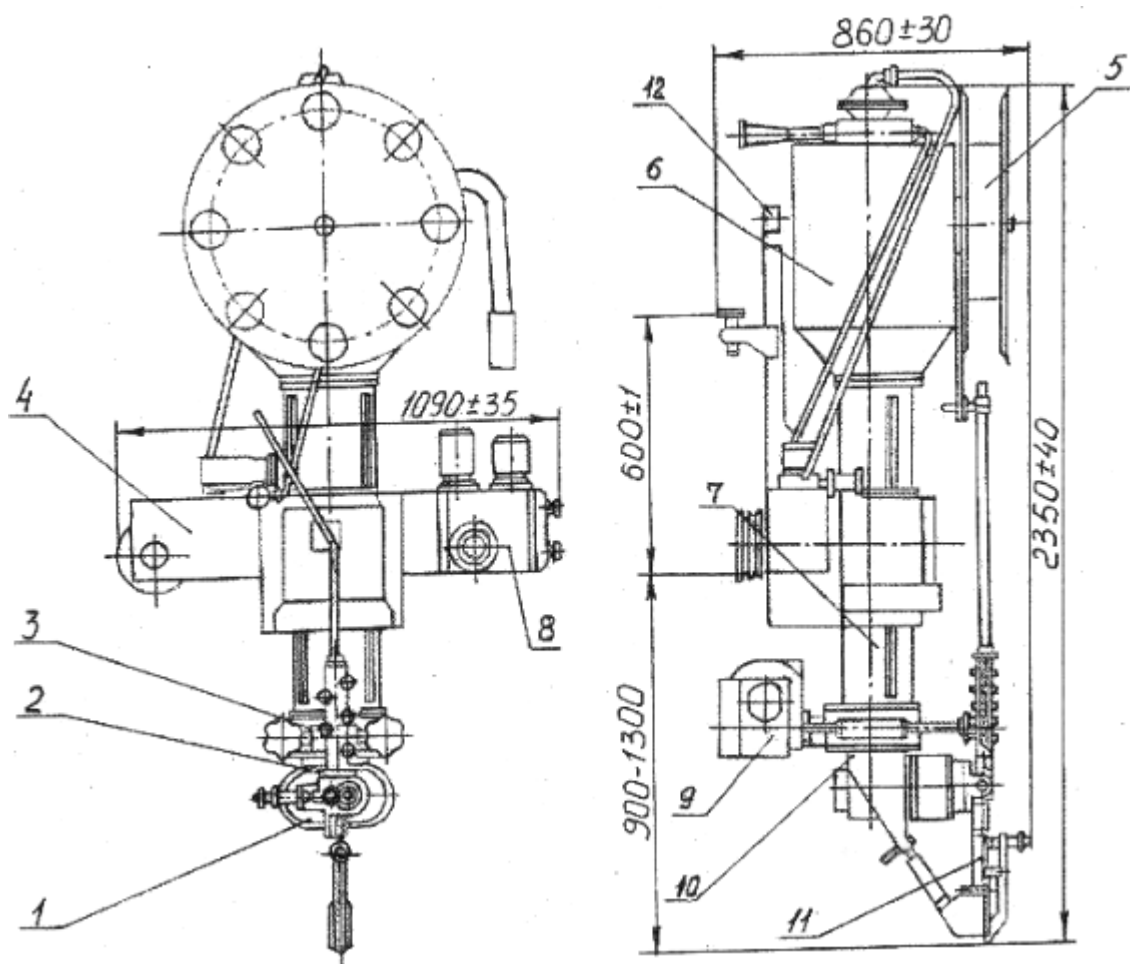
На рис. 4.1. показані основні вузли установки АД-231. Механізм подавання 1 призначено для подачі електрода до місця наплавлення, і являє собою вузол, що складається з електродвигуна і циліндричного редуктора.

Електродвигун механізму подавання працює в схемі з десятикратним регулюванням, що забезпечує в межах діапазону регулювання швидкості резистором з пульта управління і можливість плавної її зміни під час наплавлення.

Прижимний механізм встановлено на кришці подаючого механізму. Він забезпечує надійний контакт зварювального дроту з подаючими роликами за допомогою регулюючого пружинного прижиму.

Супорт 3 є з'єднуючою ланкою між штангою автомата і подаючим механізмом, що дозволяє здійснювати корегування електрода вздовж наплавочного валика в межах 90 мм і при необхідності здійснює коливання електрода. Поперечне корегування здійснюється переміщенням основи в напрямку корпуса. З цією метою до направляючих основи болтами прикручена черв'ячна рейка, зусилля до якої передається від черв'яка через паразитну черв'ячну шестерню, насаджену з допомогою голчатих підшипників на вісь.

					ЗП 81.04.0000.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44



1 – механізм подавання, 2 – тримач мундштука, 3 – супорт, 4 – візок самохідний, 5 – касета з гальмом, 6 – флюсоапарат, 7 – механізм підйому, 8 – привід візка, 9 – механізм коливаль, 10 – установка кінцевих вимикачів, 11 – мундштук, 12 – колодка.

Риснок 4.1 - Загальний вид автомата АД-231 типу АДФ1204 УХЛ4 для дугового наплавлення дротом.

Візок самохідний 4 служить для надання автомату робочої і маршової швидкостей. Пересувається по спеціальному рейковому шляху, або по швелеру за допомогою роликового ланцюга або без нього, розміщеному у вертикальній площині.

Касета з гальмом 5 складається з касети і гальмівного пристрою. Касета розроблена під стандартні мотки електродного дроту і складається зі зварного корпусу і щок, яка кріпиться до корпусу гвинтами.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЗП 81.04.0000.000.ПЗ

Арк.

45

Флюсоапарат 6 призначений для подачі флюсу до місця наплавлення і видалення флюсу, що не розплавився з наплавленого шва. По конструкції апарат всмоктуючого типу, ежекторний, двокамерний. Однією з камер є внутрішня порожнина колони механізму підйому.

Механізм підйому 7 служить для установки мундштука по висоті, як під час налагоджувальних операцій, так і при наплавленні.

Головка з допомогою фланця кріпиться до пустотілої циліндричної колони з трьома привареними рейками, на яких нарізана трапецоїдальна різьба. Така ж різьба виконана у внутрішньому отворі шестерні, що виконує функції гайки. Для запобігання колони від прокручування навколо вертикальної осі при роботі механізму у верхній частині корпусу в кільцевій проточці встановлена втулка, внутрішній діаметр якої рівний зовнішньому діаметру різьби на колоні, на цій втулці болтами закріплена направляюча, що має вертикальний паз, в якому при підйомі ковзає одна з рейок, що приварені до колони. Втулка фіксується стопорними гвинтами, що входять в кільцеву проточку на поверхні втулки. При необхідності установочного повороту колони з головкою навколо вертикальної осі, гвинти ослабляються, колона вручну повертається і знову фіксується.

Привод механізму підйому забезпечує підйом і опускання колони вагою до 500 кг, швидкість підйому і опускання колони складає 0.4 м/хв..

Привод візка 8 складається з редуктора і двох електродвигунів, які задають автомату робочу і маршову швидкість. Вмикання двигунів здійснюється з пульта.

На кронштейні за допомогою скоби проводиться кріплення гірлянд кабелів управління і зварювальних кабелів.

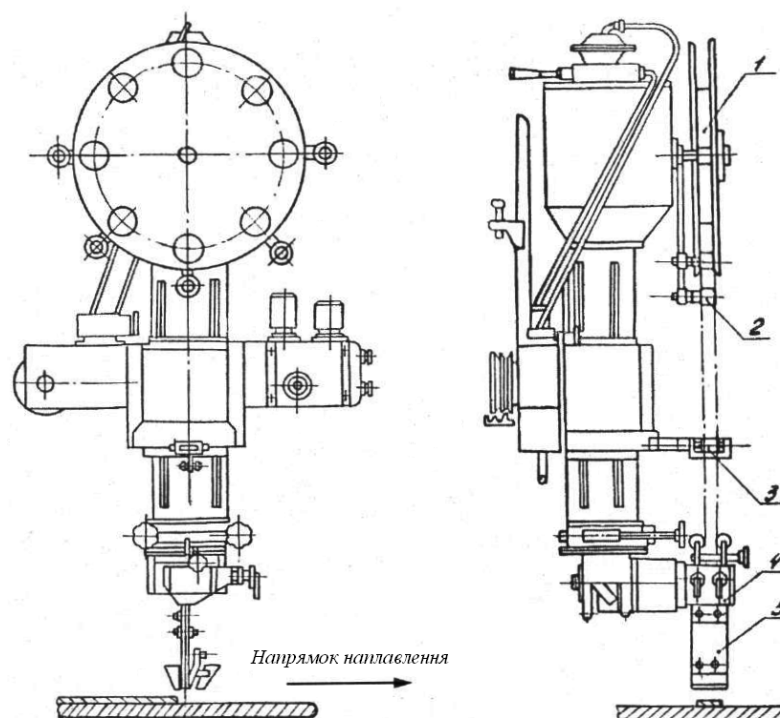
Мундштук 11 призначений для наплавлення плоских і круглих деталей суцільним і порошковим дротом діаметром 1-6 мм на струмах до 1250 А.

Корпус мундштука мідний. З однієї сторони на нього накручена втулка, завдяки якій він кріпиться в прижимному механізмі, з іншої сторони в нього вкручується мідний наконечник, під відповідний діаметр зварювального дроту, що забезпечує підвід зварювального струму. Мундштук має струмопідвід, воронку для флюсу і змінну спіраль, що захищає корпус від спрацювання.

					ЗП 81.04.0000.000.ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Додатково постачається комплект змінних вузлів:

- приставка для наплавлення холоднокатаною стрічкою;
- касета для холоднокатаної стрічки;
- стрічкоприймач;
- приставка для наплавлення порошковою стрічкою;
- касета для порошкової стрічки;
- касета для порошкового дроту.



1 - касета, 2 – блок роликів, 3 – ловитель стрічки, 4 – механізм подачі, 5 – мундштук для стрічки.

Рисунок 4.2 - Автомат АД-231 типу АДФ1204 УХЛ4 для наплавлення стрічкою

Наплавлення внутрішньої стінки реактора буде виконуватися приставкою для наплавлення холоднотягнутою стрічкою, що є змінним вузлом який призначений для наплавлення великих плоских і циліндричних поверхонь.

Складається з механізму подачі 4 рис. 4.2. для стрічки шириною від 30 до 60 мм, касети для холоднокатаної стрічки 1 Рис. 4.2. Механізм подачі для стрічки закріплюється на подаючому механізмі замість тримача мундштука. У верхній

					ЗП 81.04.0000.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

частині корпусу механізму подачі для стрічки встановлені дві спеціальні гайки з роликами, які гвинтом з правою і лівою різьбою встановлюються по ширині стрічки.

Подача електродної стрічки у зварювальну ванну здійснюється між стальними пластинами мундштука 5 Рис. 4.2. В нижній частині одної з пластин встановлені сталні вставки з високою твердістю, що служать для підводу струму до стрічки, електричний контакт забезпечується підпружиненим важелем.

					ЗП 81.04.0000.000.ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5 РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ НАПЛАВЛЕННЯ

В розділі розробки технологічного процесу наплавлення ми розглядаємо шлях який потрібно пройти заготівці для того щоб стати деталлю, що буде працювати в дуже агресивному середовищі, які параметри та спосіб було обрано для отримання гарної якості, та як її гарантувати.

5.1 Вхідний контроль.

В першу чергу проходить перевірка деталі технічним оглядом згідно з ISO 17637-2014 [22], на наявність тріщин, скосів, напливів, непроварів, та інших дефектів, для цього пропоную використовувати рулетку, яка допоможе в замірах відповідності заготовки по розмірах, використання лазерного рівня марки Dnipro-M ML-512 GSX допоможе виявити геометричні дефекти якщо такі присутні. Після зовнішнього контролю реактор ще проходить ультразвуковий контроль у місцях швів по ISO 17640-2016 [23], по завершенню цих операцій деталь допускається до підготовчих процесів.

5.2 Підготовка до наплавлення.

На етапі підготовки внутрішню поверхню що підлягає наплавленню зачищають методом піскоструйної обробки що зачіщає метал до блиску, видаляє бруд та інші частки, що будуть заважати отриманню надійного зчеплення та чистого слою наплавленого матеріалу. Наступний процес йде обезжирення всієї внутрішньої поверхні від консерваційних мастил, жирових забруднень які при наплавці можуть утворювати під наплавленим шаром дефектні включення. Знімаються жири та мастила на сталях розчином їдкого натру, тринатрій фосфату, кальцинованої соди, сітанолом ДС-10 при температурі 60-80 °С з витримкою протягом 10-20 хв. Після знежирення заготівку продувають під тиском 0.1-0.3 МПа і КР готовий до наплавлення

					ЗП 81.04.0000.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

5.3 Параметри наплавелення

Матеріал основи, 15X2НМФА; Матеріал стрічки, 08X19Н10Г2Б; Флюс, ESAB OK FLUX 10.71; Температура попереднього підігріву $T_{\text{п}}$, 250 °С; Сила струму $I_{\text{зв}}$, 700 А; Напруга $U_{\text{д}}$, 32 В; Коефіцієнт ефективності η 0,9; Ефективна погонна енергія, 14,608 кДж/мм; Швидкість наплавлення $v_{\text{н}}$, 10 м/год; Ширина валика b , 60 мм; Швидкість обертання реактора, 0.89 оборотів/год; Швидкість руху апарату 0.0445 м/год Температура відпуску ТО, 650 °С; Час витримки, 20 год.

5.4 Процес наплавлення

Після налаштування та підтвердження програми наплавлення в середину деталі подають автомат АД-231 на установці для наплавлення КР. Перед наплавленням пальник починає підігрівати місце контакту до 250 °С, підігрів буде продовжуватися на протязі всього процесу наплавлення, це зумовлене розмірами деталі. Включають подачу флюсу, механізм починає обертати КР. Відбувається контакт і процес наплавлення йде проти напрямку обертання, установка здійснює плавне переміщення вздовж осі обертання. По закінченню процесу деталь піддають відпуску при температурі 650 °С, протягом 20 годин, це допоможе зменшити напруження що залишились після наплавлення і подовжить срок служби корпусу атомного реактора.

5.5 Вихідний контроль виробу

Після закінчення процесу наплавки, деталь проходить контроль якості, спочатку проводять технічний огляд за ISO 17637-2014 [22], це дозволить вивити геометричні дефекти які треба виправити для правильної та надійної роботи КР. По завершенню проводять ультразвуковий контроль згідно з ISO 17640-2016 [23] що дозволить впевнитися в тому що поверхня має монолітну структуру та не містить дефектів. Як останню операцію по контролю якості в декількох місцях беруть пробу твердості, це дозволить впевнитися що ми отримали покриття з заданими нами характеристиками.

					ЗП 81.04.0000.000.ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Виходячи з обраних параметрів та розробленої технології ми можемо переходити до фінальних розділів, економічно обґрунтувати обраний спосіб та визначити яку небезпечність може нести спосіб і як захистити працівників від можливих негативного впливу шкідливих та небезпечних факторів.

					ЗП 81.04.0000.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

6 ОХОРОНА ПРАЦІ

Під час роботи можуть виникати небезпечні ситуації які можуть як призвести до великих грошових витрат, так і до смерті працівників. Утворюються такі ситуації з різноманітних причин що можуть виникнути під час роботи, для їх попередження та усунення є охорона праці.

Охорона праці займається питаннями забезпечення безпеки життєдіяльності людини під час праці у виробничому середовищі. Її дотримання дозволяє зменшити ризик травмування людей, та забезпечує що процес пройде від початку до кінця без неприємних сюрпризів.

6.1 Аналіз шкідливих та небезпечних виробничих факторів

При виконанні зварювальних робіт на працівників можуть впливати шкідливі та небезпечні виробничі фактори.

До шкідливих виробничих факторів належать велика запиленість і загазованість робочої зони; ультрафіолетове, видиме й інфрачервоне випромінювання зварювальної дуги, шум.

Шкідливі та небезпечні фактори	Ймовірність виникнення фактору	Аналіз
Шкідливі речовини	хх	Це може бути гази важких металів та небезпечні аерозолі що утворюються під час плавлення металів, флюс який який використовують для електрошлакового наплавлення, пил що може залишитися після наплавлення.

					ЗП 81.04.0000.000				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат					
Розроб.		Григоращенко М.І.			Охорона праці		Лім.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Левченко О.Г.						51	71
							КПІ ім. Ігоря Сікорського, НН		
Н. Контр.		Чорний А.В.					ІМЗ ім. Є.О. Патона,		
Затверд.		Смирнов І.В.					гр. ЗП-81		

Випромінювання в оптичному діапазоні:	Ультрафіолетове	x	Теоретично може бути під час процесу наплавлення, але враховуючи автоматизацію процесу, розміри реактора, та те що весь процес проходить під значним шаром флюсу, ці види випромінювання скоріш за все не дійдуть до працівників.
	Видиме	x	
	Інфра-червоний	xx	
Шум		x	Робота апарату для наплавлення та робота механізмів здійснює шум що при тривалому часі дії на людину (а враховуючи обсяг роботи, то займає це багато часу), може викликати до проблем з слуховим апаратом людини, призводити до втоми, погіршення самопочуття, головний біль.
Електричний струм		xx	При недотриманні правил безпеки можливо ураження струмом що може призвести до летального наслідку, та при відлагодженню/новому обладнанню і дотриманні правил безпеки шанс такого дуже знижується.
Іскри, бризки і викиди розплавленого металу		x	Теоретично можливо потрапляння капель розплавленого матеріалу на одяг, шкіру працівників, але враховуючи розміри деталі, таке досить малоймовірно, також теоретично може іскрити проводка, у такому разі процес не можна починати до полагодження апаратури або ж заміни на нову.
Механізми і вироби що рухаються		xx	При необережному перебуванні поблизу рухомих механізмів можливо отримати пошкодження, починаючи з ушибів та синяків до втрати кінцівки, яку може “зажувати” у механізм обертання, чи будь-який інший, так і до отримання травм що можуть стати летальними, враховуючи що більшість рухомих механізмів розміщуються всередині виробу “корпус реактора”, шанси отримати травму зменшуються, та залишається пристрій обертання, який при неувазі та недбалості може призвести до значних травм.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЗП 81.04.0000.000.ПЗ

Арк.

53

6.2 Нормативні вимоги безпеки ті гігієни праці

Вимоги охорони праці під час електрозварювання металів регламентуються нормативно-правовим актом з охорони праці НПАОП 28.52-1.31-13 [24].

Відповідно до норм “Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу № 0472-14” [25] всі процеси потрібно максимально автоматизувати, що дозволить зменшити кількість працівників, замінити низькокваліфікаційних працівників на висококваліфікаційних, які частенько ставляться до праці більш відповідально і знижують ризик виникнення надзвичайних ситуацій. Обладнання повинно відповідати ДНАОП 0.00-1.21-98 [26] та ДНАОП 0.00-1.32-01 [27].

Враховуючи що при електрошлаковому наплавленні виділяється досить багато газів та небезпечні для людини аерозолі, необхідна витяжна вентиляція згідно з вимогами ДБН В.2.5-67:2013 [28].

Безпека праці процесів електрошлакового наплавлення має відповідати вимогам ДСТУ 2456-94 [29].

Під час електрошлакового зварювання не дозволяється керування одним і тим же параметром режиму з різних пультів одночасно, це може призвести до виходу обладнання з ладу та подальших аварійних ситуацій.

Не допускається знаходження оператора та іншого персоналу в процесі електрошлакового зварювання під повзунами та пластинами, поблизу шва.

Підготовчі роботи як плавлення флюсу повинні виконуватись з урахуванням вимог до ручного розливання металу об’ємом від 5 до 6 літрів.

Під час експлуатації обладнання для електрошлакового зварювання повинна бути забезпечена надійність закріплення зворотніх та бокових роликів ходового механізму.

Необхідно перевіряти надійність роботи пристроїв, що запобігають падінню зварювальних апаратів у випадку відключення електричної енергії, зниження вакууму, обриву тросу або ланцюгів.

					ЗП 81.04.0000.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

Для захисту працюючих від бризок розплавленого металу і інфрачервоного випромінювання слід встановлювати захисні екрани, кабіни і застосовувати ЗІЗ.

Під час електрошлакового зварювання виробів з підігрівом робочі місця операторів належить розміщувати у термоізованих кабінах, які забезпечують кондиціонування повітря та оснащені пультами дистанційного керування процесом.

6.3 Інженерні рішення для забезпечення безпеки праці

Відстань між устаткуванням, від устаткування до стін та колон приміщення, інших споруд, ширина проходів та проїздів повинні відповідати чинним будівельним нормам та нормам технологічного проектування заготівельно зварювальних цехів ДБН В.2.2-28:2010 [30].

Підлоги для виробничих приміщень для виконання дугового та електрошлакового зварювання мають бути виготовлені з матеріалів, що не згоряють і мають малу теплопровідність. Підлога повинна мати рівну не ковзку поверхню.

Системи місцевих висмоктувачів шкідливих речовин необхідно окремо передбачати від системи загальнообмінної вентиляції.

Місце збирання зовнішнього повітря не допускається розташовувати на відстані ближче 8 м. по горизонталі від сміттєзбірника, зони паркінгу автомобілів, проїздів, зон завантаження, вентиляційних отворів каналізації, верхівок димових труб та інших подібних джерел забруднення та утворення неприємного запаху. Повітрозбірник не допускається розміщувати на фасаді, що виходить на жваву вулицю. Якщо це неможливо, то приймальний отвір повітрозбірника повинен бути якомога вище від землі.

Видалене повітря з виробничих приміщень в атмосферу повинно проходити фільтрацію (очищення) від шкідливих речовин до концентрацій, що не перевищують допустимих рівнів викидів.

					ЗП 81.04.0000.000.ПЗ	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Враховуючи кількість шкідливих речовин та аерозолів що виділяються під час процесу, у приміщенні необхідно мати аварійну вентиляцію згідно ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 [31].

Рівні шуму, ультразвуку та інфразвуку мають відповідати вимогам ДСН 3.3.6.037-99 [32], а загальної і місцевої вібрації – ДСН 3.3.6.039-99 [33].

Освітлення цехів, ділянок і робочих місць, де виконуються роботи з дугового і електрошлакового зварювання, повинно відповідати ДБН В.2.5-28:2018 [34].

Робоче місце зварника щодо розташування робочої поверхні, органів управління та контролю повинно відповідати вимогам ДСТУ 2456-94 [29].

Електротехнічні вироби з точки зору безпеки повинні відповідати вимогам ДНАОП 0.00-1.21-98 [26] та ДНАОП 0.00-1.32-01 [27].

Джерела живлення повинні підключатися до розподільних електричних мереж з напругою не вище 600 В. Безпосереднє живлення зварювальної дуги від силової, освітлювальної та контактної мережі не допускається.

6.4 Пожежна безпека

Згідно з НАПБ Б.03.002-2007 [35] приміщення, у яких виконуються зварювальні роботи, за вимогами вибухопожежної небезпеки належить до категорії Г (негорючі речовини й матеріали у гарячому, розжареному, розплавленому станах, процеси обробки яких супроводжуються виділенням променистої теплоти, іскор та полум'я; горючі гази, рідини, тверді речовини, які спалюються чи утилізуються у вигляді палива).

Згідно з ДНАОП 0.00-1.21-98 [26] та ДНАОП 0.00-1.32-01 [27] у приміщенні виділяється зона II-Па, де обертаються тверді горючі речовини. Категорія за БЕМЗ (безпечний експериментальний зазор між фланцями оболонки, мм) – ПА (> 0,9 мм). Група вибухобезпеки сумішей (за температурою самозапалювання) – ТІ (ТС) В > 450 °С. Ступінь вогнестійкості будівлі – І (не допускається поширення вогню на основні будівельні конструкції), мінімально допустиме обмеження

					ЗП 81.04.0000.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

вогнестійкості – 2,5 год, максимально допустиме обмеження поширення вогню для внутрішніх стін – 25 см.

Пожежна безпека забезпечується: запобігання спалаху ізоляції при КЗ за рахунок максимального струменевого захисту; запобігання утворення горючого середовища за рахунок надійної герметизації обладнання, обмеженням застосування і зберігання горючих і вибухонебезпечних речовин; застосування пожежної сигналізації з датчиком (ИДФ-І, ДПД і др.); □ використанням вогнегасників класу пожежі Е вогнегасники типу УО, ОП-10А. При організації технологічного процесу дотримуються усіх вимог електростатичної іскробезпеки. Передбачається також аварійне зливання пожежонебезпечних рідин, аварійне втручання горючих газів із апаратури.

Передбачено пристрої, які забезпечують обмеження поширення пожежі (описати конкретно). Приміщення обладнується засобами колективного та індивідуального захисту людей від небезпечних факторів пожежі та протидимного захисту. Тип виконання електрообладнання в приміщенні повинен відповідати класу зони пожежо- та вибухобезпечності. На ділянках виробничого приміщення, де застосовується зварювання, передбачаємо встановлення протипожежних щитів, укомплектованих вуглекислотними вогнегасниками, баграми, ломами, відрами, сокирами. Біля щитів передбачаємо наявність ящиків з піском, сухість якого регулярно перевіряється.

Для гасіння можливих пожеж передбачаємо також використання азбестових покривал.

Для автоматичного виявлення пожеж в виробничому приміщенні, в якому виконується зварювання, передбачаємо наявність датчиків, які своєчасно сповіщають про виниклу пожежу і дають команду на вмикання автоматичної системи гасіння пожежі.

					ЗП 81.04.0000.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

7 ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ

В даному розділі дипломного проекту ми маємо провести визначення економічної ефективності вибраної технології для наплавлення внутрішньої поверхні корпусу атомного реактору.

Вибрана технологія автоматичного дугового наплавлення під флюсом призначенна для прискорення виходу продукції та отримання більш якісних виробів, що призведе до підвищення спросу та ціни на такий товар.

Таблиця 7.1 - Нормування праці та устаткування.

	Обладнання	Вартість	Норма часу, год.	Розряд
Базовий	Dnipro-M MG-18	13500	8241.276	5
Новий	Ад-231	250000	865.336	5

7.1 Визначення технологічної собівартості виробу

Економічне обґрунтування спроектованих технологічних процесів потребує розрахунку технологічної собівартості виробу. Технологічною собівартістю називають суму поточних витрат виробництва, які безпосередньо пов'язані з виконанням варіанта технологічного процесу.

Відносно даного технологічного процесу є витрати на: матеріали для зварювання; зарплату робітників із відрахуваннями; поточний ремонт та технічне обслуговування устаткування; утримання та амортизацію площі будівлі для робочих місць.

					ЗП 81.04.0000.000				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат					
Розроб.		Григоращенко М.І.			Економічний розділ		Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Тимошенко Н.Ю.						60	71
							КПІ ім. Ігоря Сікорського, НН ІМЗ ім. Є.О. Патона, гр. ЗП-81		
Н. Контр.		Чорний А.В.							
Затверд.		Смирнов І.В.							

7.1.1 Витрати на технологічні матеріали

Витрати матеріалів для нанесення покриття розрахуємо за формулою:

Нове:

$$C_{\text{ел}} = M_{\text{н}} K_{\text{ел}} C_{\text{ел}} K_{\text{тр}} = 14174.204 \cdot 1.05 \cdot 380 \cdot 1.05 = 5938282.632 \text{ грн.}$$

Базове:

$$C_{\text{ел}} = M_{\text{н}} K_{\text{ел}} C_{\text{ел}} K_{\text{тр}} = 15186.612 \cdot 1.05 \cdot 290 \cdot 1.05 = 4855539.426 \text{ грн.}$$

де $M_{\text{н}}$ - маса нанесеного металу, кг;

$K_{\text{ел}}$ - коефіцієнт витрат матеріалу, який враховує втрати на угар, розбризкування, недогарки, масу покриття електродів;

$C_{\text{ел}}$ - ціна матеріалу, грн/кг;

$K_{\text{тр}}$ - коефіцієнт, який враховує транспортно-заготівельні витрати.

Масу нанесеного металу $M_{\text{н}}$, кг, можна визначити за формулою:

Нове:

$$M_{\text{н}} = 0,001 F L J = 0.001 \cdot 8.4 \cdot 216334 \cdot 7.8 = 14174.204 \text{ грн.}$$

Базове:

$$M_{\text{н}} = 0,001 F L J = 0.001 \cdot 2.25 \cdot 865334 \cdot 7.8 = 15186.612 \text{ грн.}$$

де F - площа поперечного перерізу шва, см^2 ; 0,

L - довжина, см;

J - густина металу, г/см^3 .

Витрати на флюс:

$$C_{\text{ел}} = M_{\text{н}} K_{\text{ф}} C_{\text{ел}} K_{\text{тр}} = 14174.204 \cdot 1.2 \cdot 75 \cdot 1.05 = 133946.248 \text{ грн.}$$

$K_{\text{ф}}$ - коефіцієнт витрат флюсу

7.1.2 Витрати на електроенергію

Середні витрати електроенергії на 1кг наплавленого металу, базова технологія: $P_{\text{ен.ср.}} = 4 \text{ кВт} \cdot \text{год/кг}$; Середні витрати електроенергії на 1кг наплавленого металу, нова технологія: $P_{\text{ен.ср.}} = 4 \text{ кВт} \cdot \text{год/кг}$. Ціна = 1.68 грн/кВт·год

					ЗП 81.04.0000.000.ПЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Звідси, витрати електроенергії для нового варіанту становлять $14174.204 \cdot 4 = 56696.815$ кВт·год.

$$56696.815 \cdot 1.68 = 95250.65 \text{ грн.}$$

Для базового $15186.612 \cdot 4 = 60746.447$ кВт·год.

$$60746.447 \cdot 1.68 = 102054.03 \text{ гАрн.}$$

7.1.3 Витрати на заробітну плату

Витрати на заробітну плату робітників з відрахуваннями на соціальні потреби C_3 визначимо за формулою:

Нове:

$$C_3 = \sum_{i=1}^n C_{Ti} T_{ki} K_d K_c = 70 \cdot 865.336 \cdot 1.43 \cdot 1.4 = 121268.19 \text{ грн.}$$

Базове:

$$C_3 = \sum_{i=1}^n C_{Ti} T_{ki} K_d K_c = 70 \cdot 8241.2762 \cdot 1.43 \cdot 1.4 = 1154932.45 \text{ грн.}$$

де i - номер операції технологічного процесу;

n - кількість операцій;

C_{Ti} - почасова тарифна оплата розряду робітника, грн;

T_{ki} - норма часу, год;

K_d - коефіцієнт, який враховує доплати за відпрацьований час та додаткову зарплату;

K_c - коефіцієнт, який враховує відрахування на соціальні потреби.

7.1.7 Витрати на амортизацію

Амортизаційні відрахування по устаткуванню C_a визначаємо за формулою:

Нове:

$$C_a = \sum_{i=1}^n \frac{B_{oi} H_a T_{ki}}{\Phi_o K_e 100} = \frac{275000 \cdot 15 \cdot 865.336}{1676.16 \cdot 0.7 \cdot 100} = 30422.52 \text{ грн.}$$

					ЗП 81.04.0000.000.ПЗ	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Базове:

$$C_a = \sum_{i=1}^n \frac{B_{6i} H_a T_{ki}}{\Phi_o K_v 100} = \frac{14850 \cdot 15 \cdot 8241.2762}{5356.8 \cdot 0.7 \cdot 100} = 4895.631 \text{ грн.}$$

де i - номер операції технологічного процесу;

n - кількість операцій технологічного процесу;

B_{6i} - балансова вартість устаткування, грн;

H_a - норма річних амортизаційних відрахувань, %;

Φ_d - дійсний річний фонд часу роботи устаткування, год;

K_v - коефіцієнт використання устаткування, $K_v = 0,7$;

T_{ki} - норма часу на виконання операції, год.

Балансову вартість устаткування B_6 визначаємо за формулою:

Нове:

$$B_{6i} = Ц K_{TM} = 250000 \cdot 1.1 = 275000 \text{ грн.}$$

Базове:

$$B_{6i} = Ц K_{TM} = 13500 \cdot 1.1 = 14850 \text{ грн.}$$

де $Ц$ - ціна устаткування, грн;

K_{TM} - коефіцієнт, який враховує транспортно-монтажні витрати.

Значення Φ_d визначимо за формулою:

Нове:

$$\Phi_d = D_p P_{zm} T_{zm} K_p = 48 \cdot 2 \cdot 18 \cdot 0.97 = 1676.16$$

Базове:

$$\Phi_d = D_p P_{zm} T_{zm} K_p = 160 \cdot 2 \cdot 18 \cdot 0.93 = 5356.8$$

де D_p - кількість робочих днів за рік;

P_{zm} - кількість робочих змін за день;

T_{zm} - тривалість зміни, год;

K_p - коефіцієнт, який враховує планові простої устаткування.

Витрати на поточний ремонт та технічне обслуговування устаткування можна визначити за формулою:

					ЗП 81.04.0000.000.ПЗ	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Нове:

$$C_p = \sum_{i=1}^n B_{oi} K_p T_{ki} / K_n \Phi_o = 275000 \cdot 0.05 \cdot 865.336 / 0.7 \cdot 1676.16 = 10140.84 \text{ грн.}$$

Базове:

$$C_p = \sum_{i=1}^n B_{oi} K_p T_{ki} / K_n \Phi_o = 14850 \cdot 0.05 \cdot 8241.2762 / 0.7 \cdot 5356.8 = 1631.88 \text{ грн.}$$

де K_p - коефіцієнт, який враховує витрати на ремонт та технічне обслуговування устаткування.

Витрати, пов'язані з утриманням та амортизацією площі будівлі, яку займає устаткування за C_n визначаємо формулою:

Нове:

$$C_n = \sum_{i=1}^n \frac{F_i K_f Y_f T_{ki}}{K_o \Phi_o} = \frac{25 \cdot 2.5 \cdot 240 \cdot 865.336}{0.7 \cdot 1676.16} = 11062.74 \text{ грн.}$$

Базове:

$$C_n = \sum_{i=1}^n \frac{F_i K_f Y_f T_{ki}}{K_o \Phi_o} = \frac{25 \cdot 2.5 \cdot 240 \cdot 8241.2762}{0.7 \cdot 5356.8} = 32967.22 \text{ грн.}$$

де i - номер операції технологічного процесу;

n - кількість операцій технологічного процесу;

F_i - площа будівлі, яку займає устаткування, m^2 ;

K_f - коефіцієнт, який враховує додаткову площу;

Y_f - річні витрати на утримання $1m^2$ площі будівлі, грн.

Таблиця 7.2 - Порівняння технологічної собівартості виробу.

Стаття витрат	Сума витрат, грн	
	Базова технологія	Нова технологія
Матеріали для нанесення покриття	4855539.43	5938282.63
Флюс	0	1339462.25
Електроенергія	102054.031	95250.65
Заробітна плата	1154932.45	121268.2
Амортизаційні відрахування по устаткуванню	4895.63	30422.52
Поточний ремонт та технічне обслуговування	1631.88	10140.84
Утриманням та амортизація площі будівлі	32967.22	11062.74
Всього	6152020.63	6206502.57

					ЗП 81.04.0000.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

7.2 Визначення економічної ефективності проектного рішення

Для визначення Кпит - питомих капітальних вкладень використовуємо формулу:

Нове:

$$K_{num} = \sum_{i=1}^n \frac{B'_{oi} T_{ki}}{K_e \phi_o} = \frac{461750 \cdot 865.336}{0.7 \cdot 1676.16} = 340547.87 \text{ грн.}$$

Базове:

$$K_{num} = \sum_{i=1}^n \frac{B'_{oi} T_{ki}}{K_e \phi_o} = \frac{201600 \cdot 8241.2762}{0.7 \cdot 5356.8} = 443079.37 \text{ грн.}$$

де B'_{oi} - це сума балансової вартості устаткування;

B_{oi} - технологічної оснастки;

B_{oai} - площі будівлі, яку займає устаткування на i -й операції, грн.

Нове:

$$B'_{oi} = B_{oi} + B_{oai} + F_i K_f C_m = 275000 + 5500 + 25 \cdot 2.5 \cdot 2900 = 461750 \text{ грн.}$$

Базове:

$$B'_{oi} = B_{oi} + B_{oai} + F_i K_f C_m = 14850 + 5500 + 25 \cdot 2.5 \cdot 2900 = 201600 \text{ грн.}$$

де C_m - ціна 1 м² виробничої площі, грн.

Величина економії зведених витрат за порівнювальними варіантами технологічного процесу характеризує економічний ефект від реалізації кращого з них.

Річну економію поточних витрат $E_{пв}$ визначимо за формулою:

$$E_{пв} = c_{питб} \cdot A_p - C_{питн} \cdot A_p = 6152020.625 \cdot 2 - 6206502.565 \cdot 8 = -37347979.27 \text{ грн.}$$

					ЗП 81.04.0000.000.ПЗ	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 7.3 - Техніко-економічні показники.

Показник, одиниця виміру	Базова технологія	Нова технологія
Собівартість одиниці продукції, грн	6152020.625	6206502.565
Питомі капіталовкладення, грн/од	443079.365	340547.866
Річний випуск продукції, од	2	8
Річна економія поточних витрат, грн	-37347979.27	

Зробивши всі розрахунки по визначенню технологічної собівартості двох процесів та порівнявши їх, бачимо що нова технологія де застосованно автоматизацію та наплавлення стрічкою має більші затрати, що з економічної точки не вигідно, але ця технологія дозволяє випускати більше продукції що дозволяє нам отримувати більший прибуток, та також за той час поки базова технологія зробить обсяг тих робіт що робить нова технологія, прогрес може пійти далі, та автоматизація може стати дешевшою і тоді завдяки автоматизації ми зможемо виконувати ще більший обсяг робіт зі зменшеними витратами.

					ЗП 81.04.0000.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

ВИСНОВКИ

В цій дипломній роботі ми розглядали технології наплавлення корпусу атомного реактора.

Було розглянуто: будова реактора, матеріали що застосовуються для виготовлення та наплавлення КР, порівняння двох технологій наплавлення, їх якісні та економічні параметри, була розроблена охорона праці для запропонованого технологічного процесу, розглянуто апарат для виконання наплавочних робіт АД-231.

При розборі технологій також розглядали вплив ширини стрічки, температури попереднього підігріву, залежність структури після відпуску від температури та часу витримки.

В економічному розділі було порівняно економічна доцільність технологічних методів нанесення покриття саме для виготовлення корпусу атомного реактора. Базова технологія наплавлення вручну електродом показує більшу економічну вигоду на од. продукту, але при цьому сильно страждає швидкість виготовлення, це призводить до того що на одну од. Ми витрачаємо стільки часу, за який змогли б зробити та продати 2 КР.

					ЗП 81.04.0000.000.ПЗ	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Трофименко О. П. Сравнительный анализ экологического воздействия атомных и тепловых станций. - К. : Научный центр "Институт ядерных исследований" НАН Украины и Госкоматома Украины.
https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/29/018/29018605.pdf

2. Корпус сварной 1152.02.70.000. Дополнение к паспорту сосуда, работающего под давлением 1152.02.70.000 Д7. - ЗАЭС бл. 1., 1982.

3. Совершенствование качества сварных соединений и наплавленных поверхностей оборудования АЭУ производства ОАО «Ижорские заводы» : Материалы конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР» - СПб. : ОКБ «Гидропресс». Титова Т.И. Шульган Н.А., 2013.
<http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2013/autorun/article95ru.htm>

4. Iradj. Cladding Effects on Structural Integrity of Nuclear Components. SKI Report 2006:23, ISSN 1104-1374, ISRN SKI-R-06/23-SE /Sattari-Far, Magnus, Andersson - 2006.

5. Evaluation of Weld Residual Stress near the Cladding and J-weld in Reactor Pressure Vessel Head for the assessment of PWSCC Behavior. / Katsuyama, J., Udagawa, M., Nishikawa, H. et al. - Japan Society of Maintenology. E-Journal of Advanced Maintenance Т.2, 2010. 50–64 с.

6. Evaluation of Cladding Residual Stresses in Clad Blocks by Measurements and Numerical Simulations. / Dupas, P., Moinereau, D. - J. de Physique IV Colloque, 6, - 1996. 187–196с.

7. Рябцев И.А. Теория и практика наплавочных работ / Рябцев И.А., Сенченков И.К. - К. : Екотехнологія, 2013.

8. Система ультразвукового контроля металла корпуса реактора АЭС «Куданкулам» : Материалы конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР» - Подольск : ОКБ «Гидропресс». Цвитанович М., Пострузин Ж., Мунк Р. [и др], 2011.

<http://www.gid-ropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2011/documents/mntk2011-1>

					ЗП 81.04.0000.000.ПЗ	Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

84.pdf

9. Марголин Б.З. Определение остаточных напряжений в корпусах реакторов ВВЭР после многопроходной сварки, наплавки и высокотемпературного отпуска. Автоматическая сварка 10, / Марголин Б.З., Варовин А.Я., Костылев В.И., 2005. - 630 16–22 с.

10. Заготовки из стали марок 15X2НМФА и 15X2НМФА-А для корпусов и крышек и других узлов реакторных установок : ТУ 108-765-78

11. Determination of residual stress and strain fields caused by cladding and tempering of reactor pressure vessels. / Kostylev, V.I., Margolin, B.Z. - International J. of Pressure Vessels and Piping, 77, - 2000. 723–735 с.

12. Влияние сварочного цикла охлаждения на структурно-фазовый состав стали 15X2НМФА. Автоматическая сварка, 9, / [Махненко О.В., Костин В.А., Жуков В.В., Костеневич Е.С.] - 2019. - 14–25 с.

13. Свариваемость сталей. / Гривняк И. под ред. Макаров Э.Л. [пер. со словац. Л.С. Гончаренко] -М. : Машиностроение, 1984.

14. Расчетные модели для оценки механических свойств металла ЗТВ при сварке низколегированных сталей : Сб. тр. межд. конф. «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах» - К. : Касаткин О.Г., Зайффарт П., 2002. 103–106 с.

15. Математическое моделирование зависимостей состав-свойства сварных соединений и создание расчетно-экспериментальной системы для оптимизации основных технологических факторов сварки низколегированных конструкционных сталей / Касаткин О.Г., Автореф. дис....д-ра техн. наук. - К. : ИЭС им. Е.О. Патона., 1990.

16. Forecasting of structural transformations in heat affected zone steel of 15KH2NMFA at anti-corrosion cladding. / Lobanov, L.M., Kostin, V.A., Makhnenko, O.V. et al. Problems of Atomic Science and Technology, - 2020. - 89–96 с.

17. Влияние химического состава и структурных параметров сталей корпусов реакторов ВВЭР на склонность к охрупчиванию, обусловленному

					ЗП 81.04.0000.000.ПЗ	Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

образованием зернограницных сегрегаций, в том числе, в условиях, характерных для длительной эксплуатации энергетических установок : Материалы 7-й межд. науч.-техн. конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». -Подольск : ОКБ «Гидропресс». Гурович Б.А., Кулешова Е.А., Федотова С.В., 2011. <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2011/autorun/article151-ru.htm>

18. CCT diagram plotting based on the numerical analysis of dilatometric tests results. / Teplukhina, I.V., Golod, V.M., Tsvetkov, A.S. - Letters on Materials, - 2018. 37–41 с.

19. Махненко В.И. Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций. / Махненко В.И. - К. : Наукова думка, - 1976.

20. Махненко В.И. Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций. / Махненко В.И. - К. : Наукова думка, - 2006.

21. Betton, J. Creep Mechanics. 3-rd ed. Springer / Betton, J. - Germany, - 2008. XVI.

22. ДСТУ EN ISO 17637:2017(EN ISO 17637:2016, IDT; ISO 17637:2016, IDT)Неруйнівний контроль зварних швів. Візуальний контроль з'єднань, виконаних зварюванням плавленням.

23. ДСТУ EN ISO 17640:2018 (EN ISO 17640:2017, IDT; ISO 17640:2017, IDT)Неруйнівний контроль зварних швів. Ультразвуковий контроль. Методи, рівні контролювання та оцінювання.

24. НПАОП 28.52-1.31-13. Правила охорони праці під час зварювання металів.

25. Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу № 0472-14.

26. ДНАОП 0.00-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів.

27. ДНАОП 0.00-1.32-01. Правила будови електроустановок.

					ЗП 81.04.0000.000.ПЗ	Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Електрообладнання спеціальних установок.

28. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування.

29. ДСТУ 2456-94. Зварювання дугове і електрошлакове. Вимоги безпеки.

30. ДБН В.2.2-28:2010. Будинки адміністративного та побутового призначення.

31. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010. Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі.

32. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку.

33. ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації.

34. ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення.

35. НАПБ Б.03.002-2007. Визначення категорії приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою.

					ЗП 81.04.0000.000.ПЗ	Арк.
						69
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		