

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Фізико-технічний, інженерно-фізичний
(повне найменування інституту, назва факультету)

Обладнання та технології зварювального виробництва
(повна назва кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проекту (роботи)

магістр

(ступінь вищої освіти (освітній ступінь))

на тему «Розробка технологічного процесу виготовлення зовнішнього корпусу камери згоряння стенду для випробувань ГТД способом адитивного електродугового вирощування»

Виконав: студент курсу, групи ІФ-318м

Спеціальності 131 Прикладна механіка,

Освітня програма (спеціалізація)

Технології та устаткування зварювання

Моложков А. Є.

(прізвище та ініціали)

Керівник Куликовський Р. А.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(прізвище та ініціали)

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

Інститут, факультет Фізико-технічний, інженерно-фізичний

Кафедра Обладнання та технології зварювального виробництва

Ступінь вищої освіти магістр

Спеціальність «Технології та устаткування зварювання»
 (код і найменування)

Освітня програма (спеціалізація) 131 „Прикладна механіка“
 (назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри проф.

Овчаренко О.В.
 «6» 12 2019 року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА

Моложкова Денис Євгенович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Розробка технологічного процесу виготовлення зовнішнього корпусу камери згорання стеною для виготовлення ГТА способом адитивного електродугового виробництва

керівник проекту (роботи) Куликівський Руслан Анатолійович

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від « » 20 року №

2. Строк подання студентом проекту (роботи)

3. Вихідні дані до проекту (роботи): ескіз зовнішнього корпусу камери згорання;
матеріал ЗП609-Ш (07Х12НМБФ-Ш).

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): 1. Формулювання завдання на проведення дослідження 2. Аналіз літературних джерел 3. Методика розробки термічної симуляції 4. Підтвердження результатів термічної симуляції 5. Технологічний процес виготовлення зовнішнього корпусу камери згорання 6. Техніко-економічний розрахунок 7. Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях.

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

1. Зовнішній корпус камери згорання 2. Етапи виробництва зовнішнього корпусу камери згорання за технологією WAAM 3. Параметри та особливості режиму виготовлення зовнішнього корпусу камери згорання за технологією WAAM. 4. Результати термічної симуляції процесу виготовлення зовнішнього корпусу камери згорання за технологією WAAM 5. Схема оформлення програмування робота для виготовлення зовнішнього корпусу камери згорання за технологією WAAM 6. Установки для виготовлення зовнішнього корпусу камери згорання за технологією WAAM. 7. Анімація з виготовлення зовнішнього корпусу камери згорання. 8. Різаними ефективності та результативності.

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1	доц. Куріковський Р.А.	02.09.19	23.09.19
2	доц. Куріковський Р.А.	24.09.19	14.10.19
3	доц. Куріковський Р.А.	15.10.19	22.10.19
4	доц. Куріковський Р.А.	22.10.19	29.10.19
5	доц. Куріковський Р.А.	29.10.19	7.11.19
6	доц. Кришківська В.В.	10.09.19	26.11.19
7	доц. Нестєров О.В.		

7. Дата видачі завдання « 01 » жовтня 2019 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1.	Аналіз літературних джерел	02.09.19 - 23.09.19	Виконав
2.	Методика розробки термічної симуляції	24.09.19 - 14.10.19	Виконав
3.	Проведення експериментів	15.10.19 - 22.10.19	Виконав
4.	Обробка результатів та підтвердження симуляції	22.10.19 - 29.10.19	Виконав
5.	Проведення термічної симуляції процесу виготовлення зовнішнього корпусу камери згорання	29.10.19 - 7.11.19	Виконав
6.	Розробка технологічного процесу виготовлення зовнішнього корпусу камери згорання	8.11.19 - 12.11.19	Виконав
7.	Техніко-економічний розрахунок	13.11.19 - 20.11.19	Виконав
8.	Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях	21.11.19 - 24.11.19	Виконав
9.	Графічна частина	25.11.19 - 29.11.19	Виконав

Студент


(підпис)

Моложков Д.Є.
(прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи)


(підпис)

Куріковський Р.А.
(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 142 с., 34 табл., 41 рис., 2 дод., 36 джерел.

АДИТИВНЕ ЕЛЕКТРОДУГОВЕ ВИРОЩУВАННЯ, КАМЕРА ЗГОРЯННЯ, КІНЦЕВИЙ ЕЛЕМЕНТ, РОБОТ, СИМУЛЯЦІЯ, ТЕРМОГРАФІЯ

Об'єкт дослідження – цикл нагріву-охолодження шарів при адитивному електродуговому вирощуванні на базі процесу GMAW.

Мета проекту – розробити алгоритм проведення термічної симуляції технології адитивного виробництва з використанням плавких електродів у середовищі захисних газів з метою дослідження циклу нагріву-охолодження при виготовленні даним методом зовнішнього корпусу камери згоряння випробувального стенду ГТД.

Методи дослідження – моделювання процесу адитивного виробництва з використанням плавких електродів у середовищі захисних газів та проведення термічного аналізу з використанням експериментальних даних, отриманих раніше.

Розглянутий сучасний стан розробки симуляції процесу адитивного виробництва з використанням плавких електродів у середовищі захисних газів. Визначені основні вхідні дані для розробки термічного аналізу. Розглянуті можливі методи верифікації розробленої симуляції. Визначено основні технологічні параметри та розроблено технологічний процес виготовлення зовнішнього корпусу камери згоряння. Проведений термічний аналіз, обрані оптимальні режими, порядок нанесення шарів, стандартне обладнання. Розраховано час виготовлення та параметри механічної обробки. Проведено техніко-економічне обґрунтування доцільності використання технології для виготовлення зовнішнього корпусу камери згоряння. Передбачені заходи з охорони праці та цивільної оборони.

ABSTRACT

Explanatory note: 142 pages, 34 tables, 41 figures, 2 appendixes, 36 sources.

WIRE AND ARC ADDITIVE MANUFACTURING, COMBUSTION CHAMBER, FINITE ELEMENT, ROBOT, SIMULATION, THERMOGRAPHY

The object of research – heating-cooling cycle of a beads during Wire and Arc Additive Manufacturing based on GMAW.

The aim of the project is to develop an algorithm of thermal simulation of Wire and Arc Additive Manufacturing technology in order to investigate the heating-cooling cycle during manufacturing of the outer casing of a jet engine test bench combustion chamber.

The research methods used in this work are modeling of the Wire and Arc Additive Manufacturing and heat transfer analysis using previously obtained experimental data.

The present state of development of the Wire and Arc Additive Manufacturing simulation was studied. The basic input data for the development of thermal analysis are identified. Possible methods of verification of the developed simulation are studied. The basic technological parameters were determined and the technological process of manufacturing the outer casing of the combustion chamber was developed. Thermal analysis was implemented, deposition parameters, beads deposition sequence and equipment were selected. Manufacturing time and machining parameters were calculated. Technological and economic calculation and confirmation of the technology reasonability were carried out. Activities of safety rules and civil defense were developed.

ЗМІСТ

Перелік скорочень, умовних познач, одиниць і термінів	9
Вступ.....	10
1 Формулювання завдання на проведення дослідження.....	12
2 Аналіз літературних джерел.....	14
2.1 Технологія Wire and Arc Additive Manufacturing	14
2.2 Вплив швидкості наплавлення на економічну ефективність WAAM в порівнянні з механічною обробкою	16
2.3 Термічна симуляція процесу WAAM	20
2.4 Підтвердження термічної симуляції процесу WAAM	26
3 Методика розробки термічної симуляції	30
3.1 Матеріали. Термічні та механічні властивості	30
3.2 Визначення коефіцієнту емісивності	33
3.3 Експериментальні зразки	38
3.4 Створення моделі методом КЕ	41
3.5 Результати термічної симуляції.....	46
4 Підтвердження результатів термічної симуляції	48
5 Технологічний процес виготовлення зовнішнього корпусу камери згоряння.....	54
5.1 Призначення	54
5.2 Аналіз умов роботи.....	55
5.3 Аналіз матеріалу.....	55
5.4 Аналіз геометрії зовнішнього корпусу	57
5.5 Послідовність нанесення валиків	61
5.6 Параметри режиму WAAM.....	63
5.7 Термічна симуляція процесу вирощування зовнішнього корпусу камери згоряння.....	63
5.7.1 Створення CAD моделі.....	63

5.7.2	Термічна симуляція процесу виготовлення зовнішнього корпусу камери згоряння	65
5.7.3	Оптимізація процесу виготовлення зовнішнього корпусу	70
5.8	Обладнання для процесу WAAM	73
5.8.1	Робот	73
5.8.2	Позиціонер	75
5.8.3	Контролер	76
5.8.4	Центр обслуговування пальника	77
5.8.5	Джерело зварювального струму	79
5.8.6	Пальник	80
5.8.7	Механізм подачі дроту	81
5.9	Створення програми робота	83
5.10	Контроль якості	84
5.11	Механічна обробка виробу	84
5.11.1	Токарна обробка виробу, виготовленого методом WAAM	84
5.11.2	Токарна обробка виробу, виготовленого зі злитку	88
5.11.3	Обладнання для механічної обробки	91
6	Техніко-економічний розрахунок	93
6.1	Адитивне виробництво з точки зору маркетингу	93
6.2	Технічне нормування операцій	96
6.2.1	Норма часу на наплавлення	96
6.2.2	Норма часу на механічну обробку	98
6.3	Виробнича програма та її матеріальне забезпечення	100
6.4	Розрахунок кількості обладнання та площі ділянки	101
6.5	Розрахунок кількості персоналу ділянки	104
6.6	Фонд оплати праці	106
6.7	Розрахунок собівартості робіт	109
6.7.1	Прямі витрати	110
6.7.2	Непрямі витрати	110
6.8	Економічне обґрунтування виготовлення виробу методом WAAM	113

6.8.1	Розрахунок економічного ефекту.....	113
6.9	Розрахунок і планування ділянки	116
7	Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях.....	117
7.1	Аналіз потенційних небезпек	117
7.2	Заходи по забезпеченню безпеки	119
7.3	Заходи по забезпеченню виробничої санітарії та гігієни праці	128
7.4	Заходи по забезпеченню безпеки у надзвичайних ситуаціях.....	130
7.4.1	Заходи з пожежної безпеки	130
7.4.2	Правила проведення евакуаційних заходів при вибуху вибухових речовин.....	132
	Висновки	135
	Перелік джерел посилання	136
	Додаток А Установка для виготовлення зовнішнього корпусу камери згоряння за технологією WAAM.....	140
	Додаток Б Маршрутна карта технологічного процесу виготовлення зовнішнього корпусу камери згоряння.....	141

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАК, ОДИНИЦЬ І ТЕРМІНІВ

АТ – адитивні технології.

ІЧ – інфра-червоний.

КЕ – кінцевий елемент.

НК – неруйнівний контроль.

AWI – зварювальний інтерфейс Abaqus (Abaqus Welding Interface).

CAD – система автоматизованого проектування (Computer-Aided Design).

CAE – система інженерного аналізу (Computer-Aided Engineering).

CAM – система автоматизованого виробництва (Computer-Aided Manufacturing).

GMAW – дугове зварювання в захисних газах (Gas Metal Arc Welding).

GTAW – дугове зварювання неплавким електродом в захисній атмосфері інертного газу (Gas Tungsten Arc Welding).

PAW – плазмове зварювання (Plasma Arc Welding).

WAAM - адитивне виробництво методом дугового зварювання (Wire and Arc Additive Manufacturing).

ВСТУП

На сьогоднішній день адитивні технології (АТ) стають все більш популярними в виробництві для швидкого прототипування нових продуктів, замінюючи традиційні методи виробництва, при яких матеріал пошарово видаляється. Серед багатьох АТ можна виділити кілька технологій, які використовують дріт в якості сировини для виробництва виробів замість порошку. Використання дроту дозволяє підвищити швидкість нанесення матеріалу, знизити витрати на сировину, спростити і знизити вартість обладнання, призначеного для подачі присадного матеріалу. Існує три основних напрямки, в яких використовується дріт і які відрізняються способом плавлення матеріалу. Джерелами тепла можуть бути електронний промінь, лазер і електрична дуга. Серед всіх АТ Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM), або дрово-дугове адитивне виробництво є найбільш зручним для виробництва великогабаритних компонентів через високу швидкість нанесення матеріалу, ефективне використання матеріалу, доступність обладнання та нешкідливість для навколишнього середовища.

WAAM - це АТ, яка використовує електричну дугу для плавлення металевого дроту. Дріт наноситься пошарово роботизованим маніпулятором відповідно до тривимірної комп'ютерної моделі, в результаті чого виходить виріб, що дуже близький за формою до спроектованої деталі і потребує лише мінімальної механічної обробки. WAAM може базуватися на різних методах дугового зварювання: зварювання електродом, що плавиться в середовищі захисних газів (GMAW), зварювання неплавким електродом в середовищі захисних газів (GTAW), плазмове зварювання (PAW). Дана робота спрямована на дослідження методу, що заснований на принципах процесу GMAW.

Як і будь-який зварювальний процес WAAM характеризується великим тепловнесенням під час нанесення металу, що викликає великий градієнт температур, результатом чого є залишкові напруги і змінення геометрії виробу.

Також, оскільки розсіювання тепла з ростом виробу знижується, зростає акумуляція тепла, що викликає пороутворення і може привести до колапсу об'єкта, що виготовляється. Ґрунтуючись на цьому, можна зробити висновок, що температурні умови значно впливають на характеристики фінального виробу, такі як геометрична точність, механічні властивості і ефективність використання матеріалу.

Для забезпечення необхідних характеристик створюваних деталей температура повинна бути контрольована у достатній мірі. Для утримання міжпрохідної температури на певному рівні і постійною для всіх проходів важливо визначити міжпрохідний час, який робот повинен чекати перед тим, як почати нанесення наступного валика і шару.

Для того, щоб мати краще розуміння теплових процесів WAAM за допомогою програмного забезпечення Abaqus CAE була розроблена модель кінцевих елементів (KE). Зварювальний інтерфейс (AWI) у вигляді плагіну Abaqus був використаний для підготовки робочого файлу. За допомогою AWI була налаштована геометрія валика, що наноситься, траєкторія руху пальника, характеристики джерела тепла і алгоритм активації елементів.

В даному дослідженні був проведений термічний аналіз процесу пошарового нанесення матеріалу з використанням низьковуглецевого сталевого дроту. Підтвердження термічної симуляції було здійснено методами інфрачервоної (ІЧ) термографії. В якості системи переміщення пальника була використана роботизована одиниця CLOOS QRC320H з джерелом живлення CLOOS QINEO PULSE 450.

Аналіз результатів підтвердженої термічної симуляції процесу WAAM показав, що граничні умови, такі як теплопровідність між виробом і столом позиціонера, конвекція і радіація в навколишній простір мають найбільший вплив на точність кінцевого виробу.

1 ФОРМУЛЮВАННЯ ЗАВДАННЯ НА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

WAAM є активно досліджуваною технологією, яка має великі перспективи у виробництві середньо- і великогабаритних виробів. Можливість робити об'єкти практично не обмежених розмірів привертає інженерів аерокосмічної, автомобілебудівної галузей, цивільного будівництва та ін. Незважаючи на всі переваги дана технологія не так широко поширена, як могла б бути. Причиною цього є деякі недоліки і обмеження, які можуть вплинути на якість фінальної деталі. Випуклості і провали є дефектами, пов'язаними з траєкторією руху пальника і, в більшості випадків, виникають в перетинах. Розмір і кількість даних дефектів може бути знижено шляхом зміни шляху руху інструменту. Іншим питанням WAAM є пори і порожнечі, які зазвичай виникають в товстостінних виробах. Для усунення цього дефекту була розроблена спеціальна стратегія генерування руху пальника [1].

Так як технологія WAAM заснована на дуговому зварюванні, то також мають місце питання, характерні для зварювання. Залишкові напруги і деформації часто представлені у виробах, виготовлених технологією WAAM. Залишкові напруги виникають в матеріалі під час його трансформації з рідкого стану в твердий так само, як і під час зварювання. В результаті нагрівання тіла виробу електричною дугою виникає температурне розширення матеріалу. Під час кристалізації нанесеного валика одні області охолоджуються інтенсивніше інших, а значить і стискаються інтенсивніше, утворюючи залишкові напруги.

Процес циклічного нагрівання та охолодження, який супроводжує WAAM, робить залишкові напруги постійною проблемою, яку вчені намагаються вирішити, змінюючи стратегію нанесення і конфігурацію виробу, а також змінюючи параметри джерела живлення і міжпрохідний час.

На додаток до питань, описаних вище, існують і інші проблеми. Так, тепло, отримане під час нанесення матеріалу, за допомогою теплопровідності переноситься від басейну рідкого металу до тіла виробу, підкладки та столу і

акумулюється в них. З ростом деталі тепловий потік крізь неї зменшується, що призводить до підвищення міжпрохідної температури і розміру басейну розплавленого металу [2].

Ключем до стабільного формування валика, стабільної дуги і поведінки перенесення металу є міжпрохідна температура. Її можна контролювати, змінюючи час очікування між проходами, змінюючи швидкість охолодження застосовуючи активне охолодження або попередній і супутній підігрів для досягнення низького температурного градієнта під час нанесення матеріалу.

Головною метою даної роботи є дослідження циклу нагріву-охолодження під час WAAM. Для дослідження і наступної оптимізації міжпрохідної температури повинна бути проведена термічна симуляція. Для цього за допомогою програмного забезпечення Abaqus CAE була розроблена модель KE. У результаті симуляції процесу WAAM буде передбачено температуру виробу у процесі наплавлення, що дасть можливість впровадити оптимальний час охолодження між проходами.

2 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

2.1 Технологія Wire and Arc Additive Manufacturing

WAAM – це адитивна технологія виготовлення великогабаритних металевих виробів, яка використовує процес дугового зварювання для пошарового виготовлення металевих деталей. Хоча WAAM є однією з найменш досліджених адитивних металевих технологій, воно пропонує життєздатну альтернативу традиційному виробництву з широким спектром можливостей використання в різних галузях, таких як аерокосмічна, морська, автомобільна та архітектура.

На відміну від більш поширених процесів адитивного виробництва з металевим порошком, WAAM працює шляхом плавлення металевого дроту, використовуючи електричну дугу як джерело тепла. Розплавлений дріт наноситься на підкладку у формі валиків, які, сплавляючись, формують шар металу. Процес повторюється, шар за шаром, поки об'єкт не буде завершений.

WAAM пропонує ряд переваг, які потенціально можуть покращити адитивне металеве виробництво у різних галузях. Серед них:

- можливість створення великогабаритних об'єктів складної форми, створення яких традиційними методами вимагає більших витрат або взагалі неможливе. Чудовим прикладом комплексного великогабаритного виробу є пішохідний міст, виготовлений нідерландською компанією MX3D із застосуванням технології WAAM (рисунок 2.1). Даний міст має довжину 12 м і демонструє необмеженість габаритів виробів і потенціал технології в сфері цивільного будівництва;

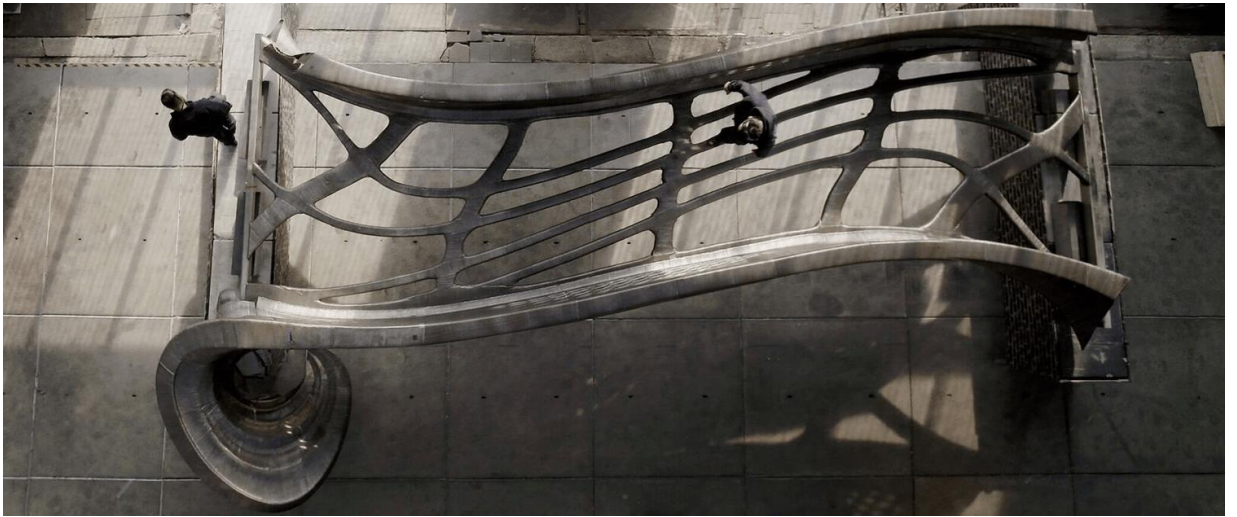


Рисунок 2.1 - Пішохідний міст, виготовлений компанією MX3D з застосуванням технології WAAM

- скорочення кількості етапів виробництва, прототипування і виготовлення одиничних виробів без використання додаткових технологічних етапів, таких як виготовлення форм для лиття, виготовлення штампів та інше;
- скорочення виробничих витрат і можливість зміни продукції без додаткових витрат в результаті використання універсального устаткування;
- можливість використання WAAM для відновлювальних операцій. Це може значно знизити кількість витрат, пов'язаних з виготовленням нових деталей. Технологія WAAM дозволяє проводити місцеве відновлення;
- адитивне виробництво має максимальний коефіцієнт корисного використання матеріалу (зменшений об'єм відходів під час механічної обробки) та зменшений час від початку виробництва до виходу на ринок;
- відкрита архітектура. Кінцевий користувач може поєднувати потенційно будь-яку марку джерела живлення та робота, зберігаючи повний контроль над обладнанням;

- матеріали, що використовуються, та їх вартість. Зварювальний дріт – це відносно недорога форма сировини. Сталь коштує від 50 грн/кг до 450 грн/кг (залежно від діаметра дроту та складу сплаву), алюміній від 180 грн/кг до 2800 грн/кг (залежно від діаметра дроту та складу сплаву) та Ti-6Al-4V між 2800 грн/кг і 7500 грн/кг (залежно від діаметра дроту та складу сплаву) [3]. Крім того, дріт дозволяє уникнути багатьох проблем, пов'язаних з порошками, такими як контроль розміру частинок або їх розподіл при додаванні нового шару, які впливають на продуктивність процесу. Нарешті, в місці наплавлення дріт повністю розплавляється і стає частиною кінцевої структури, а ймовірність забруднення низька порівняно з порошком.

2.2 Вплив швидкості наплавлення на економічну ефективність WAAM в порівнянні з механічною обробкою

Економічна ефективність є одним з перших параметрів, що розглядаються при впровадженні нової технології. В даній роботі пропонується технологія WAAM як альтернатива традиційному методу виробництва. При традиційному методі виготовлення поковка або злиток обробляються до остаточної форми точінням, фрезеруванням та іншими методами механічної обробки. Згідно Аллена [4], у випадку використання кованої заготовки для вдалого виготовлення виробу методом кування потрібно мати мінімальну товщину перерізу від 25 до 30 мм. Якби товщина була менше, збільшення швидкості охолодження призвело б до температур, які були б занадто низькими для формування заготовки. Крім того, потрібно врахувати додатковий матеріал, який дозволяє розмістити в ньому поверхневі напруги і оксидні шари і зазвичай розрахункові допуски становлять приблизно 5-10 мм. Для деяких компонентів в галузі авіабудування, наприклад

складні фланці та воздуховоди, великий блиск (моноколесо) або нервюри крила, співвідношення Buy-To-Fly (BTF) складає 10 або більше, що є неприйнятним. Коефіцієнт BTF визначається як відношення об'єму або маси заготовки (V_i) до об'єму або маси готової продукції (V_f):

$$BTF = \frac{V_i}{V_f} \quad (2.1)$$

Співвідношення BTF залежить від того, наскільки близька форма поковок або злитків до форми готового виробу. У той час як компоненти авіаційних двигунів виготовляються з кованих заготовок, більшість аерокомпонентів буде оброблятися зі стандартної прямокутної заготовки, вирізаної з прокату, що також характеризує погане використання матеріалу.

Коефіцієнт BTF для зовнішнього корпусу камери згоряння при виготовленні за технологією WAAM складає:

$$BTF = \frac{3606718.17}{2358046.61} = 1.53 \quad (2.2)$$

Коефіцієнт BTF для виробу, що виготовляється зі злитку у формі кільця, складає:

$$BTF = \frac{7464718.67}{2358046.61} = 3.17 \quad (2.3)$$

З цього можна зробити висновок, що технологія WAAM дозволяє підвищити ефективність використання матеріалу. При цьому знижується кількість матеріалу, що перетворюється на стружку.

Мартіна та ін. з Кренфілдського університету провели дослідження та розробили методику розрахунку економічної доцільності використання технології WAAM у порівнянні з виготовленням зі злитку механічною обробкою [5]. Використовуючи вартість обладнання, матеріалів, погодинну вартість

використання комплексів WAAM та механічної обробки, та такі данні технологічного процесу, як кількість нанесеного матеріалу за одиницю часу та кількість знятого матеріалу за одиницю часу, а також об'єми виробів до та після обробки можливо розрахувати вартість виготовлення. Остаточна формула показує відношення вартості деталі, виготовленої методом WAAM до вартості деталі, виготовленої зі злитку або поковки:

$$C_{\%} = \frac{C^{AM}}{C^M} \cdot 100\% \quad (2.4)$$

де

$$\begin{aligned} C^{AM} &= C_S + C_i^{AM} + C_m^{AM} = V_s p c_F + p(V_f BTF^{AM} - V_s) \times \\ &\times \left(c_W + \frac{SS \times HR^{AM}}{DR} \right) + \frac{V_f (BTF^{AM} - 1)p}{MRR} HR^M = \\ &= p \left[V_s c_F + (V_f BTF^{AM} - V_s) \left(c_W + \frac{SS \times HR^{AM}}{DR} \right) + \frac{V_f (BTF^{AM} - 1)}{MRR} HR^M \right] \end{aligned} \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned} C^M &= C_i^M + C_m^M = V_f BTF^M p c_F + \frac{(V_i^M - V_f)p}{MRR} HR^M = \\ &= p \left[V_f BTF^M c_F + \frac{(V_i^M - V_f)}{MRR} HR^M \right] \end{aligned} \quad (2.6)$$

При вартості матеріалу 330 грн/кг, коефіцієнтах BTF, розрахованих вище, та інших вартостях, вказаних в роботі [5] для зовнішнього корпусу камери згоряння випробувального стенду ГТД було отримано залежність економічної ефективності WAAM від швидкості наплавлення в порівнянні з механічною обробкою (рисунок 2.2). Позначення, використані в формулах, наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Позначення, використані у розрахунках

Позначення	Назва	Розмірність
Вартість		
C^M	Остаточна вартість деталі, виготовленої зі злитку або поковки	грн
C^{AM}	Остаточна вартість деталі, виготовленої методом WAAM	грн
C_i^M	Вартість злитку для механічної обробки	грн
C_i^{AM}	Вартість необробленої деталі, виготовленої методом WAAM	грн
C_m^M	Вартість механічної обробки злитку або поковки	грн
C_m^{AM}	Вартість механічної обробки деталі, виготовленої методом WAAM	грн
C_S	Вартість підкладки	грн
Питома вартість		
C_F	Вартість матеріалу у формі злитку	грн/кг
C_W	Вартість матеріалу у формі дроту	грн/кг
HR^M	Почасова вартість механообробного комплексу	грн/кг
HR^{AM}	Почасова вартість комплексу з адитивного виробництва	грн/кг
Об'єм		
V_f	Об'єм фінальної деталі	м ³
V_i^M	Об'єм початкового злитку або поковки	м ³
V_i^{AM}	Об'єм, нанесений методом WAAM	м ³
V_S	Об'єм початкової підкладки	м ³
Час		
t^{AM}	Час для механічної обробки надрукованого виробу	год
t^D	Час друку виробу методом WAAM	год
t^M	Час для механічної обробки виробу зі злитку або поковки	год
Інші позначення		
p	Щільність	кг/м ³
BTF^M	Співвідношення Buy-to-fly для виробу зі злитку або поковки	кг/кг
BTF^{AM}	Співвідношення Buy-to-fly для надрукованого виробу	кг/кг
DR	Швидкість нанесення матеріалу	кг/год
MRR	Швидкість видалення матеріалу	кг/год
SS	Старти і зупинки, міжпрохідне охолодження	

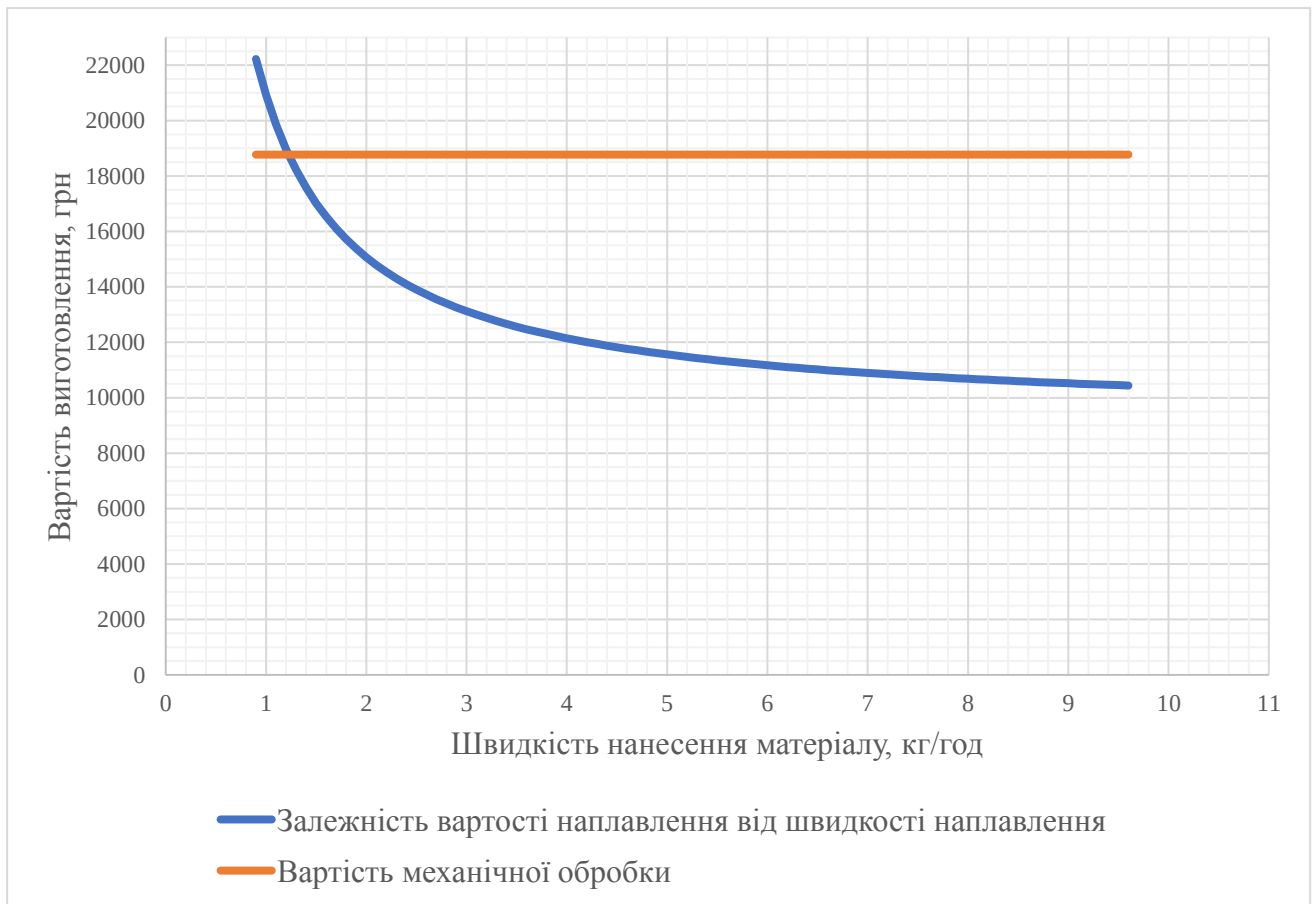


Рисунок 2.2 - Залежність вартості наплавлення від швидкості наплавлення

На графіку видно, що застосування WAAM тим вигідніше, чим більша швидкість нанесення матеріалу. Вартість механічної обробки дана для швидкості видалення матеріалу 14 кг/год.

2.3 Термічна симуляція процесу WAAM

Сьогодні комп'ютерна симуляція є хорошим інструментом для вивчення різних технологічних процесів. З ростом обчислювальної потужності сучасної техніки симуляція все частіше використовується в наукових дослідженнях різних ступенів складності.

На даний момент існує кілька програмних рішень, що дозволяють симулювати процес зварювання. Так як АТ, що використовують метал в якості основного матеріалу можуть бути прийняті як багатопрохідне зварювання, то можливо створити симуляцію адитивного процесу базуючись на вже готових рішеннях. У більшості випадків для симуляції дугового зварювання використовуються не спеціалізоване, а універсальне програмне забезпечення, засноване на методі КЕ. Такі програми мають широкий функціонал і дають можливість створення симуляції процесу WAAM різними шляхами. Однією з універсальних програм є Abaqus, що на даний момент розробляється французькою компанією Dassault Systemes.

Abaqus дозволяє здійснити декілька різних типів аналізів. Серед них аналіз теплопереносу, аналіз теплопереносу з подальшим термомеханічним аналізом і повністю пов'язаний термомеханічний аналіз.

У багатьох роботах [6] - [12], пов'язаних з симуляцією WAAM дослідники виконували послідовний термомеханічний аналіз. Такий тип аналізу зазвичай виконується з допущенням, що швидкість тепловиділення за рахунок енергії механічного розсіювання незначна при аналізі теплопередачі.

Послідовний термомеханічний аналіз виконується тоді, коли результат механічного аналізу (аналіз напружень) залежить від температурних полів, але зворотної залежності немає. Спочатку виконується термічний аналіз, потім розраховані температурні поля приймаються в аналізі напружень як ввідні дані.

У більшості випадків вивчення надрукованих об'єктів здійснюється шляхом КЕ. Для цього тіло моделі розбивається на елементи простої форми. Розміри елементів, на які розбивається деталь, прямо впливають на точність розрахунків. Чим менше розміри елемента, тим більше точність результатів симуляції. Варто врахувати, що зі зменшенням розмірів елементів збільшується їх кількість і кількість розрахунків, що веде до збільшення часу аналізу.

Багато вчених зацікавлені у скороченні часу розрахунку. Монтевечі та ін. [9] у своїх роботах розглядали можливість скорочення розрахункового часу за рахунок зменшення кількості КЕ, на які поділена модель, без введення значних

помилки в оцінку температурного поля. Основна ідея цього методу - змінити спосіб нанесення сітки. У цьому випадку модель ділиться на зони, які повинні бути розбиті на елементи незалежно один від одного, а потім з'єднані для досягнення монолітної поведінки тіла. У результаті деякі частини виробу можна розділити на більшою сіткою, завдяки чому можна значно зменшити кількість елементів, не впливаючи на результати аналізу.

Запропонований спосіб порівнювали з іншим методом зменшення кількості елементів. Метод зміщення сітки може збільшувати сітку лише в одному напрямку, на відміну від зонування сітки. Залежно від геометрії та розміру деталі зміщення сітки дозволяє досягти значного скорочення часу обчислювання відносно еталонного, коли все тіло деталі поділене елементами такого ж розміру, як і валик матеріалу, що наноситься. Монтевечі та ін. у своїх дослідженнях досягнули скорочення часу обчислення приблизно в 3 рази по відношенню до методу зміщення сітки. Ця різниця у часі пов'язана з меншим числом елементів у запропонованій моделі сітки, порівняно із зміщенням сітки. Внаслідок зменшення кількості елементів обидві стратегії зменшення кількості елементів мають помилки в оцінці температурного поля (нижче 5%). Модель зміщення сітки має дещо меншу помилку, ніж запропонована. Знову ж таки, ця різниця має місце через більшу кількість елементів, які використовуються для дискретизації в моделі зміщення сітки.

Окрім моделі об'єкта, що наплавляється, в аналізі теплопередачі також повинна бути присутня модель джерела тепла. Більшість робіт, пов'язаних з WAAM [8], [11], [13] - [15], використовують модель подвійного еліпсоїдального джерела тепла, впроваджене Голдаком та ін. [16]. Ця модель є найбільш близькою за геометрією розподілу тепла до фактичного нагріву під час GMAW процесу. У моделі Голдака внесення тепла генерується всередині об'єму тіла відповідно до розподілу Гаусса.

Монтевечі та ін. [9], [17] використовували у своїй роботі подвійну еліпсоїдну модель джерела тепла Голдака для опису передачі тепла до підкладки та валика. На додачу до подвійної еліпсоїдної моделі, внесене тепло було подане

на присадковий дріт розподілом постійної потужності. Розроблена система джерел тепла дозволила врахувати розподіл тепла між основою та присадкою. Результати аналізу із запропонованим процесом моделювання порівняли зі звичайною моделлю джерела тепла та даними, отриманими експериментально. Порівнюючи деформації, було підтверджено, що розроблена модель дозволяє більш точно моделювати процес WAAM порівняно зі звичайною моделлю джерела тепла.

Щоб уникнути моделювання граничних умов та симуляцію відкріплення виробу автори обмежували базову пластину за ізостатичною схемою під час процесу осадження. Для реалізації цієї схеми було використано три опорні точки. Це дозволяє імітувати лише фази наплавлення та охолодження, не включаючи відкріплення в аналіз. Ця методика була використана і в інших роботах цих авторів [17].

У деяких випадках параметрами джерела тепла можна знехтувати. Симунович та ін. у своїй роботі над великогабаритними об'єктами [12] дослідили два типи джерела тепла - точково-концентрована та розподілена об'ємна модель теплового потоку з напівеліпсоїдною моделлю джерела тепла. Вчені дійшли висновку, що параметри джерела тепла не мають великого впливу на розподіл тепла в об'ємі деталі при створенні великогабаритних об'єктів. Тому для прискорення розрахунків можна прийняти точкове джерело тепла.

Моделювання зварювання є складним процесом, і налаштування моделі може зайняти багато часу. З метою скорочення часу, необхідного для створення симуляції та зменшення вірогідності помилки під час налаштування для автоматизації процесу можуть бути використані різноманітні скрипти та плагіни.

З метою моделювання процесу зварювання розробниками з Dassault Systemes було створено AWI [10]. Він існує у формі плагіна до Abaqus CAE. Плагін забезпечує простий та ефективний підхід для налаштування всіх аспектів зварювальної моделі з інтерфейсу Abaqus CAE шляхом автоматизації більшості повторюваних та трудомістких завдань, що є частиною зварної моделі в традиційному середовищі CAE. Використовуючи зручне дерево моделі та кілька

діалогових вікон, можна створити послідовність проходів, створити відповідні етапи аналізу та конкретизувати навантаження та граничні умови для термічного аналізу та аналізу напружень.

Тепло, що надходить від зварювального пальника, представлене встановленим температурним наближенням. Вказана температура призначається як гранична умова на межі між раніше нанесеним елементом валику та підкладкою. Елемент активується лише після того, як пальник повністю пройшов цей кінцевий елемент. Температурні граничні умови встановлюються для періоду часу, необхідного для проходження пальником відповідного елемента. Запропоноване наближення під час моделювання процесу внесення тепла не використовує жодної з розроблених раніше моделей джерел тепла, таких як точкове джерело тепла або будь-які модифікації подвійних еліпсоїдних моделей. Профілем джерела тепла всередині зварного шва нехтують, оскільки форма і об'єм використовуваного джерела тепла дорівнює формі і об'єму елемента валика.

Відповідно до рівняння для аналізу переносу тепла [6]:

$$cT + k\dot{T} = ft \quad (2.7)$$

де c – матриця теплоємності;

k – матриця теплопровідності;

ft – вектор теплового навантаження;

T і $\dot{T}$ – температура певної точки та її похідна матриця часу відповідно.

З цього рівняння виходить головна перевага цього методу – відсутність необхідності використовувати термін теплового потоку для обчислення температур, оскільки вони вже встановлені. Також параметри зварювання, такі як струм зварювання та напруга дуги, не використовуються в аналізі. Це може спричинити певні труднощі у визначенні встановленої температури.

Селес та ін. у своїй роботі [6] дослідили встановлене температурне наближення та запропонували метод визначення встановленої величини

температури для передачі тепла та термомеханічного аналізу за допомогою AWI. Новий метод, який використовує встановлену температуру зварювання, може значно скоротити час обчислення при моделюванні великих об'єктів.

2.4 Підтвердження термічної симуляції процесу WAAM

Валідація створеної симуляції є важливою частиною будь-якого дослідження. Очевидним способом підтвердження результатів моделювання є порівняння їх з даними, отриманими в ході експерименту. У випадку моделювання процесу WAAM існує кілька шляхів підтвердження. Можна порівняти дані температури, отримані під час аналізу теплопередачі та виміряні під час наплавлення. Також популярним методом є порівняння даних про деформацію або залишкові напруження. Цей спосіб може бути застосований, коли під час моделювання проводився зв'язаний термомеханічний аналіз. У будь-якому випадку валідація аналізу теплопередачі має велике значення, оскільки його результати є вхідними даними для подальшого термомеханічного аналізу.

У багатьох дослідженнях, пов'язаних з моделюванням процесу WAAM, вчені проводили зв'язаний термомеханічний аналіз, валідація якого базувалася на геометричних параметрах експериментального зразка.

Два методи експериментальної валідації термомеханічної симуляції були використані Као та ін. в їх дослідженні [18]. Для вимірювання залишкових напружень було застосовано метод свердління отвору та метод нейтронної дифракції. Вимірені дані порівнювали з результатами моделювання. За допомогою методу свердління отвору можна отримати лише площинні напруги біля вільної поверхні. Цього методу було достатньо, щоб перевірити загальну правильність моделі, але недостатньо для повного підтвердження. Крім того, нейтронна дифракція була використана для вимірювання пружної деформації в поперечному перерізі підкладки, на 4 мм нижче верхньої поверхні. Усі значення пружної деформації збіглися з експериментальними даними.

Дінг та ін. також використали нейтронну дифракцію для перевірки залишкових напружень [8]. Але перед верифікацією залишкових напружень результати перехідного та стаціонарного термічних аналізів були перевірені порівнянням із даними, отриманими з чотирьох термопар. Також прогнози

спотворень були порівняні з результатами експериментів, отриманими за допомогою лазерного сканера. Ці три способи перевірки дозволили зменшити вірогідність помилок та підвищити точність кожного етапу моделювання.

Монтевечі та ін. у своїй роботі чисельно та експериментально підтвердили запропоновану раніше техніку дискретизації сітки моделі [9]. У цій роботі розроблена модель джерела тепла [17] була обрана замість широко використовуваної подвійної еліпсоїдної моделі, представленої Голдаком [16]. Експериментальна частина перевірки полягала в вимірюванні спотворень основної пластини до і після друку. Mitutoyo Euro Apex C776 СММ (координатна вимірювальна машина) була використана для зондування верхньої поверхні підкладної пластини.

Порівнюючи результати експериментального вимірювання та моделювання, вчені встановили, що кривизна поверхні досить схожа, з максимальною похибкою 0,16 мм у вертикальному напрямку. Ця помилка знаходиться у прийнятних межах відповідно до попередніх робіт, що стосуються моделювання WAAM [11], [19].

Метод зміщення поверхні був використаний Симунович та ін. для верифікації симуляції процесу друку великогабаритних об'єктів [12]. У їх дослідженні підкладка для друку одновимірного об'єкта була зафіксована асиметрично із зміщенням відносно поперечної осі. Це дозволило виміряти вертикальне зміщення підкладки у поздовжньому напрямку. Дані про рух, отримані в результаті такого експерименту, згодом можуть бути використані для підтвердження моделі, а також для вимірювання залишкових напружень. Також модель передачі тепла була підтверджена 20 термопарами. Збір даних здійснювався з частотою 1 Гц, що достатньо для термічної симуляції процесу WAAM.

Ще одна робота з комбінацією вимірювання зміщення та термопар була представлена Графом та ін. [13]. Було запропоновано калібрувати моделювання за допомогою термопар, редагуючи коефіцієнти взаємодії з навколишнім середовищем та контактуючими тілами.

У цьому дослідженні буде розроблений лише термічний аналіз, який вимагає лише вимірювання температури. ІЧ-термографія дає чудову можливість визначити розподіл температури на поверхні наплавленого об'єкта без контакту з ним. ІЧ візуалізація використовується при аналізі фізичної поведінки зварних швів під час зварювання [20] та металевих АТ [21] та при неруйнівному контролі (НК) зварних швів [22]. Ця технологія також широко використовується для оцінки зони термічного впливу та для контролю провару. ІЧ-термографія також використовується для дослідження процесів у термопластичних АТ. Важливо контролювати температуру під час екструзії та зварювання матеріалу, тому ІЧ-візуалізація може допомогти в цьому [23].

Для цієї роботи ІЧ-термографія представляє великий інтерес, оскільки вона може бути використана для верифікації процесу наплавлення. Для валідації чисельного моделювання вимірюване температурне поле буде порівняно з результатами термічної симуляції.

ІЧ-термографія заснована на законі Стефана-Больцмана:

$$ET = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (2.8)$$

де ET – інтенсивність випромінювання;

ε – емісивність поверхні предмета;

σ – константа Стефана-Больцмана;

T – термодинамічна температура поверхні.

Відповідно до формули ІЧ камера визначає реальну температуру поверхні за допомогою значення емісивності [24].

Емісивність визначається як відношення енергії, випромінюваної поверхнею матеріалу, до енергії, випромінюваної чорним тілом (тілом зі 100% випромінюванням) при тій же температурі та довжині хвилі та при однакових умовах спостереження. Це безрозмірне число від 0 (для ідеального відбивача) до 1 (для ідеального випромінювача). Поверхнева емісивність залежить від

матеріалу та якості поверхні (стану обробки поверхні). Випромінювання також залежить від температури поверхні, а також від довжини хвилі та кута погляду.

Для точного безконтактного вимірювання температури та для розрахунків теплопередачі необхідно визначити емісивність поверхні.

Існує кілька способів визначення значення емісивності поверхні. Для забезпечення високого значення емісивності поверхня може бути покрита чорною фарбою з високим коефіцієнтом випромінювання або іншим матеріалом, емісивність якого відома (наприклад, графітове покриття [25]). Для вимірювання емісивності покриття зразки можна дослідити за допомогою термографічної системи [25]. У випадку пошарової технології це дуже складно здійснити через високу температуру та через відсутність шарів під час друку. Іншою можливістю є використання спеціальної функції програмного забезпечення для камери, наприклад функція корекції нерівномірності. У цьому випадку гаряча пластина, виготовлена з необхідного матеріалу, і така сама гаряча пластина, покрита скляним листом, може бути використана для 2-точкового вимірювання зображення [23].

Оксиди, шлаки та інші включення у покритті мають великий вплив на значення коефіцієнта емісивності і можуть його збільшувати. У деяких випадках шляхом окислення можна досягти вищої емісивності поверхні [20]. Важливо забезпечити високу емісивність для металів, щоб зменшити похибку вимірювань.

Емісивність також залежить від кута погляду. Деякі матеріали, наприклад, більшість металів або скло, відбивають теплове випромінювання, як дзеркало. Відбиття теплового випромінювання від різних об'єктів може призвести до помилкових показань температури. Кут, під яким термокамера спрямована на об'єкт, слід правильно вибирати, щоб уникнути відбиття [26].

3 МЕТОДИКА РОЗРОБКИ ТЕРМІЧНОЇ СИМУЛЯЦІЇ

Термічна симуляція процесу WAAM є чудовим інструментом його дослідження. Підчас створення симуляції необхідно звернути увагу на властивості використовуваного матеріалу або матеріалів, стан і властивості поверхні та умови взаємодії об'єкту з навколишнім середовищем та іншими об'єктами. Для того, щоб дізнатися значення деяких з цих властивостей необхідно провести ряд експериментів. Проведені експерименти дозволять розробити алгоритм створення симуляції, який згодом може бути використаний у розробці технології виготовлення більш складних деталей.

3.1 Матеріали. Термічні та механічні властивості

Частина експериментів у цій роботі була проведена з використанням низьковуглецевої нелегованої конструкційної сталі. Матеріал цього типу має добру здатність до зварювання, широко розповсюджений та має невисоку відносну вартість, що дозволяє виробити велику кількість зразків і при цьому уникнути надмірних витрат.

Експерименти, проведені в цій роботі, були засновані на низьковуглецевому нелегованому дроті. Даний тип матеріалу має дуже хорошу зварюваність і може бути оброблений без будь-яких проблем. Цільний обміднений дріт G3Si1 для GMAW діаметром 1,2 мм було використано в якості присадного матеріалу. Завдяки хорошим механічним властивостям цей дріт дуже часто використовується в зварювальному виробництві. Низьковуглецева нелегована прокатана пластина зі сталі S235 товщиною 5 мм, шириною 30 мм і довжиною 250 мм була використана як підкладка. В даному дослідженні термічні і механічні властивості підкладки та наплавленого металу були прийняті

рівними. Хімічний склад і механічні властивості наплавленого металу показані в таблиці 3.1 і таблиці 3.2 відповідно.

Таблиця 3.1 - Хімічний склад дроту G3Si1 відповідно до ISO 14341-A

	C	Si	Mn	P	S
Мінімальний вміст, %	0.06	0.80	1.40	-	-
Максимальний вміст, %	0.14	1.00	1.60	0.025	0.025

Таблиця 3.2 - Механічні властивості металу шва відповідно до ISO 14341-A для захисного газу 80Ar/20CO₂ (M21)

Властивість	Межа плинності σ_T (МПа)	Межа міцності σ_B (МПа)	Подовження (%)	Шарпі V при -50°C (Дж)
Значення	490 ± 10	590 ± 10	27	90

Головна мета даного дослідження стоїть у тому, щоб отримати адекватні результати термічної симуляції. Для цього необхідно використати коректні значення властивостей матеріалу. Для проведення термічного аналізу необхідно визначити деякі термічні властивості матеріалу.

Базова термічна властивість це температура плавлення. Зварювальний дріт G3Si1 має температуру солідусу 1743 K (1470 °C) і температуру ліквідусу 1793 K (1520 °C) [27]. У цьому дослідженні було прийнято середнє значення температури плавлення 1500 °C.

Інші термічні властивості, які мають великий вплив на термічний аналіз це теплопровідність і теплоємність. Значення цих параметрів можуть бути визначені експериментально, розраховані за формулами або взяті з довідкових баз даних. У цій роботі значення теплопровідності і теплоємності, а також коефіцієнт температурного розширення для низьковуглецевої сталі S235 були розраховані за допомогою програми JMatPro (рисунок 3.1-3.3).

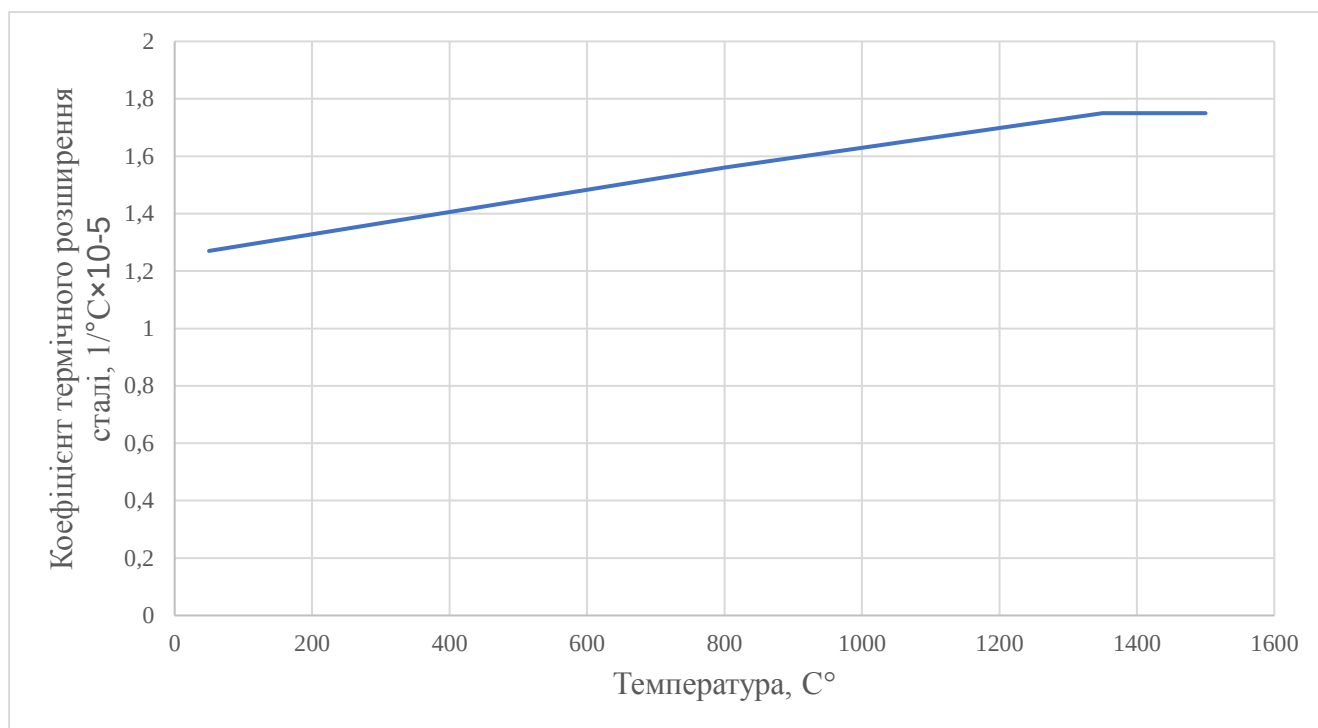


Рисунок 3.1 - Коефіцієнт термічного розширення сталі S235 в залежності від температури

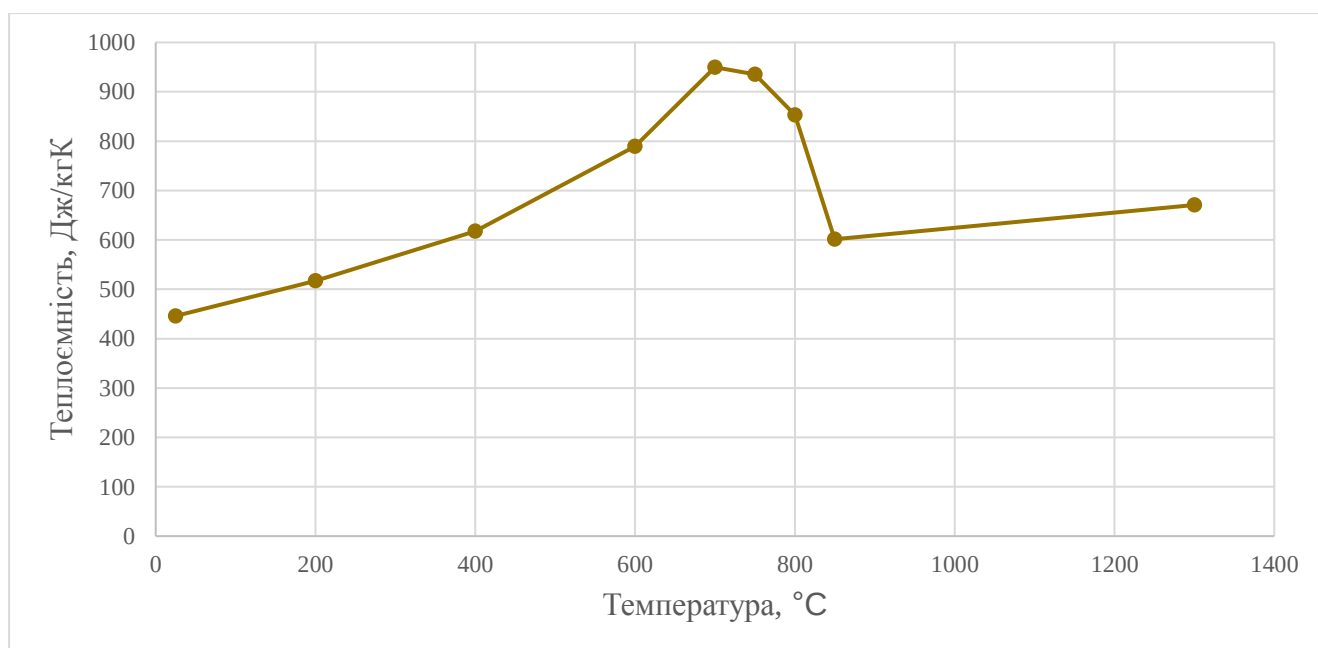


Рисунок 3.2 – Теплоємність сталі S235 в залежності від температури

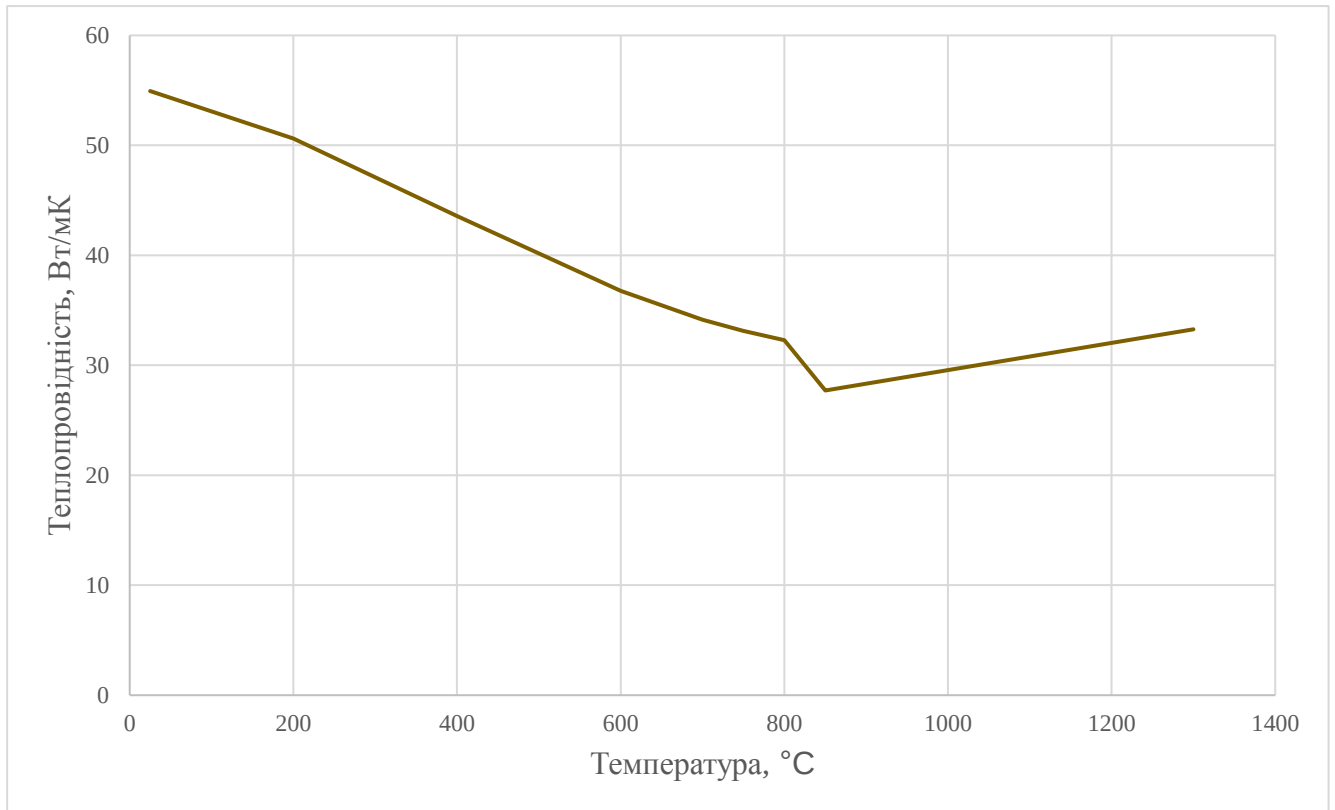


Рисунок 3.3 – Теплопровідність сталі S235 в залежності від температури

3.2 Визначення коефіцієнту емісивності

Для визначення значення коефіцієнту емісивності матеріалу була створена однопрохідна багатошарова стінка. Підкладка товщиною 5 мм, довжиною 150 мм і шириною 35 мм (рисунок 3.4) виготовлена з низьковуглецевої сталі S235. Довжина надрукованої стінки 80 мм, висота 36 мм, середня товщина 7,5 мм.

Для того, щоб визначити коефіцієнт емісивності дійсна температура поверхні повинна бути порівняна з даними ІЧ камери або термопар. Вимірювання температури поверхні було виконано контактним методом за допомогою термопар [20], [24], [28]. Дві термопари типу К (Ni-CrNi) були закріплені на стінці за допомогою конденсаторного зварювального апарату (рисунок 3.4).

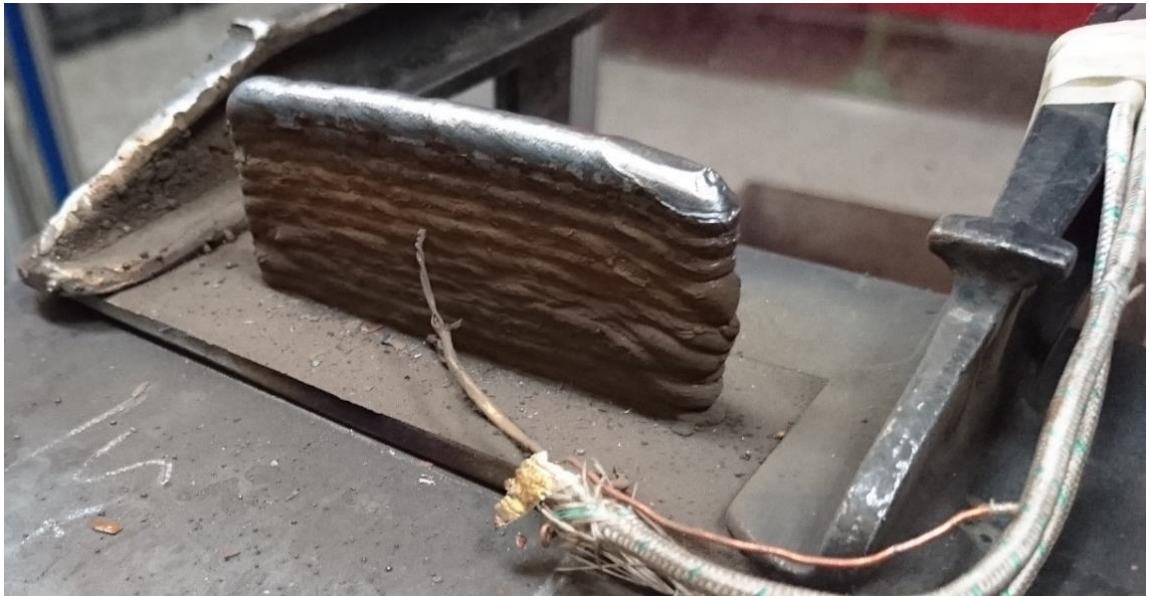


Рисунок 3.4 – Конфігурація напавленої стінки з двома термопарами для визначення коефіцієнту емісивності

Треба прийняти до уваги, що існує велика різниця між температурою деталі і температурою навколишнього середовища під час друку і відбиття випадкового випромінювання можуть впливати на показники температури термокамери. Розробники FLIR в своїх термокамерах і програмному забезпеченні впровадили опцію, що враховує можливе відбите випромінювання. У даній роботі під час визначення емісивності камера була встановлена перпендикулярно до стінки і на одній осі з нею, в результаті чого були записані значення емісивності з найбільшою інтенсивністю.

Так як ІК камера є досить дорогим обладнанням, вона повинна бути захищена від несприятливого впливу дугового процесу напавлення. Спеціально виготовлена алюмінієва оболонка була використана для захисту камери від високих температур і бризок металу. Також оболонка має вікно для об'єктива камери. Воно виготовлене з германієвого непокритого скла діаметром 30 мм і товщиною 0,5 мм. Германієве скло широко використовується в обладнанні для термографії через властивості добре пропускати ІЧ випромінювання.

ІЧ камера, яка була використана для захоплення зображення, має три діапазони вимірюваної температури. Перший діапазон містить невисокі

температури від $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $120\text{ }^{\circ}\text{C}$. Другий діапазон містить температури від $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $350\text{ }^{\circ}\text{C}$. Обидва режиму можуть бути використані для фокусування камери. У третьому діапазоні знаходяться температури від $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Цей діапазон був використаний в даній роботі для дослідження процесу WAAM. Крім того, нижня межа діапазону на практиці була близько $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, що дозволило не перемикатися в інші діапазони для запису процесу охолодження. Тіла з температурою поверхні нижче $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ невидимі в даному режимі зйомки, тому в ньому не може бути проведена установка фокусу.

Програмне забезпечення ResearchIR, розроблене виробником термокамери було використано для контролю камери і запису даних. За допомогою цієї програми налаштовується положення об'єкта в видошукачі і фокусування камери. Також в ResearchIR можуть бути налаштовані деякі параметри зйомки, такі як відстань до об'єкта (м), температура, що відбивається ($^{\circ}\text{C}$), температура навколишнього середовища ($^{\circ}\text{C}$), відносна вологість (%) і параметри зовнішніх оптичних приладів. Всі ці параметри впливають на показники температури.

Для збору даних з термопар була використана система збору даних, розроблена компанією Dewetron. Дана система має вбудований аналого-цифровий перетворювач (АЦП), який перетворює значення електричного опору термопар в значення температури в режимі реального часу і записує їх.

Головна ідея визначення коефіцієнту емісивності полягає в тому, що необхідно нагріти об'єкт із заданим матеріалом і порівняти показники температури з термопар і термокамери. В цьому випадку показання термопари приймаються як реальні. При наявності різниці показників можна зробити висновок про те, що коефіцієнт емісивності, встановлений перед зйомкою, не є дійсним і потребує калібрування.

Для того, щоб нагріти стінку був застосований зварювальний апарат для TIG зварювання. Після досягнення $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ за показниками термопари стінка була залишена охолоджуватися на повітрі (рисунок 3.5). Під час нагріву пальником робилися коливальні рухи для отримання більшої області нагріву. Для отримання найбільшої можливої температури нагрівання проводився як

зверху, так і з заднього боку стінки. На рисунку 3.5 показано зображення стінки, отримане камерою, з підключеними термопарами, що відходять наліво і оплавленою верхньою кромкою. Процес нагріву був записаний зі стандартними параметрами, показаними в таблиці 3.3, тому температура на шкалі рисунка 3.5 є заниженою і дана для коефіцієнта емісивності 0,95.

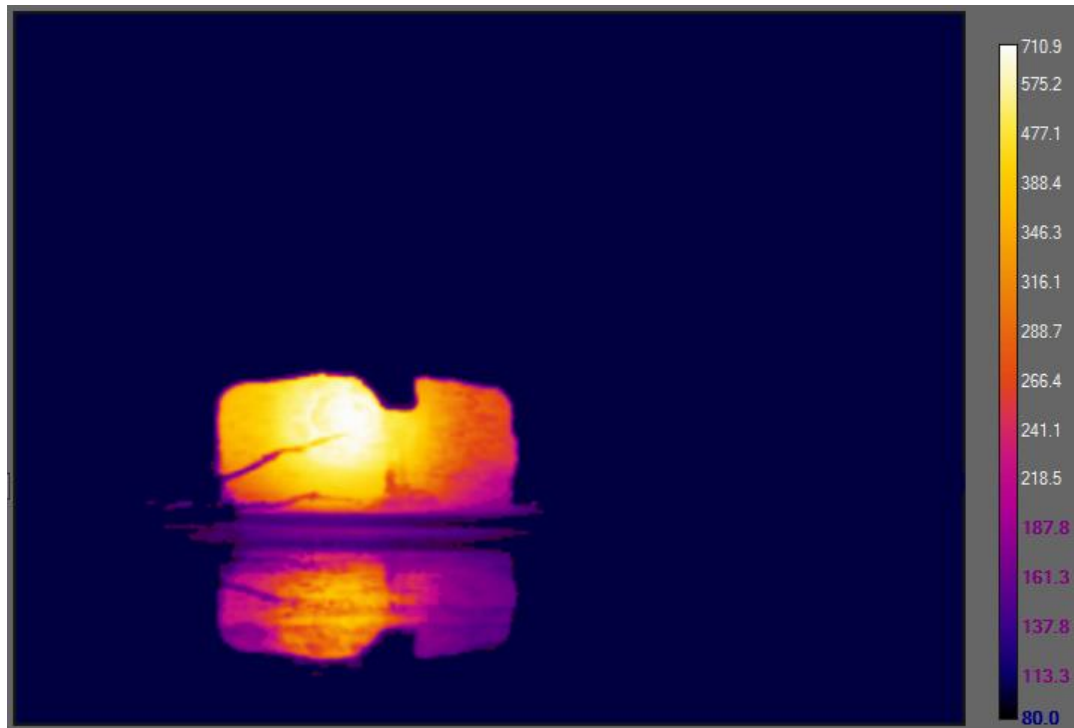


Рисунок 3.5 – Нагріта стінка під час експерименту з визначення коефіцієнту емісивності

Таблиця 3.3 - Параметри, використані під час запису процесу нагріву

		Стандартні	Налаштовані
Параметри об'єкта	Емісивність (від 0 до 1)	0.95	0.80
	Дистанція (м)	1.00	0.60
	Відбита температура (°C)	20.00	20.00
Параметри середовища	Температура середовища (°C)	20.00	20.00
	Відносна вологість (%)	50.00	50.00
	Пропускна здатність (від 0 до 1)	0.99	0.99
Параметри зовнішньої оптики	Температура (°C)	20.00	20.00
	Пропускна здатність (від 0 до 1)	1.00	0.45

Температура будь-якої точки записаного відео може бути визначена, тому дані термопар можуть бути співставленні з даними термографії в тих же точках стінки. Грунтуючись на показниках вимірів, були побудовані графіки залежності температури від часу. Для зіставлення графіків найвищі значення температур були обрані як початок відліку в системі координат температура-час. Відео було записано з частотою 60 кадрів в секунду. Збір даних з термопар проводився з частотою 10 кГц. Значення з кроком 1 секунда були зіставлені в одній системі координат (рисунок 3.6). Температура, виміряна методом термографії, виявилася нижче температури, отриманої з термопари. В результаті був зроблений висновок, що параметри запису ІЧ камери, зокрема коефіцієнт емісивності, потребують калібрування.

Як можна помітити на рисунку 3.6 кут нахилу графіків відрізняється на різних ділянках. З цього випливає, що коефіцієнт емісивності змінюється при підвищенні температури тіла.

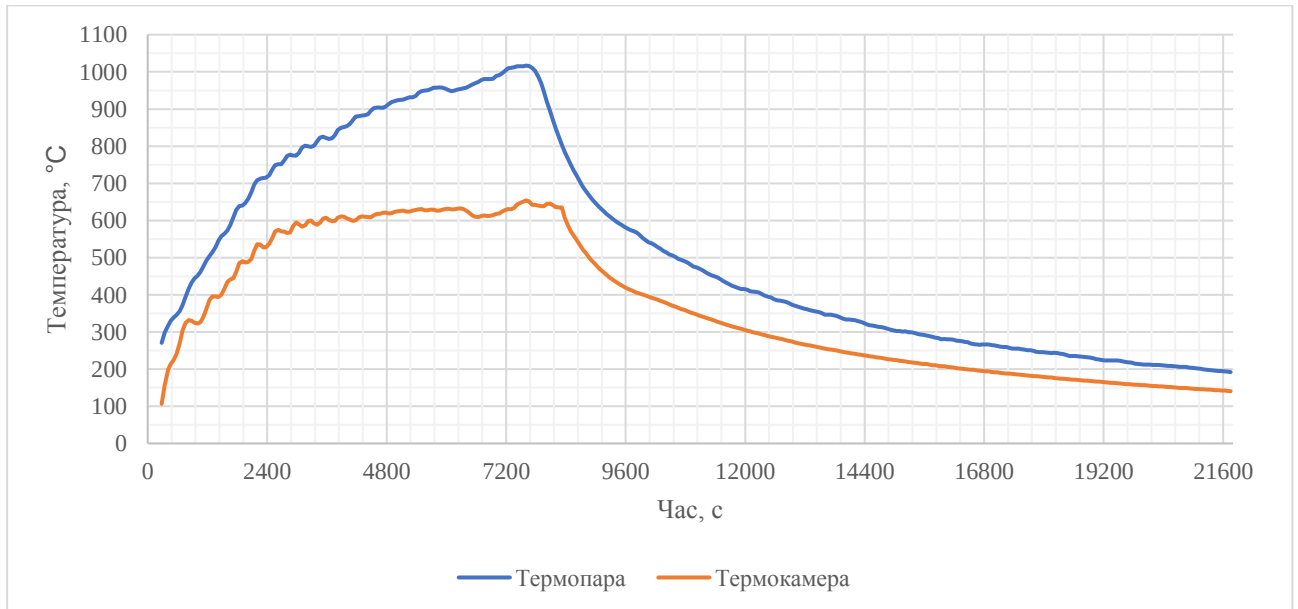


Рисунок 3.6 – Температура стінки під час нагріву

На основі отриманих значень температури в програмі ResearchIR за допомогою калькулятора емісивності був розрахований коефіцієнт емісивності. Значення коефіцієнта було розраховано з кроком 1 секунда, що дозволило

врахувати великий діапазон температур. Залежність коефіцієнта емісивності від значення температури показано на рисунку 3.7. Для спрощення подальших розрахунків і симуляції процесу теплопереносу було прийнято середнє значення коефіцієнта емісивності 0,8.

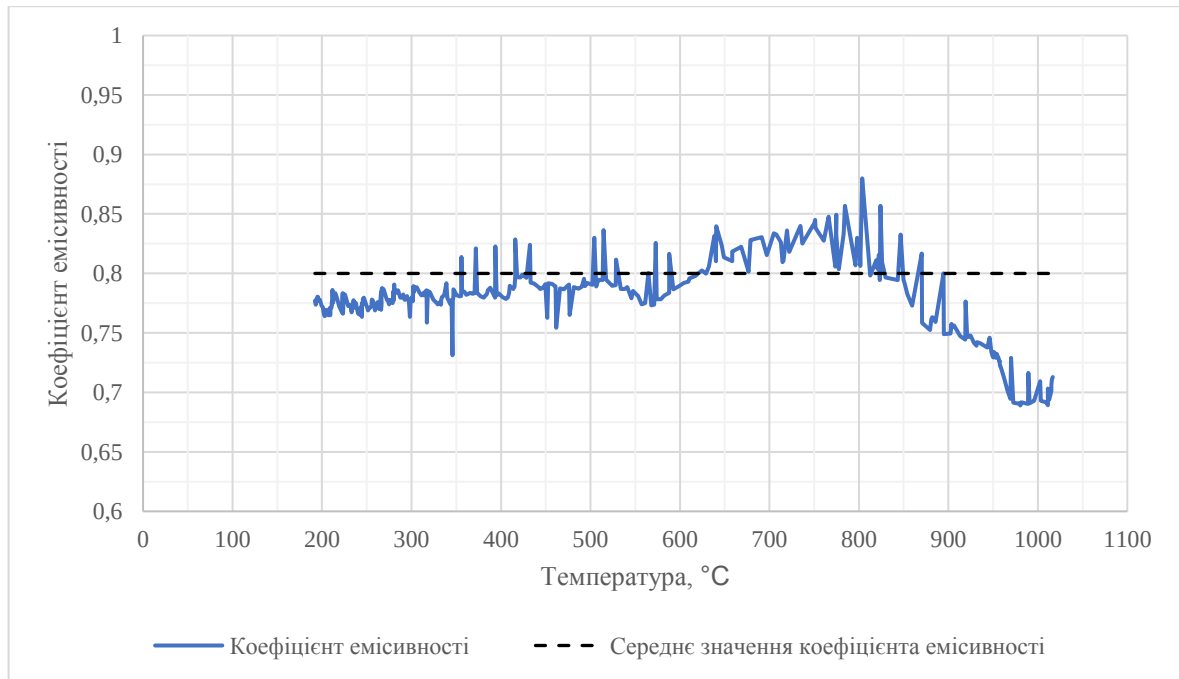


Рисунок 3.7 – Залежність коефіцієнта емісивності від температури

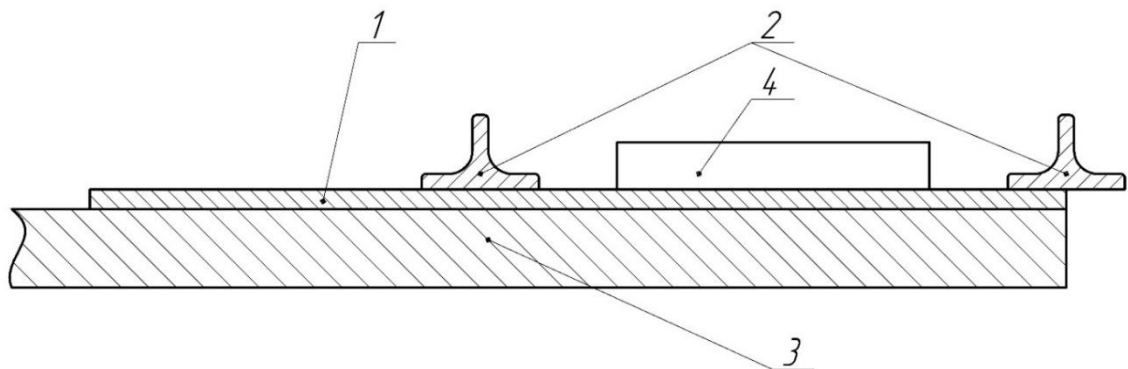
3.3 Експериментальні зразки

Для підтвердження комп'ютерної симуляції потрібно експериментально визначити деякі дані. Для отримання цих даних було надруковано ряд зразків.

Під керівництвом докторантки університету KU Leuven Наталії Чорновол ґрунтуючись на її попередньому досвіді і експериментально отриманих даних, таких як швидкість подачі дроту, швидкість руху пальника, сила струму і т.д. було обрано оптимальні параметри режиму нанесення і надруковано чотирнадцять зразків. Середні значення всіх параметрів були взяті для подальших розрахунків. Обрані параметри відповідають відносно невеликому

тепловнесенню на 1 мм валика, за умови стабільного процесу нанесення і формування валика, можливого в умовах застосованого обладнання. Ці дані були взяті з попереднього досвіду використання зварювального робота для процесу WAAM в зварювальній лабораторії кампуса De Nayer.

Для кращого контакту між поверхнями підкладка була закріплена на столі позиціонера двома струбцинами, як показано на рисунку 3.8. Також, деталь необхідно закріплювати для запобігання будь-якого переміщення під час процесу нанесення шарів. Зміну орієнтації валика в просторі може бути викликано вигином деталі. Різниця в висоті деталі буде впливати на параметри джерела живлення. Тому підкладка повинна бути закріплена рівномірно і симетрично, якщо це дозволяє конфігурація деталі і стола, або не закріплена взагалі, якщо це можливо. В даному випадку вигин підкладки все ж буде присутній, але значення вигину при цьому будуть нижче.



1 – підкладка; 2 – струбцини; 3 – стіл позиціонера; 4 – стінка, що наноситься

Рисунок 3.8 – Закріплення експериментальних зразків

Для того, щоб уникнути моделювання складних граничних умов і для зниження напруги, що генерується притисканням деталі, підкладка може бути розташована на столі без будь-якої фіксації [9], [17].

Також між підкладкою і столом можуть бути використані додаткові пластини для ізоляції. Це дозволить обмежити теплообмін між деталлю і столом і отримати залишкові напруги з більшою магнітудою. Цей метод можна

використовувати під час експериментів з визначення і підтвердження напружень.

Створення зразків здійснювалося роботизованою одиницею CLOOS QRC320H з джерелом живлення CLOOS QINEO PULSE 450 з синергетичною системою контролю параметрів при параметрах, зазначених в таблиця 3.4.

Таблиця 3.4 - Параметри процесу нанесення

Номер зразка	Швидкість нанесення, см/хв	Швидкість подачі дроту, м/хв	Сила зварювального струму, А	Зварювальна напруга, В
2A, 2B, 2C, 2D	35	4.0	161-172	15.6-16.0
3A, 3B, 3C, 3D, 1, 2, 3, 4, 5, 8	60	2.5	105-122	15.6-16.5

Зварювальний струм і напруга вимірювалися під час виробничого процесу за допомогою вбудованого амперметра і вольтметра для обчислення середнього значення тепловнесення.

Зразки 3A, 3B і 3C були притиснуті до столу з використання додаткових підкладок. Як було зазначено раніше, в результаті використання додаткових підкладних пластин зменшився теплообмін зі столом, змінився температурний цикл, і в результаті була отримана більша кінцева деформація. Для порівняння, зразок 3D був надрукований без додаткових підкладок. В результаті були отримані різні деформації для одних і тих же параметрів нанесення після відкріплення деталей. На основі цих експериментальних даних можна зробити висновок, що крім обмеження введення тепла, параметр теплообміну з навколишнім середовищем також потрібно регулювати для зменшення внутрішніх напружень та деформацій.

Щоб збільшити тепловіддачу від деталі, можна використовувати мідний стіл або підкладку, або підкладку з водяним охолодженням. Також для збільшення тепловіддачі можливо пришвидшити потік газу, що оточує деталь,

наприклад повітря або захисного газу. Необхідно враховувати, що повітряний потік може призвести до прискореного окислення об'єкта.

Зразки 1, 2, 3, 4, 5, 8 були надруковані на підкладках, безпосередньо закріплених на столі позиціонера без використання будь-яких додаткових проставок. Монтаж деталей таким способом є найбільш простим і доцільним економічно та з точки зору скорочення часу на підготовку до друку.

Розміри стінок і підкладки вказані в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 - Розміри зразків

Зразки	Товщина, мм	Ширина, мм	Довжина, мм
Підкладка	5	30	250
2A, 2B, 2C, 2D	1.7	7.5	80
3A, 3B, 3C, 3D, 1, 2, 3, 4, 5, 8	1.2	4.4	80

3.4 Створення моделі методом KE

У цій роботі програмний комплекс Abaqus CAE є основним інструментом, що дозволяє провести термічний та термомеханічний аналізи в одному інтерфейсі. Для отримання правильних результатів у Abaqus необхідно вказувати всі цифрові вхідні дані в одній системі одиниць, обраній користувачем. Одиниці, які були використані при моделюванні, наведені в таблиці 3.6

Геометрію моделі може бути створена за допомогою інтерфейсу Abaqus або імпортована з різних CAD програм. Для складних об'єктів краще використовувати системи CAD через відносну простоту інструментів Abaqus. Беручи до уваги раніше надруковані зразки була створена 3d модель підкладки з 10 шарами нанесеного матеріалу (рисунок 3.9). Розміри моделей взяті з таблиці 3.5.

Таблиця 3.6 - Фізичні константи та одиниці вимірювання

Назва	Одиниця	Значення
Довжина	мм	-
Температура	°C	-
Сила	Н	-
Маса	Тонна	-
Енергія	мДж	-
Час	с	-
Напруження	МПа (Н/мм ²)	-
Щільність	Тонна/мм ³	-
Константа Стефана Больцмана	мДж/с/мм ² /°C ⁴	5.669E-011
Абсолютний нуль температури	°C	-273.15

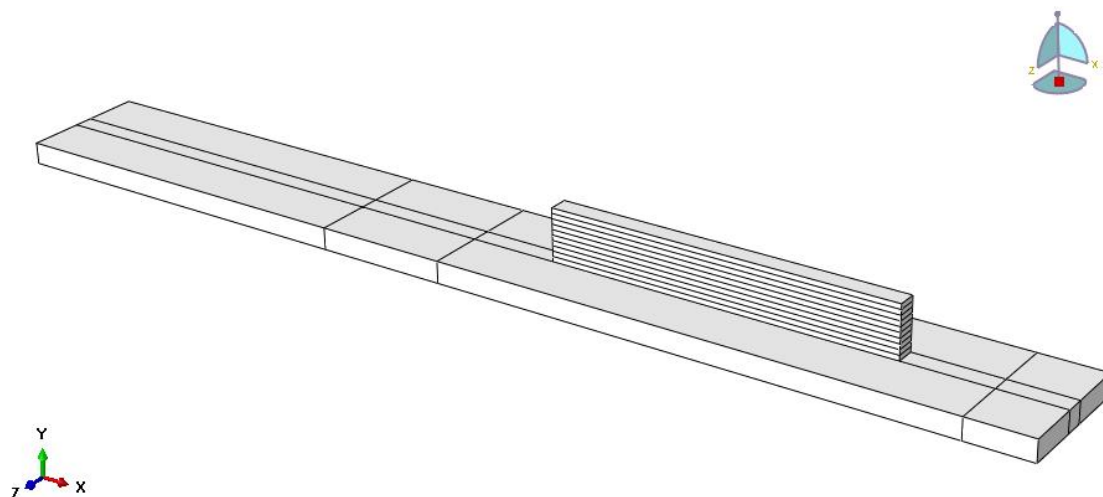


Рисунок 3.9 – Тривимірна модель експериментального зразка

Симуляція процесу WAAM вимагає моделювання процесу нанесення матеріалу, моделювання джерела тепла та моделювання процесів взаємодії нанесеного металу з підкладкою та навколишнім середовищем. Моделювання процесу нанесення матеріалу здійснювалося з покроковою активацією елементів. У цій роботі були використані 8-вузлові лінійні кубічні елементи.

Важливою частиною створення моделі є присвоєння властивостей матеріалу. Механічні та теплові властивості, які були використані в цьому моделюванні, наведені в таблиці 3.7. Також важливі параметри матеріалу були описані в підрозділі 3.1. Кожна властивість матеріалу використовувалася як

температурозалежна. Усі наведені дані були присвоєні як нанесеному металу, так і підкладці, яка виготовлена з низьколегованої нелегованої м'якої сталі.

Таблиця 3.7 - Властивості матеріалу, використані у симуляції

Температура, °C	Властивості матеріалу						
	Щільність, Тонна/мм ³ Е-9	Теплопровідність мВт/(мм°C)	Модуль Юнга, МПа	Коеф. Пуассона	Коеф. розширення, Е-5	Межа плинності, МПа	Тепло- ємність, мДж/°C Е6
20	7.815	46	210000	0.3	-	265	430
50	-	-	-		1.27	-	-
100	-	46	-		-	218	500
200	-	45	206000		-	186	550
300	-	43	-		-	170	580
400	-	41	171000		-	149	610
500	-	38	-		-	115	650
600	-	35	87000		-	91	710
700	-	29	-		-	25	790
800	-	24	39300		-	21	865
850	7.6	-	-		1.56	-	-
900	-	25.2	-		-	10	565
1000	-	-	15000		-	-	-
1100	-	-	13400		-	-	-
1200	-	-	11500		-	-	-
1350	-	-	-		1.75	-	-
1440	-	31.31	-		-	-	630
1500	7.29	-	-		1.75	-	-

Теплопровідність значно впливає на процес нагріву та розподілу тепла в тілі моделі та на обмін теплом з навколишніми предметами та навколишнім середовищем. Під час наплавлення найбільша кількість тепла розсіюється за рахунок теплопровідності порівняно з конвекцією та випромінюванням у повітря. Бай та ін. у своїй роботі [29] вказують, що тепловіддача внаслідок теплопровідності зменшується зі збільшенням кількості нанесених шарів, що призводить до збільшення об'єму басейну розплавленого металу. Умови нанесення та розміри басейну розплавленого металу перестають змінюватися після того, як нанесена частина стає достатньо високою.

У той же час властивості пружності, пластичності та коефіцієнта розширення впливають на результати аналізу напружень. Використання залежних від температури даних дозволяє підвищити точність розрахунку.

Для управління процесом активації елементів було використано спеціальний плагін. Abaqus дозволяє використовувати зовнішні плагіни, щоб зробити різні види аналізу швидшими та простішими. Один із спеціальних плагінів, орієнтованих на зварювання - зварювальний інтерфейс Abaqus (AWI). За допомогою AWI було досягнуто часткової автоматизації процесу створення алгоритму активації елементів валика, встановлення зв'язків з основним і наплавленим матеріалами та присвоєння властивостей новим елементам, таких як випромінювання, конвекція тощо.

AWI має заздалегідь задану модель джерела тепла. Потрібно лише вказати початкову температуру плавлення матеріалу, що наплавляється, та температуру, до якої цей матеріал нагрівається пальником. Перша температура була взята зі специфікації присадного матеріалу (підрозділ 3.1). Другий - це цільова температура нагріву дуги, яка в даній роботі була прийнята рівною температурі плавлення матеріалу, тобто 1500 °C. Взаємодія між нанесеними елементами та підкладкою також контролюється AWI. Кожен крок під час створення елемента плагін додає до них властивості тепловіддачі та випромінювання.

AWI працює лише з металом, що наплавляється, і підкладкою, тому стіл позиціонера вимагає ручного призначення тепловіддачі та значень випромінювання. Також початкова температура стола повинна бути вказана. Властивості тепловіддачі та випромінювання наплавленого металу, підкладки та стола наведені в таблиці 3.8. Ці властивості мають велике значення для процесу охолодження. За допомогою цих факторів описується процес теплообміну з навколишнім середовищем у вигляді випромінювання та конвекції. Параметри температури навколишнього середовища та коефіцієнта тепловіддачі характеризують взаємодію з середовищем навколо об'єкта. Використовуючи ці параметри, можна регулювати процес охолодження деталі, як при моделюванні, так і на практиці під час нанесення. Змінюючи значення коефіцієнта тепловіддачі

кількість теплоти, що передається з поверхні виробу в навколишнє повітря, тобто процес конвекції може бути змінено. Для попереднього моделювання були використані параметри, наведені в таблиці 3.8.

Таблиця 3.8 - Властивості тепловіддачі та випромінювання нанесеного матеріалу, підкладки та столу

	Коефіцієнт тепловіддачі, мДж/с/мм ² /°C	Емісивність	Температура навколишнього середовища, °C
Валики	0.018	0.8	20
Підкладка	0.025	0.8	20
Стіл	0.025	0.9	20

Емісивність нанесеного матеріалу була визначена у підпункті 3.2, а для підкладки і стола була взята зі сторонніх джерел [30].

Для здійснення процесу передачі тепла між підкладкою та столом повинні бути створені умови контакту між їх поверхнями. Для цього необхідно присвоїти властивості контакту та вказати значення теплопровідності для тих зон поверхонь, що контактують. Також програма дає можливість задати значення теплопровідності в залежності від зазору або тиску. Для контактної системи сталь-сталь коефіцієнт теплопровідності становить 0,825 [31].

Також підчас налаштування кроку пальника необхідно вказати початковий, мінімальний та максимальний прирости часу. Приріст часу повинен бути меншим, ніж час крок, оскільки час кроку повинен мати принаймні один приріст для обчислення. Ці три параметри відповідають за крок, з яким дані будуть обчислюватися та відображатися. Чим менше значення, тим частіше буде проводитися розрахунок і тим плавніше буде відбуватися зміна температури або значень напруження. Зі збільшенням кількості розрахунків також збільшується необхідний час для розрахунку.

Ще один параметр у налаштуваннях кроку пальника - кількість допустимих прирощень часу. Якщо кількість допустимих прирощень буде перевищено, програма генерує помилку. У цьому випадку рекомендується

переглянути початковий, мінімальний та максимальний прирости часу або наступний параметр.

Наступний параметр - це максимально допустима зміна температури на приріст. Значення приросту в процесі розрахунку коливається від мінімального до максимального і може бути обмежене максимально допустимим ступенем зміни температури. Чим вище це значення температури, тим більший проміжок часу нагрівання та охолодження покривається збільшенням часу, що означає, що розрахунок займе менше часу, але в той же час кількість і плавність вихідних даних зменшується.

3.5 Результати термічної симуляції

Відповідно до умов, зазначених в попередньому підрозділі, була проведена термічна симуляція процесу WAAM. Для оцінки результатів симуляції були взяті дані температури з точки, розташованої в центрі першого шару (рисунок 3.10). З графіку циклу нагріву-охолодження можна побачити, що акумуляція тепла відсутня для змодельованого зразка. Це можна пояснити геометричними розмірами зразка та його взаємодією з навколишніми об'єктами та середовищем. Деяка частина тепла від зразка випромінювалася в повітря, але більша його частина відводилася до столу позиціонера. Зважаючи на те, що для виготовлення зразка були використані параметри, що забезпечують внесення відносно невеликої кількості тепла, можна зробити висновок, що при друкуванні об'єктів з більшими розмірами, більш розгалуженої форми або багатопрохідних об'єктів ефект акумуляції тепла буде більш помітним.

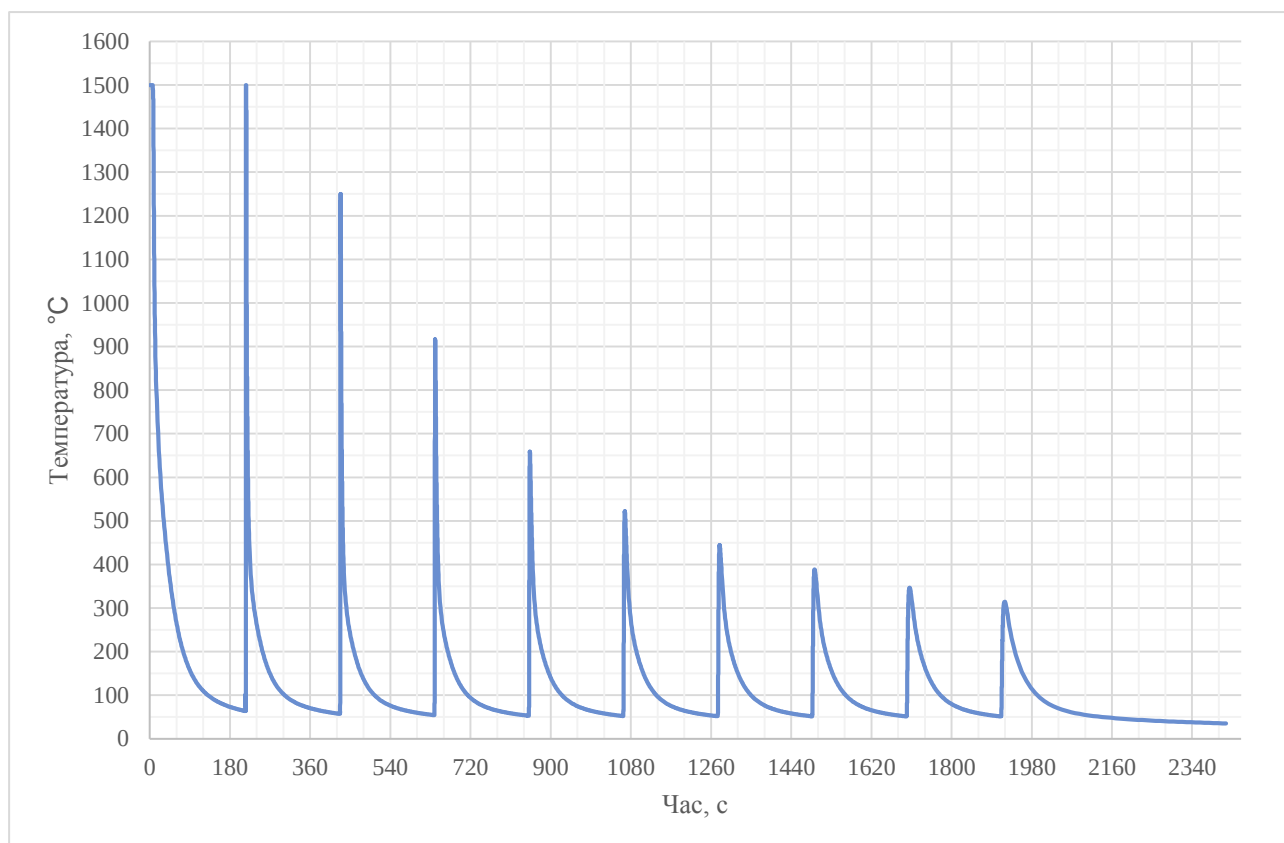


Рисунок 3.10 – Значення температури під час симуляції WAAM

4 ПІДТВЕРДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ТЕРМІЧНОЇ СИМУЛЯЦІЇ

Важливою частиною даної роботи є підтвердження результатів термічної симуляції. Без підтвердження симуляція не може бути застосована на практиці в дослідженнях і в виробництві, так як її результати можуть бути далекі від правди або не мати достатньої точності.

Процес підтвердження термічної симуляції схожий на процес визначення коефіцієнта емісивності, описаний в підрозділі 3.2. Суть підтвердження полягає в порівнянні даних термічного аналізу з даними, отриманими експериментальним шляхом. Експериментальні дані, отримані в результаті вимірювання температури методом термографії і з використанням термопари були взяті як контрольні.

Процес друку зразків під номерами 1, 2 і 3 був зафіксований ІЧ камерою, встановленою під кутом 5° до поперечної осі стінки і на невеликому підвищенні (рисунок 4.1). Збір даних температури цих зразків проводився в діапазоні температур від 200°C до 1200°C . На практиці цей діапазон починається з 80°C .

Виготовлення зразка під номером 4 було записано з таким же розташуванням камери, але в діапазоні температур від 0°C до 350°C .

Процес друку зразків номер 5 і 8 був записаний ІЧ камерою, встановленою під кутом 5° до поперечної осі стінки і паралельно столу (рисунок 4.2). Запис зразка номер 5 проводився в діапазоні температур від 200°C до 1200°C . Зразок номер 8 був записаний в діапазоні температур від 0°C до 350°C .

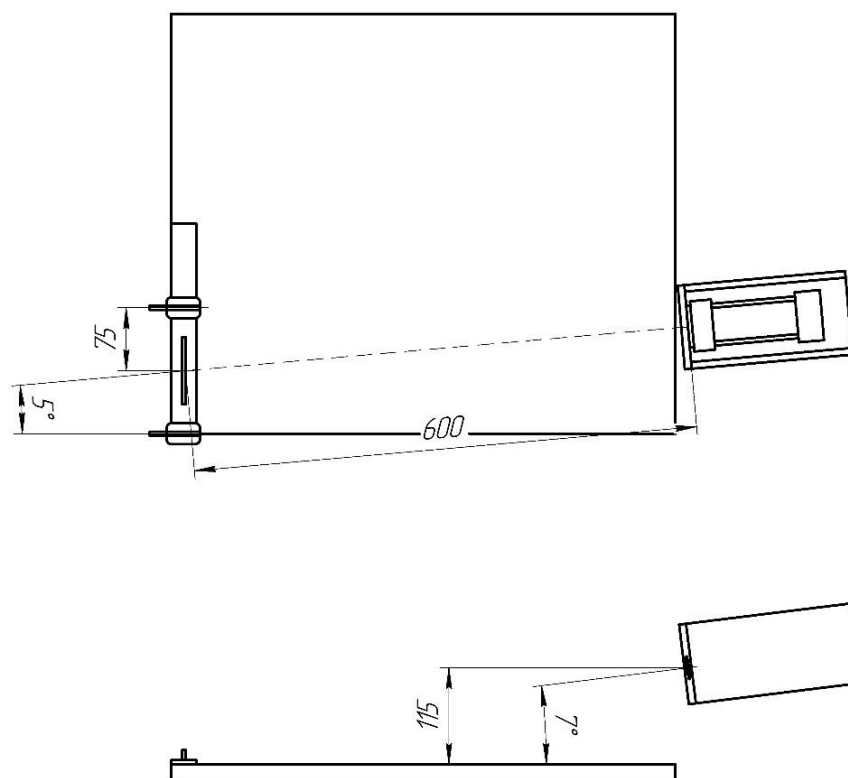


Рисунок 4.1 – Схема розташування ІЧ камери під час виготовлення зразків 1, 2, 3 і 4

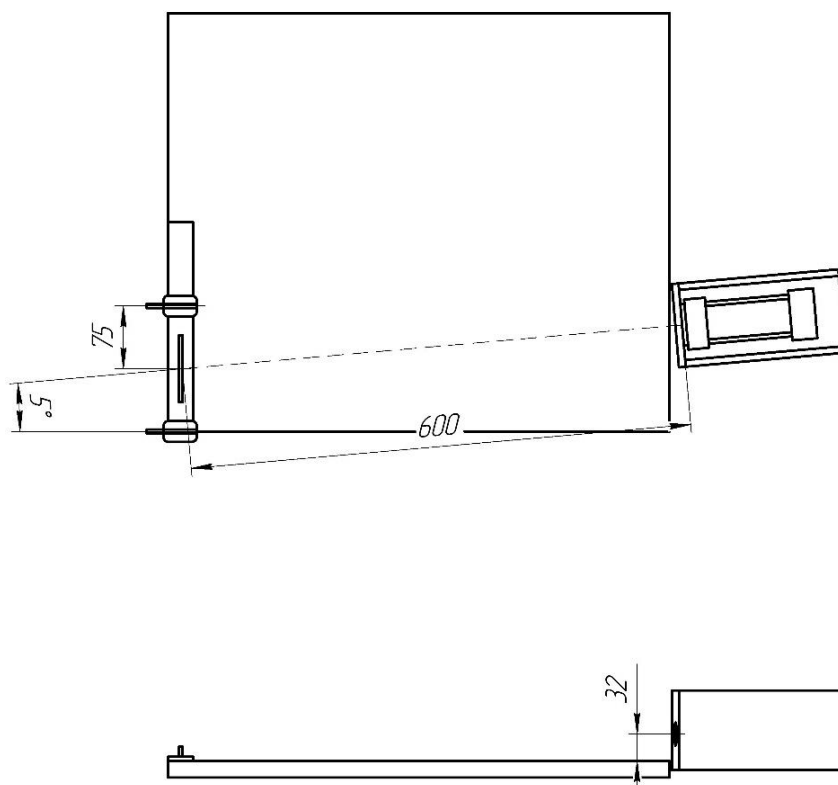


Рисунок 4.2 – Схема розташування ІЧ камери під час виготовлення зразків 5 і 8

Кожне відео процесу було записано з частотою 15 кадрів в секунду. Дане значення є оптимальним в плані кількості даних і розміру кінцевого файлу.

Паралельно із записом відео ІЧ камерою також збиралися дані з термопар. Три термопари К-типу були приєднані до кожного зразка для додаткового контролю температури. Розташування термопар показано на рисунку 4.3. Запис даних проводився з частотою 10кГц. Кількість даних, отриманих з такою частотою, є надмірною, тому вона була зменшена програмним шляхом використовуючи систему збору даних Dewetron. В результаті фільтрації були отримані значення з частотою 10 значень в секунду.

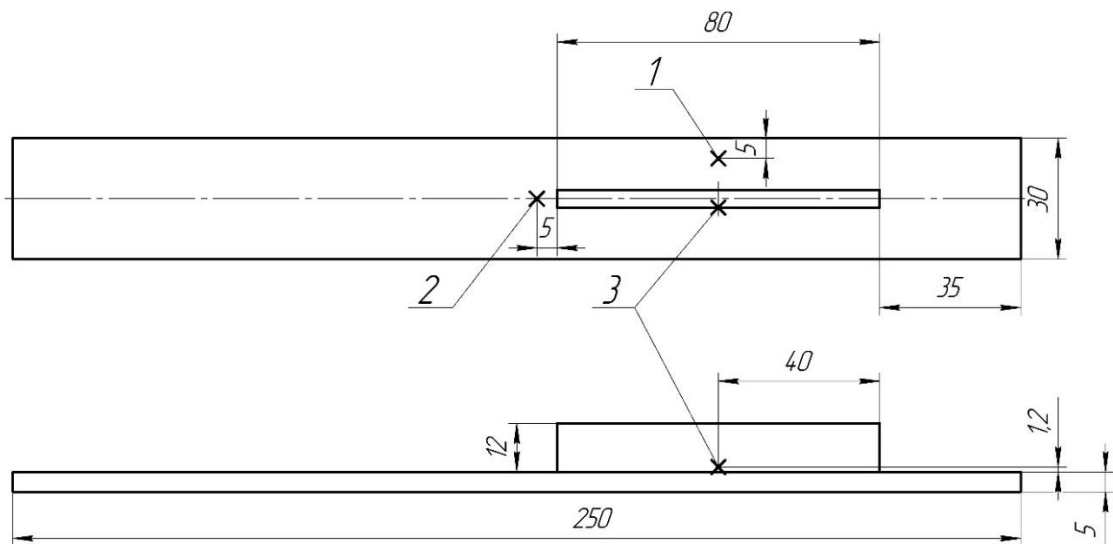


Рисунок 4.3 – Розташування термопар на підкладці та стінці

Для аналізу температурних даних значення температури точки 3 були витягнуті з відео. Так як термопара була встановлена тільки після нанесення третього шару, то тільки дані з 4 по 10 шар були використані в аналізі. Температурні дані, отримані термокамерою і термопарами, показані на рисунку 4.4.

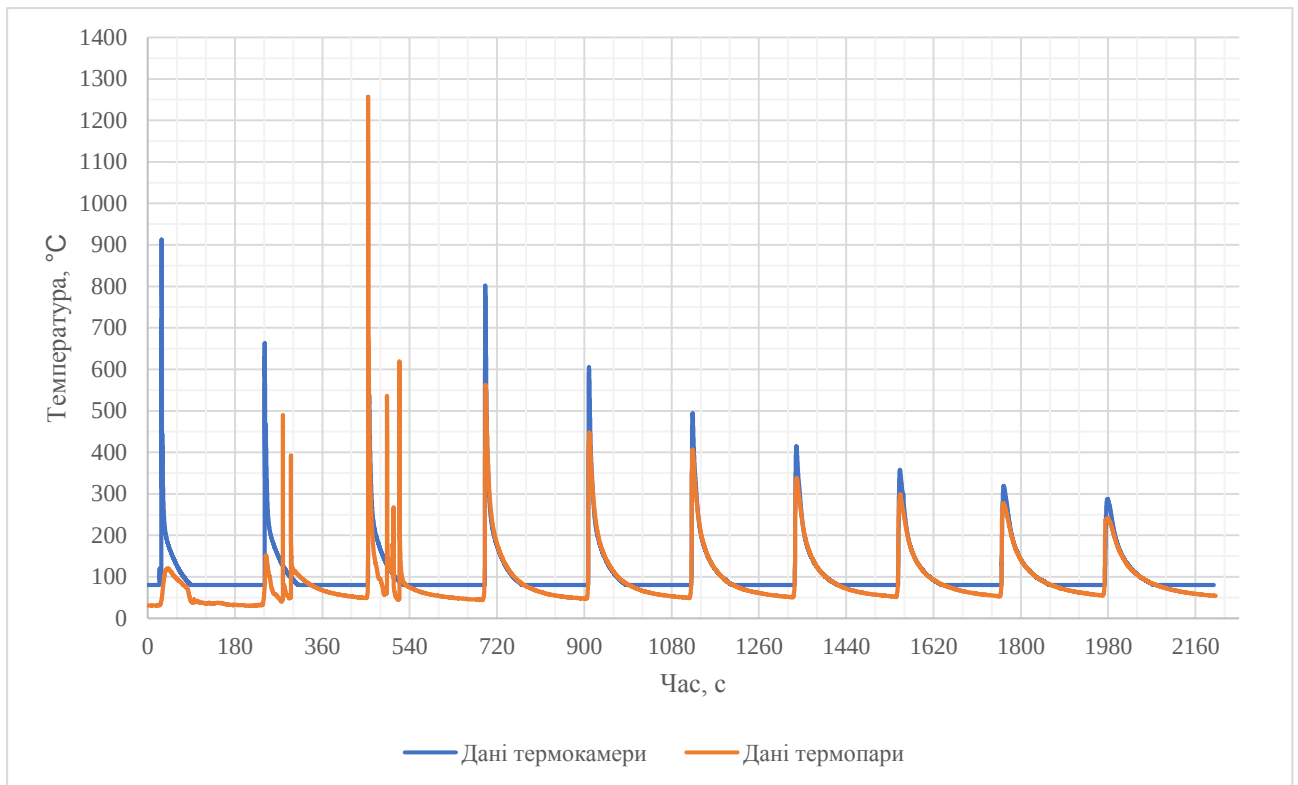


Рисунок 4.4 - Температурні дані, отримані термокамерою і термopаром

Коефіцієнт випромінювання, отриманий у підрозділі 3.2, дозволив отримати досить близькі значення температури з термopар та ІЧ-теплової камери.

Як показано на рисунку 4.4, для друку стінки було обрано час очікування 200 с. Цього часу було більш ніж достатньо для охолодження деталі до прийнятної міжпрохідної температури. Цього часу було достатньо, оскільки для друку зразків були обрані параметри процесу з низьким введенням тепла. Температура між проходами становила 50-55 °C без примусового охолодження. Також на графіку процесу можна спостерігати ефект акумуляції тепла. Температура між проходами є ключовим фактором у визначенні акумуляції тепла.

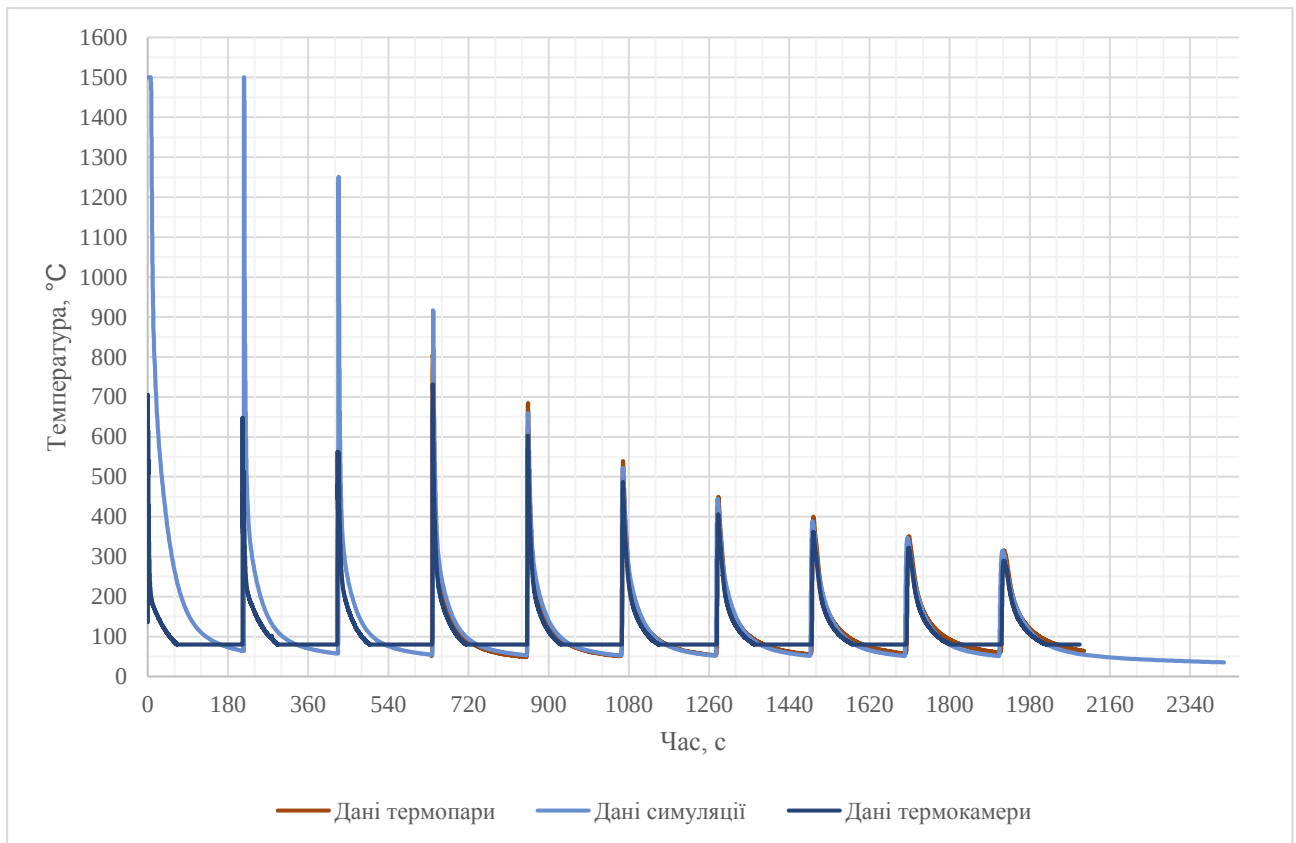


Рисунок 4.5 - Дані температури з середини першого шару

Акумуляція тепла значно впливає на стабільність процесу WAAM. Геометрична точність, кількість та види дефектів нанесення та властивості матеріалу готових деталей залежать від акумуляції тепла під час виготовлення [32].

Регулювання температури між проходами можна здійснити за рахунок зміни часу між проходами та зміни швидкості охолодження.

Примусове охолодження між проходами досліджувалося Дингом та ін. [33] для сплаву Ti6Al4V. Швидке охолодження газом CO₂ протягом очікування використовувалося для уникнення окислення титану при використанні WAAM з локальним газовим захистом. Експериментально підтверджено, що примусове охолодження значно скорочує час очікування між проходами, не погіршуючи властивостей нанесеного матеріалу. Скорочення часу очікування призводить до збільшення швидкості нанесення та покращує ефективність виробництва.

Denlinger та ін. у своїй роботі над впливом часу очікування на залишкові напруги та деформації працювали з Inconel 625 та Ti – 6Al – 4V. Вони встановили, що додавання додаткового часу між проходами для додаткового охолодження під час процесу нанесення Inconel 625 призводить до зменшення деформацій та залишкових напружень. Навпаки, зменшення часу очікування для Ti-6Al-4V призводить до значно менших значень напруги та деформації [34].

У цій роботі примусове охолодження не було впроваджено в процесі нанесення. З метою оптимізації циклу охолодження та скорочення часу очікування було налаштовано час охолодження між кожним проходом.

5 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС ВИГОТОВЛЕННЯ ЗОВНІШНЬОГО КОРПУСУ КАМЕРИ ЗГОРЯННЯ

5.1 Призначення



Рисунок 5.1 – Зовнішній вигляд зовнішнього корпусу камери згоряння

Корпусна деталь газотурбінної установки, наведена в даній роботі (рисунок 5.1), виступає в ролі об'єкта дослідження і застосування адитивної технології, заснованої на базі дугового процесу зварювання електродом, що плавиться в середовищі захисних газів. Дана корпусна деталь не є серійною і встановлюється на випробувальний стенд камери згоряння для перевірки і доведення параметрів камери згоряння.

5.2 Аналіз умов роботи

Досліджувана деталь є частиною камери згоряння газотурбінного двигуна і під час роботи піддається різним газодинамічним навантаженням. Під час роботи деталь перебуває під впливом постійної температури біля 300°C, що діє з внутрішньої сторони корпусу, та під впливом підвищеного тиску, що також діє з внутрішньої сторони деталі і має величину 6 атм (607950 Па).

Кінцева деталь є сполучною частиною між камерою згоряння і компресорною частиною корпусу випробувального стенду. Консольно закріплений корпус при коректних умовах роботи не підпадає під вплив вібрації, тому особливі вимоги до нього не пред'являються.

5.3 Аналіз матеріалу

Згідно з умовами роботи і призначенням досліджувана корпусні деталь виготовляється з корозійностійкої жароміцної сталі 07X12НМБФ-Ш (ЕП609-Ш). Хімічний склад сталі згідно ТУ У 27.1-00190414-042: 2007 представлений в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 - Хімічний склад сталі 07X12НМБФ-Ш (ЭП609-Ш)

C	Cr	Ni	Mo	V	Nb	Si	Mn	P	S	Ce	Fe
0,05-0,09	10,50-12,00	1,40-1,80	0,35-0,50	0,15-0,25	0,05-0,15	<0,60	<0,60	<0,03	<0,02	<0,02	Основа

Деталь була спроектована для виготовлення з поковки шляхом механічної обробки. У цій роботі пропонується технологія виготовлення корпусу з використанням технології WAAM, що дозволить підвищити ефективність використання матеріалу.

В якості присадного матеріалу пропонується використовувати зварювальний цільний низьковуглецевий дріт марки G13/4 (EN ISO 14343-A) / SS (410NiMo) (EN ISO 14343-B) / ER410NiMo (mod.) (AWS A5.9) діаметром 0,8 мм. Відповідно до стандарту AWS A5.9 запропонований дріт розроблений для зварювання литих матеріалів за класифікацією ASTM CA6NM або схожих, а також сталей типу 410, 410S і 405 невеликих товщин. Присадний матеріал, згідно з цією класифікацією, є модифікованим зі зниженим вмістом хрому і підвищеним вмістом нікелю. Дана модифікація дозволяє позбутися фериту в мікроструктурі, так як він має шкідливий вплив на механічні властивості. Остаточна термообробка після зварювання не повинна перевищувати 1150°F (620°C), так як більш високі температури можуть призвести до загартування через не відпущений мартенситу в мікроструктурі після охолодження до кімнатної температури.

Таблиця 5.2 - Властивості проволоки ЭП609-Ш (07X12НМБФ-Ш / 410NiMo mod.)

Температура, °C	25	100	200	300	400	500	600	700
Коефіцієнт теплопровідності, $\alpha \cdot 10^6$ 1/град	24,3	25,1	26,0	26,4	25,1	22,2	22,2	22,2
Питома теплоємність, $\alpha \cdot 10^6$ 1/град	-	0,460	0,502	0,544	0,628	0,691	0,795	0,879
Температура, °C	-	20-100	20-200	20-300	20-400	20-500	20-600	-
Температурний коефіцієнт лінійного розширення, $\alpha \cdot 10^6$ 1/град	-	11,3	11,6	11,9	12,3	12,6	12,9	-
Температура, °C	-	-	100-200	200-300	300-400	400-500	500-600	-
Температурний коефіцієнт лінійного розширення, $\alpha \cdot 10^6$ 1/град	-	-	11,9	12,6	13,3	13,9	14,2	-

5.4 Аналіз геометрії зовнішнього корпусу

Об'єкт дослідження являє собою тіло обертання з утворюючим контуром, зображеним на рисунку 5.2. У спрощеному вигляді виріб є циліндром з двома різними значеннями товщини по довжині конструкції і двома фланцями. Для спрощення процесу виготовлення деталі пропонується прийняти товщину стінки основного циліндра рівний по всій довжині. Відповідність необхідним розмірам в подальшому буде забезпечено механічною обробкою.

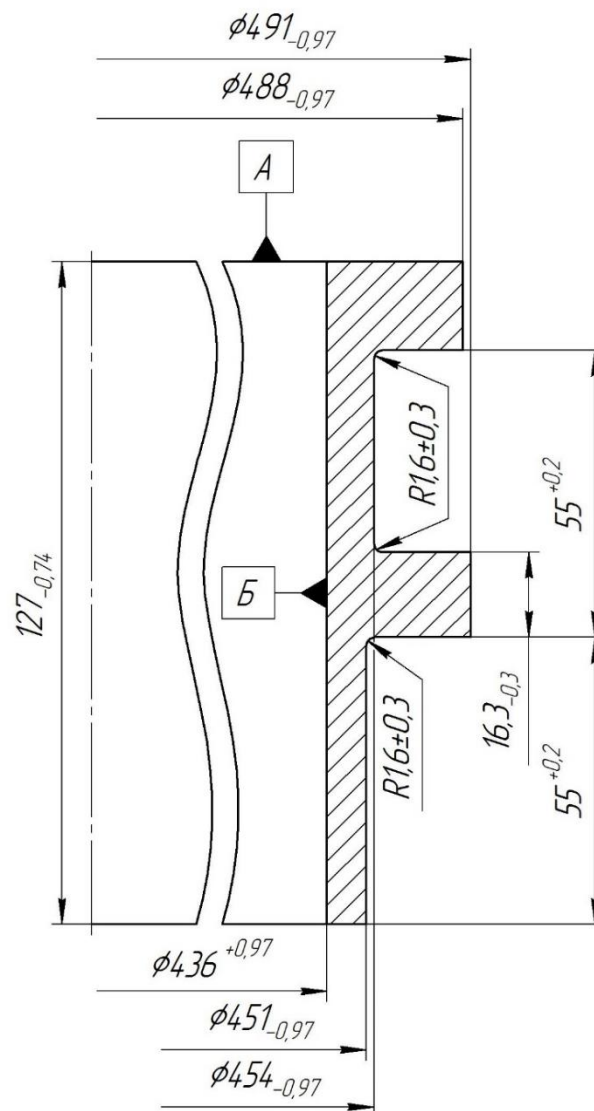


Рисунок 5.2 - Ескіз зовнішнього корпусу

Експериментальним шляхом для використовуваного дроту було встановлено, що при параметрах режиму, що забезпечують стабільний процес нанесення валика, вийдуть наступні геометричні параметри валика: ширина 5,5 мм; висота 1,3 мм.

Беручи до уваги геометричні параметри валика необхідно розрахувати кількість шарів, з яких буде будуватися деталь, і кількість проходів для забезпечення необхідної товщини стінки. При цьому варто врахувати хвилястість бічної поверхні, яка неминуче буде присутня при вирощуванні деталі методом WAAM. В даному випадку, в ряді експериментів при застосуванні корозійностійкого дроту в якості присадного матеріалу інженерами авіадвигунобудівельного підприємства АТ «Мотор Січ» було отримано значення хвилястості не більше 1,5 мм.

Також, для розрахунку кількості шарів і створення програми вирощування деталі, а також, що найголовніше, для забезпечення задовільної якості поверхні в результаті токарної обробки потрібно встановити мінімально необхідну і достатню величину припуску для чорнової і чистової обробки. Призначення припусків на механічну обробку є важливим етапом проектування деталі, так як від їх чисельних значень залежить ефективність обробки і ефективність використання матеріалу. Надмірно великі величини припуску знижують ефективність використання матеріалу і збільшують час обробки, що веде до підвищення кінцевої вартості продукту. Надмірно малі величини припуску можуть виявитися недостатніми для забезпечення необхідної якості поверхні.

У випадку технології WAAM величина припуску повинна враховувати максимальну хвилястість оброблюваної поверхні. Величина припуску в даному випадку не може бути менше 1,5 мм.

При розробці технології виготовлення деталі необхідно врахувати дискретність процесу нарощування товщини виробу. При багатопрохідному процесі виготовлення товщина отриманої стінки буде кратна ширині валика з поправкою на величину можливого перекриття попереднього проходу. У даній роботі при використовуваних режимах ширина валика дорівнює 5,5 мм.

Оскільки процес WAAM передбачає створення деталі зі складною геометрією шляхом пошарового нанесення зварних швів, важливо змоделювати геометрію окремого зварного шва, а також процес перекриття декількох швів, щоб досягти високої якості поверхні і точності розмірів виготовлених деталей. Дінг і ін. в своїй роботі провели дослідження різних моделей перекриття і встановили, що найоптимальнішою міжцентровою відстанню є величина, що дорівнює 73% від ширини валика [35]. При ширині валика 5,5 мм було вибрано міжцентрову відстань 4 мм (рисунок 5.3). Завдяки перекриттю вдалося знизити повну площу перетину нанесеної деталі, внаслідок чого зменшилося співвідношення між ефективним і повним об'ємами нанесеної деталі, а значить підвищилася ефективність використання матеріалу (рисунок 5.4).

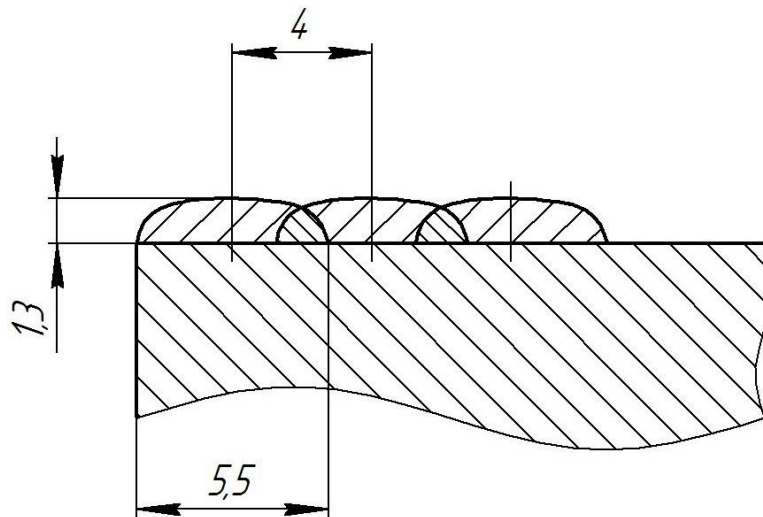


Рисунок 5.3 - Зміщення траєкторії валиків для забезпечення перекриття

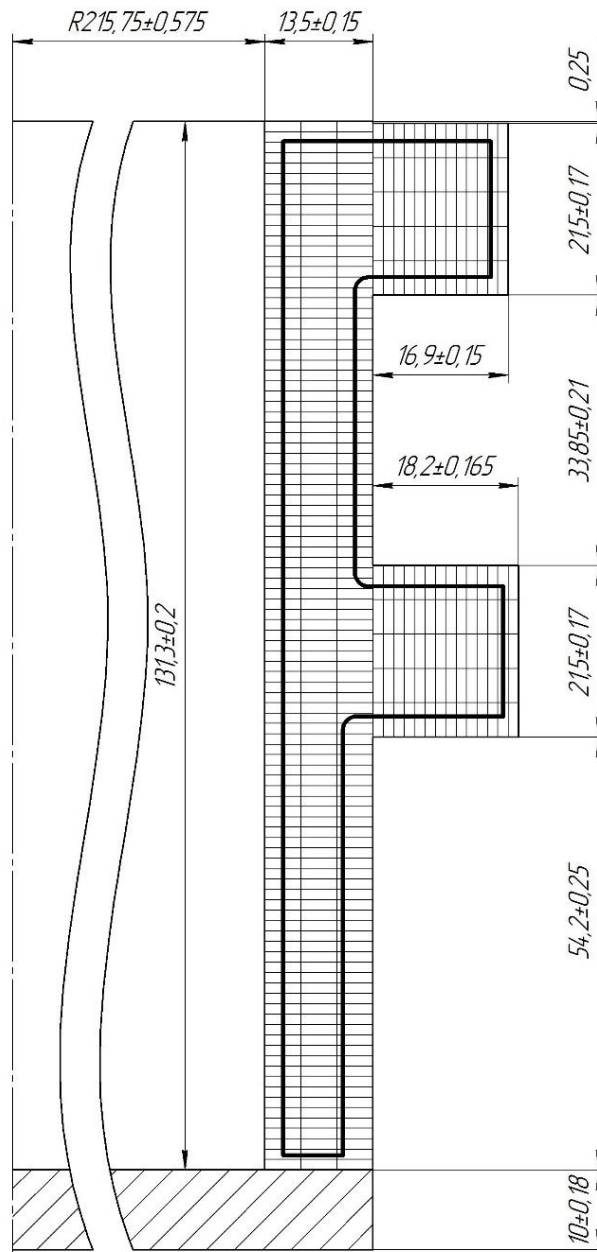


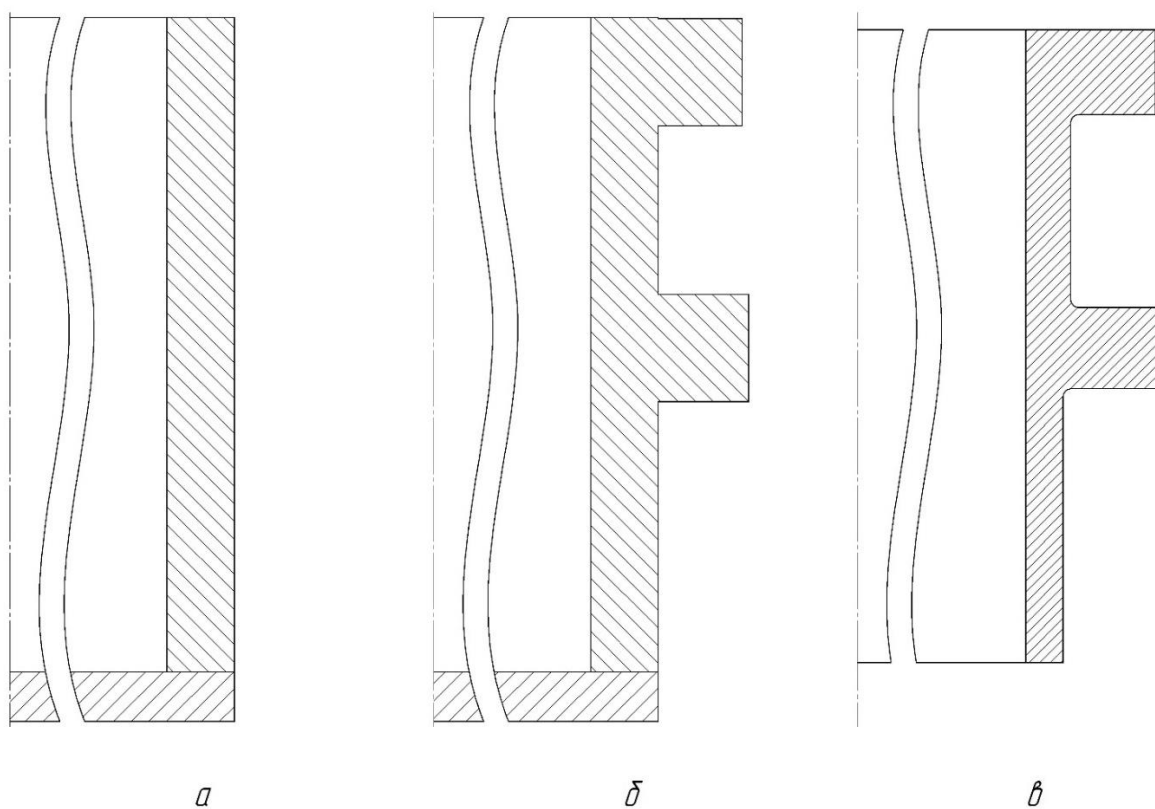
Рисунок 5.4 - Повна і ефективна площа перетину деталі

Для того, щоб після механічної обробки отримати стінку товщиною 9 мм необхідно побудувати стінку, що перевищує величину 9 мм як мінімум на подвійну величину максимальної хвилястості, в даному випадку 3 мм. При виготовленні стінки в три проходи товщина стінки буде 13,5 мм. Величини припусків на чорнову, напівчистову і чистову обробки вказані в таблиці 5.8.

5.5 Послідовність нанесення валиків

Виходячи з геометрії деталі, що виготовляється необхідно розробити оптимальний алгоритм процесу виробництва, завдяки якому буде максимально ефективно використовуватися обладнання, матеріал і час. Виготовлення корпусу можна розділити на три основних етапи. На першому етапі друкується основна обичайка (рисунок 5.5, а). Проходи виконуються послідовно в одному напрямку концентрично від центру виробу. Основна кількість шарів – 101. Кожний шар складається з 3-х проходів. Об'єкт такого типу може бути надрукований з застосуванням маніпулятора з однією віссю обертання або ж без нього, якщо робот має достатню робочу область. В даному випадку діаметр деталі становить 0,5 м, що входить в робочу область практично будь-якого промислового робота. На другому етапі до створеного циліндру додаються фланці (рисунок 5.5, б). Для їх створення заготовку необхідно повернути на 90°. Проходи виконуються послідовно від відкритого краю деталі. Останнім етапом є механічна обробка (рисунок 5.5, в)

Для того, щоб уникнути наплавлення нависаючих об'єктів, а саме фланців, буде використовуватися 2-х осьовий позиціонер, підключений до контролера управління роботом. Також необхідно передбачити надійне кріплення виробу, який після закінчення нанесення шарів буде важити близько 28 кг. Підкладка була спроектована для використання зі столом позиціонера, який має передбачені кріпильні отвори (рисунок 5.6).



а-створення циліндричної обичайки; б-створення фланців; в-механічна обробка

Рисунок 5.5 - Етапи створення зовнішнього корпусу

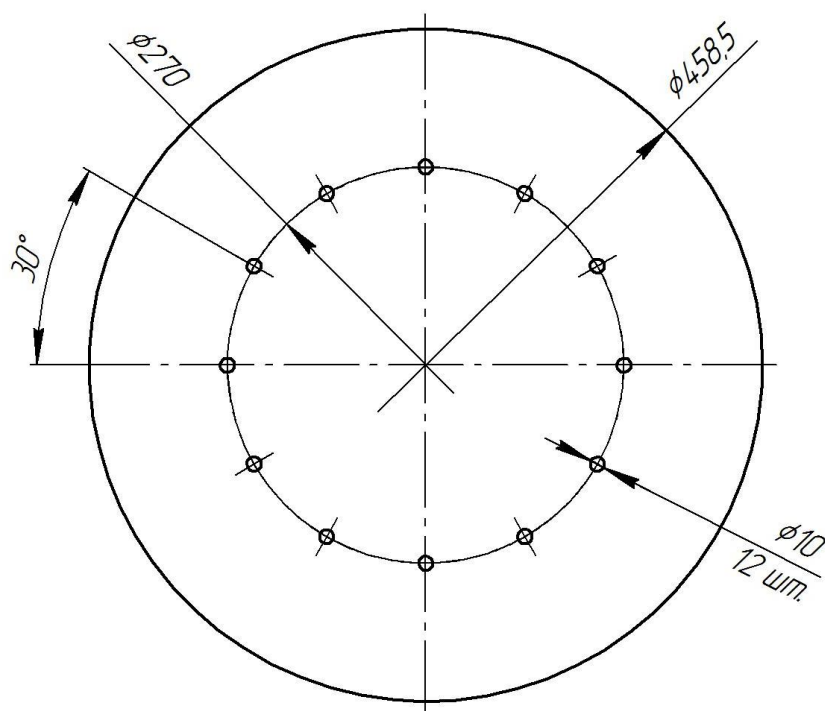


Рисунок 5.6 - Підкладка для виготовлення зовнішнього корпусу камери згоряння

5.6 Параметри режиму WAAM

Для виготовлення зовнішнього корпусу камери згоряння обрані наступні параметри процесу: діаметр зварювального дроту 0,8 мм; сила струму 70 ± 5 А; напруга $16,5 \pm 0,5$ В; швидкість руху пальника 0,42 м/хв; швидкість подачі дроту 6 м/хв; виліт електроду 15 мм; витрата газу 13 ± 1 л/хв. З кожним шаром пальник підіймається на висоту 1,3 мм. Міжпрохідна температура не повинна перевищувати 160°C .

При вказаних параметрах швидкість нанесення матеріалу складає 0,03 кг/хв.

5.7 Термічна симуляція процесу вирощування зовнішнього корпусу камери згоряння

Термічна симуляція процесу WAAM обговорюваної корпусної деталі може надати можливість більш детального дослідження циклу нагріву-охолодження і ефекту акумуляції тепла. На основі проведеного дослідження та розробленої технології проведення термічного аналізу була побудована модель корпусу зовнішнього використовуючи властивості матеріалу, відповідні властивостям дроту ЕП609-Ш (таблиця 5.2).

5.7.1 Створення CAD моделі

Геометрична модель деталі, використовуваної в симуляції, заснована на аналізі геометрії, проведеному в підпункті 5.4. Можлива хвилястість, припуски

на обробку і технологічні елементи були враховані і змодельовані з певним рівнем спрощення (у моделі закладені габаритні розміри виробу з хвилястістю, але текстура хвилястої поверхні не моделювалася задля пришвидшення аналізу).

Проведення термічної симуляції порівняно великого об'єкта, розбитого на велику кількість дрібних елементів займає багато часу і висуває певні вимоги до обчислювальної потужності комп'ютера на деяких етапах проектування. З метою зменшення часу розрахунку, окрім спрощення текстури поверхні, була змодельована лише чверть деталі з використанням симетрії по двох осях (рисунок 5.7).

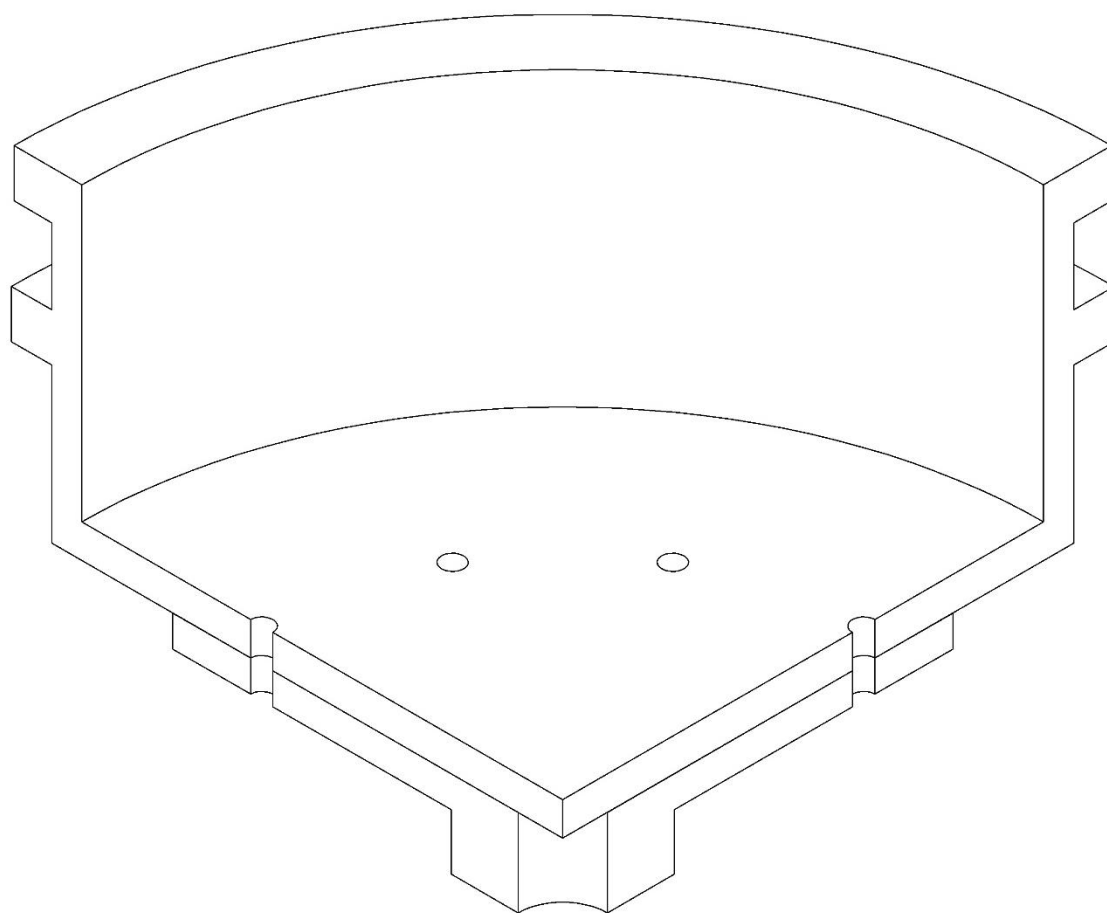


Рисунок 5.7 - Ізометричне зображення створеної моделі

5.7.2 Термічна симуляція процесу виготовлення зовнішнього корпусу камери згоряння

Алгоритм налаштування симуляції базується на досвіді, отриманому під час проведення дослідження, описаного в пункті 3 цієї роботи. Збірка з трьох об'єктів, а саме столу, підкладки і валиків, нанесення яких буде симулюватися були створені у сторонній програмі та імпортовані до Abaqus, де проводилася наступна підготовка та симуляція. Валикам були надані властивості матеріалу дроту, з якого виготовляється корпус (підпункт 5.3), а підкладці та столу були присвоєні властивості низьковуглецевої сталі S235, властивості якої описані в підпункті 3.1. Далі кожна деталь збірки була розбита на окремі елементи. З використанням плагіну AWT була створена послідовність активації елементів і нанесення шарів. В результаті симуляції були отримані температурні поля, які відображають цикл нагріву-охолодження (рисунок 5.8).

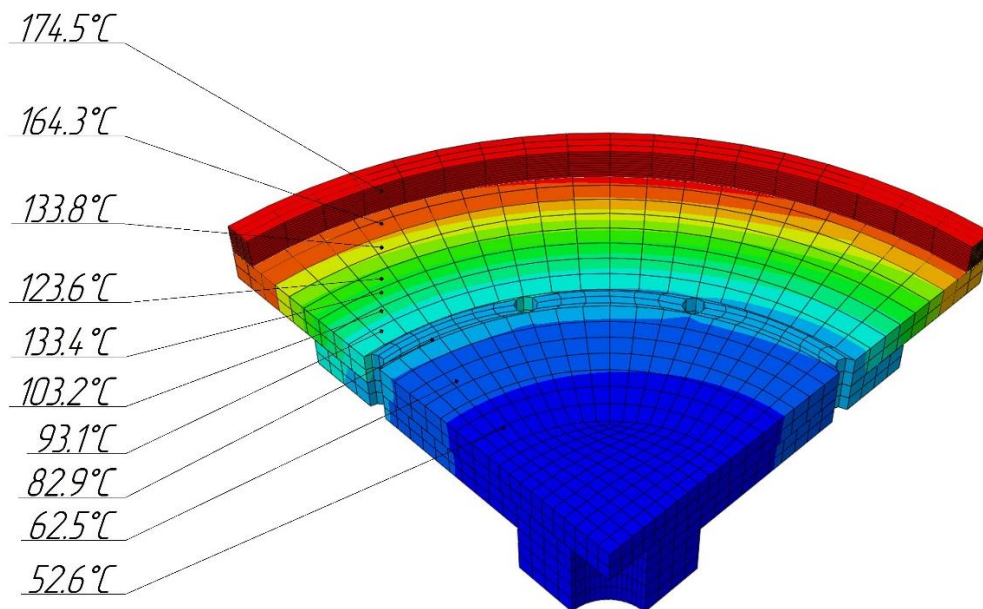


Рисунок 5.8 - Візуальне представлення результату симуляції перших 10 шарів

Для кращого розуміння циклу був побудований графік температури точки, що лежить всередині першого шару (рисунок 5.9). З нього можна побачити, що температура між проходами збільшується протягом перших 3-х шарів (9 проходів). Це демонструє ефект акумуляції тепла. Після 3-го шару міжпрохідна температура стабілізується на відмітці 145-185°C. Слід прийняти до уваги, що рекомендована максимальна міжпрохідна температура для зварювального дроту G 13/4 (ЭП609-Ш) складає 160°C. Під час частини проходів при неперервному нанесенні шарів міжпрохідна температура дещо перевищувала це значення.

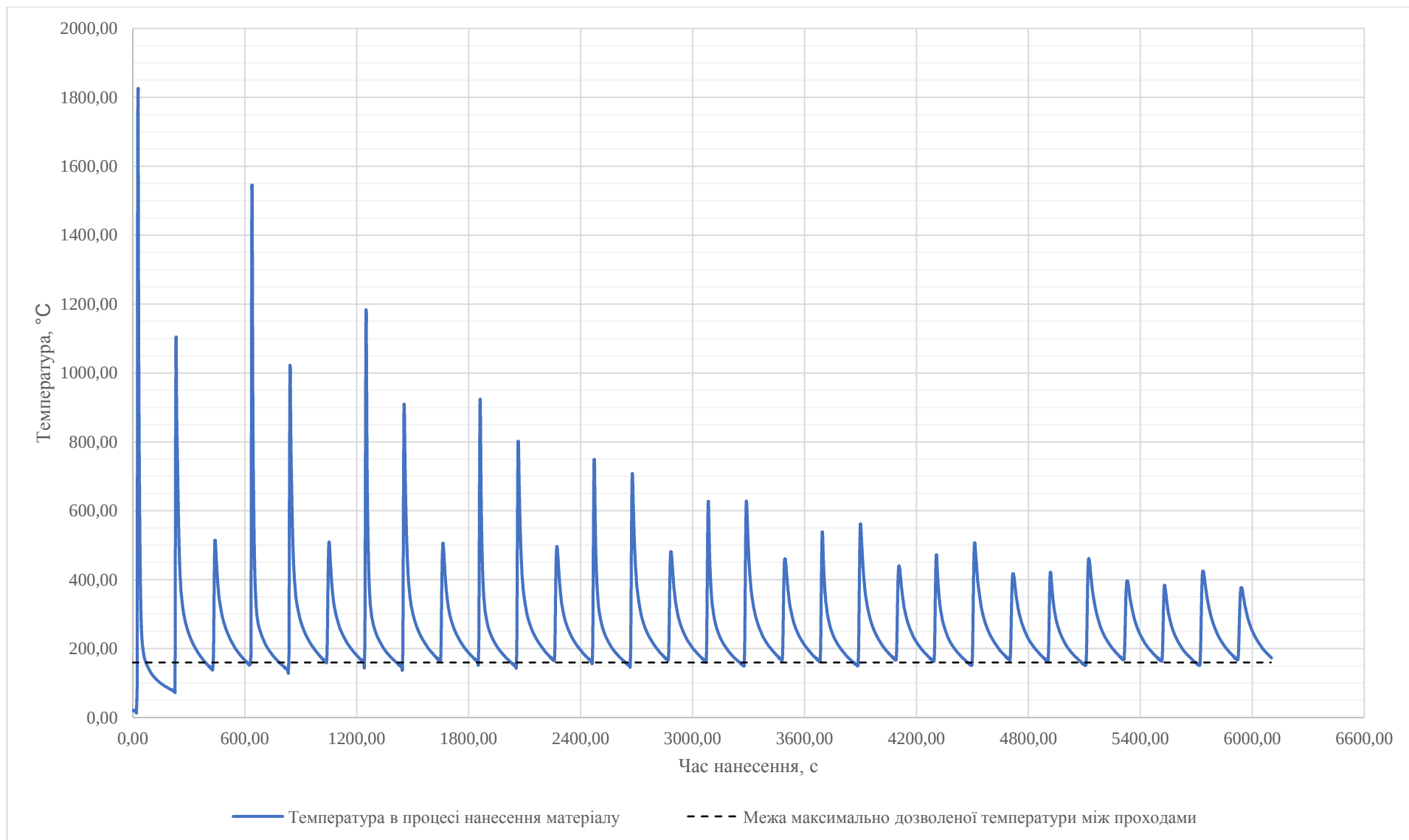


Рисунок 5.9 - Графік циклу нагріву-охолодження для перших 10 шарів

При нанесенні фланців (рисунок 5.10) можна побачити дуже близький діапазон міжпрохідних температур (рисунок 5.11). Це підтверджує твердження про те, що після певного етапу нанесення підвід та відвід тепла урівноважуються та стабілізуються. У даному випадку при будівництві фланців не відбувається суттєвої акумуляції тепла через невелику висоту фланця по відношенню до його ширини. Тепловий потік крізь фланець до основного циліндру корпусу має достатню величину, через що міжпрохідна температура істотно не зростає. Під час неперервного нанесення шарів фланцю міжпрохідна температура перевищила критичну температуру 160°C менш ніж на 10°C .

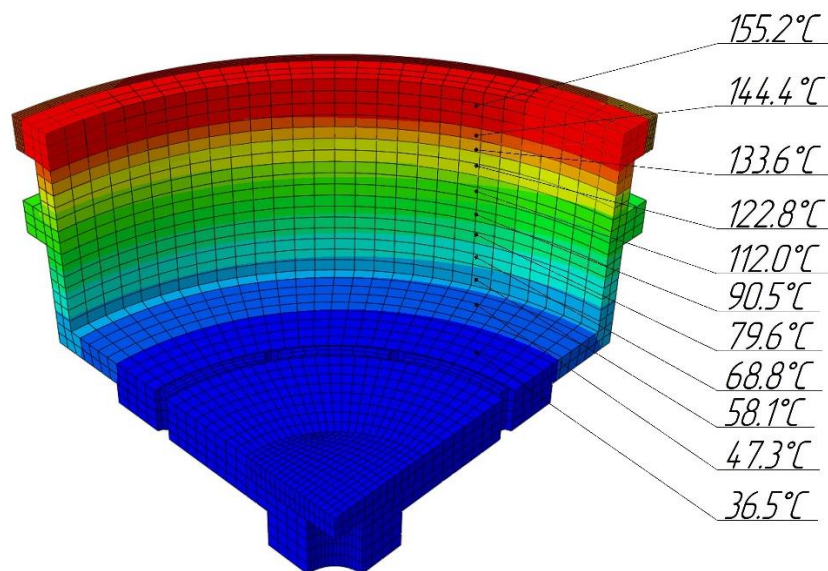


Рисунок 5.10 - Зовнішній корпус камери згоряння після завершення процесу WAAM

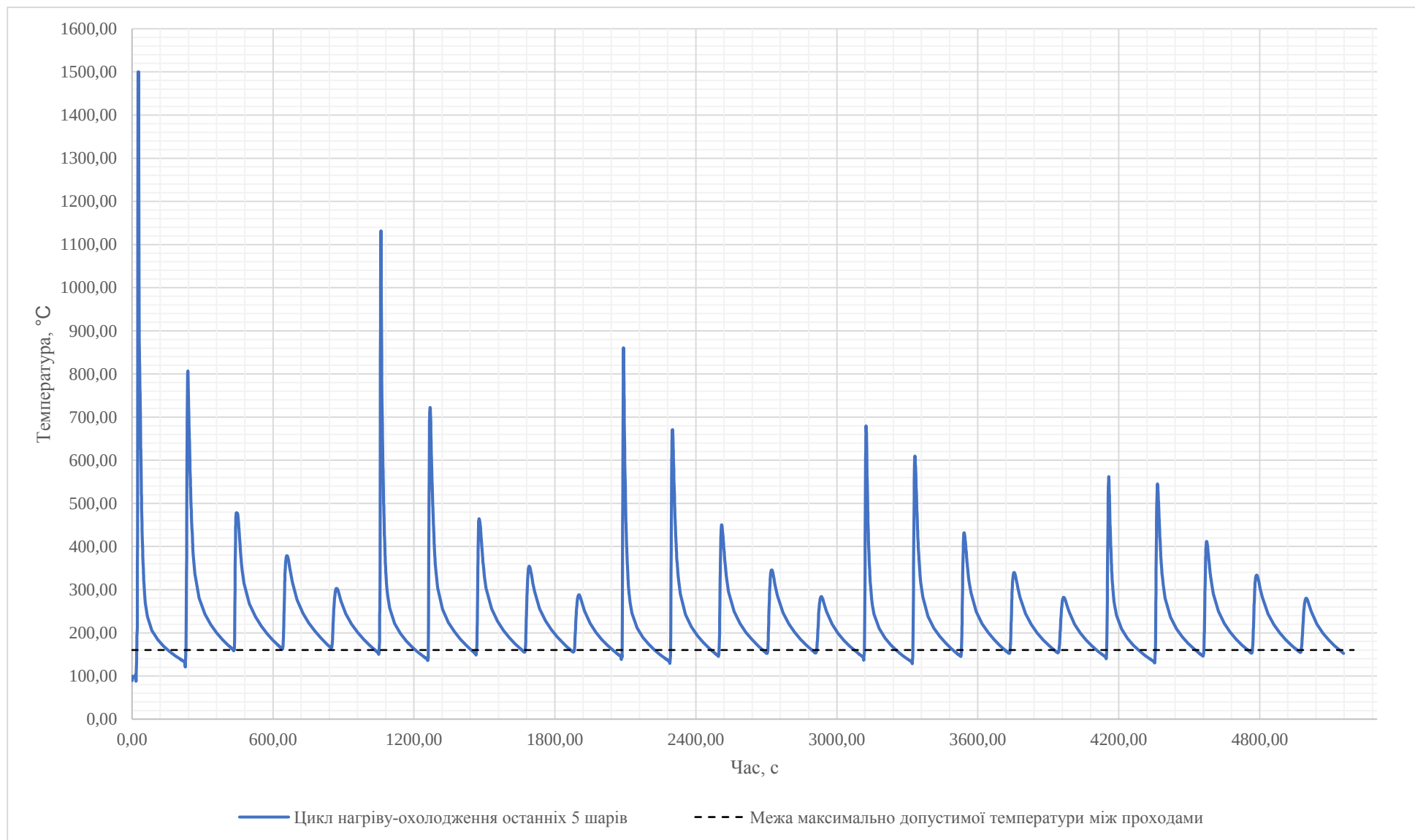


Рисунок 5.11 - Графік циклу нагріву-охолодження для останніх 5 шарів

5.7.3 Оптимізація процесу виготовлення зовнішнього корпусу

Технологія WAAM має декілька суттєвих переваг перед іншими АТ, що використовують метал у якості присадного матеріалу. І навіть не зважаючи на те, що вже є багато прикладів застосування цієї технології у виробництві, вона все ще потребує посиленої уваги при застосуванні. В залежності від матеріалу і геометричних параметрів виробу під час процесу нанесення може виявлятися ефект акумуляції тепла, який може привести до таких небажаних наслідків, як змінення геометрії валика та виробу, а також пороутворення. З метою уникнення цих дефектів необхідно провести оцінку циклу нагріву-охолодження і при необхідності вжити заходи щодо забезпечення оптимальних параметрів температури.

Для оцінки циклу нагріву-охолодження була розроблена і проведена цифрова симуляція процесу WAAM (підрозділ 5.7.2). Згідно аналізу міжпрохідна температура дещо перевищувала критичну температуру на величину до 50°C.

Для забезпечення оптимальної міжпрохідної температури є декілька шляхів. Перший з них закладається на етапі розробки технології виготовлення та створення програми і полягає у розробці оптимального алгоритму накладання валиків. Для дослідження різних можливих алгоритмів накладання валиків з термічної точки зору необхідно проводити ряд експериментів або розробити термічний аналіз і провести симуляцію.

Інший шлях це попередження, тобто обмеження кількості тепла, що вноситься до матеріалу під час виробництва. Так як технологія WAAM базується на GMAW, то її також можна характеризувати перенесенням металу з дроту в зварювальну ванну. Тип перенесення визначає особливості процесу. Історично вважається, що існує три основні режими перенесення металу:

- з короткими замиканнями (dip-перенос, коротка дуга);
- крапельний (spray);
- імпульсний.

Перенесення з короткими замиканнями поєднує в собі низьке споживання струму, низьке тепловнесення при невеликому діаметрі дроту. Недавні розробки в галузі обладнання, пов'язані з досягненнями в області інверторних технологій та електронного керування, привели до покращення процесу, включаючи поліпшення в управлінні і стабільності процесу з короткими замиканнями.

Для збільшення контролю над циклом перенесення металу були розроблені такі технології, як Fronius Cold Metal Transfer (CMT), EWM ColdArc®, Lincoln Electric Surface Tension Transfer (STT), Miller Regulated Metal Deposition (RMD™), Kemppi FastROOT, Jetline Controlled Short Circuit (CSC™) MIG, Daihen Corp. Controlled Bridge Transfer (CBT), Merkle ColdMIG та ESAB QSet™.

Ще одним шляхом може бути боротьба з наслідками, тобто контроль міжпрохідної температури вже після нанесення. Одним з методів може бути додавання додаткового часу очікування на охолодження. В цей час валики будуть охолоджуватися за рахунок конвекції та теплопереносу у тіло виробу. Додатковим методом є застосування активного охолодження стиснутим повітрям, захисним газом або іншими газами. За рахунок пришвидшення потоку газу повз поверхню виробу збільшиться кількість тепла, що відводиться шляхом конвекції. Також можливе застосування підкладок, виготовлених з матеріалів з великим значенням теплопровідності, або активно охолоджуваних підкладок.

В цій роботі аналіз циклу нагріву-охолодження при виготовленні зовнішнього корпусу камери згоряння методом WAAM показав, що міжпрохідна температура виходить за межі критичної температури не більш ніж на 50°C. Зважаючи на те, що один робот одночасно обслуговує два позиціонери, тобто один робот виготовляє два вироби з почерговим нанесенням валиків на кожному з них, то між кожним проходом одного виробу буде присутній час на охолодження, рівний часу нанесення цього валика. Отже, з додаванням часу очікування середня міжпрохідна температура буде значно нижча (рисунок 5.12).

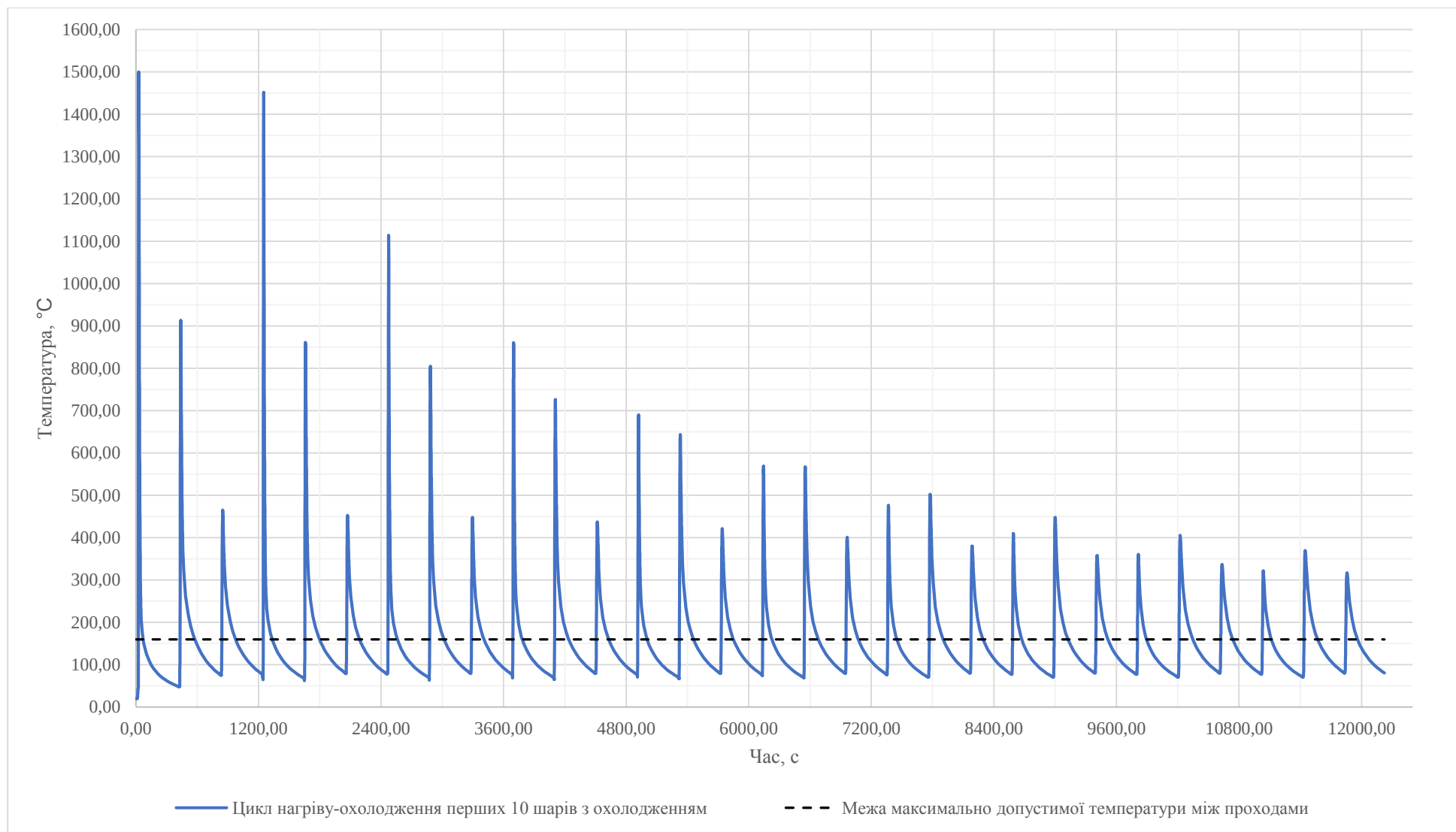


Рисунок 5.12 - Цикл нагріву-охолодження перших 10 шарів з охолодженням

5.8 Обладнання для процесу WAAM

5.8.1 Робот

Для розробленого технологічного процесу було обрано промисловий універсальний 6-и осевий робот ABB IRB2400 (рисунок 5.13). Вантажопідйомність робота складає 16 кг, чого з запасом вистачить для утримання пальника з механізмом подачі дроту. Точність позиціонування складає 0,03 мм. Точність повторювання шляху складає 0,15 мм. Робот захищений за класами захисту IP67 та IP54. Цей робот здатен виконувати роботу на відстані до 1,55 м.



Рисунок 5.13 - Промисловий робот ABB IRB2400

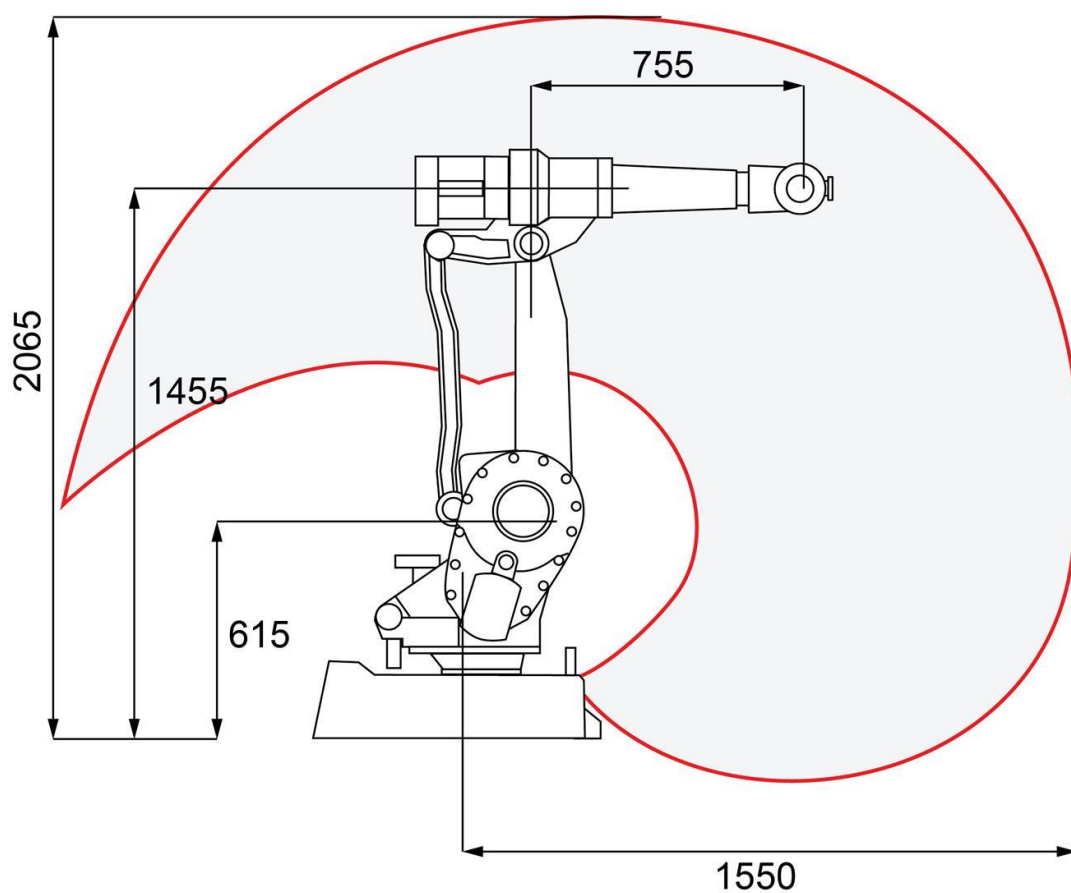


Рисунок 5.14 - Робоча зона роботи ABB IRB2400

Таблиця 5.3 - Характеристика рухів роботи ABB IRB2400

Вісь руху	Робочий діапазон, °	Максимальна швидкість, °/с
Вісь 1 (обертання)	від +180 до -180	150
Вісь 2 (передпліччя)	від +110 до -100	150
Вісь 3 (передпліччя)	від +65 до -60	150
Вісь 4 (обертання)	від +200 до -200 опціонально: необмежено	360
Вісь 5 (згинання)	від +120 до -120	360
Вісь 6 (повертання)	від +400 до -400	450

Таблиця 5.4 - Технічна інформація для робота ABB IRB2400

Живлення та споживання енергії	
Живлення	200-600 В, 50/60 Гц
Споживання енергії	0,67 кВт при тесті ISO-куб на максимальній швидкості
Фізичні характеристики	
База робота	723×600 мм
Висота робота	1564 мм
Вага робота	380 кг
Навколишнє середовище	
Температура навколишнього середовища під час операції	Від +5°C до +45°C
Відносна вологість	Максимально 95%
Рівень шуму	Максимально 70 дБ
Випромінювання	ЕМС/ЕМВ-захищений

5.8.2 Позиціонер

Для утримання підкладки та найкращого позиціонування виробу у просторі обрано два 2-осевих позиціонера ABB IRBP A-250 (рисунок 5.15). Позиціонер забезпечує точне переміщення виробу під час нанесення валиків.

Позиціонери ABB оптимізовані для маніпулювання деталями при дуговому зварюванні, термічному різанні та інших застосуваннях. Всі осі можуть бути повністю узгоджені з роботом при програмуванні, а також під час роботи. Модульна конструкція, малочислені деталі, що призначені для напружених роботи, а також мінімальні вимоги до обслуговування роблять позиціонер дружнім до обслуговування. Динамічне моделювання дозволяє робити швидкі прискорення, виконувати швидкі рухи та зміну орієнтації, через що час циклу

було зведено до мінімуму. Динамічна модель автоматично компенсує вплив сили тяжіння, інерції та тертя для забезпечення швидких та точних рухів слідуючи запрограмованому шляху. Основні параметри позиціонера вказані в таблиці 5.5.



Рисунок 5.15 - Позиціонер ABB IRBP A-250

Таблиця 5.5 - Параметри позиціонера ABB IRBP A-250

Вантажопідйомність, кг	Максимальний тривалий обертаючий момент, Нм	Точність повторювання (для $r=500$), мм	Максимальна швидкість обертання осі 1, °/с	Максимальна швидкість обертання осі 2, °/с
250	350	$\pm 0,05$	150	180

5.8.3 Контролер

Контролер промислового робота є частиною роботизованої одиниці і призначений контролювати рухи робота та застосування додаткових функцій. Взаємодія оператора з рукою робота відбувається через контролер. Контролер

дозволяє використовувати та керувати додатковим обладнанням, таким як позиціонери, джерела зварювального струму, центри обслуговування пальника, взаємодіяти з додатковими сенсорами та ін. Для взаємодії з роботом ABB IRB2400 було обрано контролер ABB IRC5 (рисунок 5.16).



Рисунок 5.16 - Контролер ABB IRC5

5.8.4 Центр обслуговування пальника

Використання додаткового обладнання посилює контроль над процесом наплавлення, підвищує його стабільність і якість. За допомогою центра обслуговування та калібрування пальника ABB TSC2013 (рисунок 5.17) можна здійснити калібрування інструменту робота, тобто визначити точні координати положення пальника, очистити пальник та забезпечити контроль довжини вильоту зварювального дроту.

Найважчі навантаження в роботизованому комплексі має зварювальний пальник. Він піддається впливу тепла, бризок від зварювання і, в гіршому

випадку, зіткнень. Зварювальні пальники виготовлені для таких умов, але потребують регулярного очищення, вимірювання та визначення центральної точки інструменту (ЦТІ) для того, щоб проводити зварювання якісно та з високою точністю. Центр обслуговування пальника складається з трьох основних блоків - механічного очищувача пальника, сенсора для визначення ЦТІ та механізму, що відрізає дріт.

Регулярне підтвердження ЦТІ необхідне, оскільки існує ряд речей, які можуть призвести до того, що зварювальний пальник не знаходиться в правильному положенні:

- зіткнення з деталлю, затискачами та ін.;
- неправильно визначена ЦТІ;
- після заміни зварювального пальника;
- після заміни мундштука пальника.



Рисунок 5.17 - Центр обслуговування та калібрування пальника ABB
TSC2013

5.8.5 Джерело зварювального струму

Стабільність процесу нанесення металу та постійність параметрів забезпечуються джерелом струму. Для виготовлення зовнішнього корпусу камери згоряння було обрано джерело струму інверторного типу Aristo Mig U5000iw компанії ESAB (рисунок 5.18). Апарат має широкий діапазон запрограмованих синергетичних параметрів; пульт керування Aristo Pendant U82 Plus визначає і зберігає настройки синергетичних параметрів для будь-якої комбінації матеріалів і газів. Система The TrueArcVoltage System вимірює правильне значення напруги дуги, яке не залежить від довжини з'єднувального кабелю, зворотного кабелю або зварювального пальника. Технічні параметри джерела зварювального струму надані в таблиці 5.6.



Рисунок 5.18 - Джерело зварювального струму Aristo Mig U5000i

Таблиця 5.6 - Технічні характеристики джерела зварювального струму
Aristo Mig U5000i

Параметр	Значення
Живлення	460 В, 3 фази, 60 Гц
Діапазон налаштувань для GMAW	16-500 А / 8-60 В
Дозволене навантаження: для тривалості включення 60% для тривалості включення 100%	500 А / 39 В 400 А / 34 В
Напруга холостого ходу	68-88 В
Режим збереження енергії	50 Вт
Споживаєма потужність	23 кВт
Коефіцієнт потужності при максимальній силі струму	0,85
Ефективність при максимальній силі струму	86%
Напруга керування	42 В, 50/60 Гц
Габарити, Д×Ш×В	625×394×496 мм
Клас захисту	IP 23
Клас ізоляції	Н
Діапазон температур праці	Від -10 до +40
Вага	69 кг

5.8.6 Пальник

Для виконання процесу нанесення металу було обрано пальник Aristo RT 2 (рисунок 5.19). Цей пальник було розроблено для використання з роботами зі стандартним зап'ястям (кабелі проходять зовні). Для цієї моделі пальника доступний широкий вибір мундштуків різної довжини та куту нахилу.

Монтування пальника виконується на спеціальний кронштейн, який змонтовано на датчику зіткнень KS-1 (рисунок 5.19). Датчик зіткнень є

важливою частиною системи захисту робота. При зіткненні зі сторонніми об'єктами в датчику розмикається контакт і контролер отримує сигнал зупинити рух. Завдяки цьому компоненту запобігаються поломки редукторів та пальника, деформації несучих компонентів та збиття калібрації інструменту.



Рисунок 5.19 - Пальник Aristo RT 2 з датчиком зіткнень KS-1

5.8.7 Механізм подачі дроту

Механізм подачі дроту відіграє дуже важливу роль у WAAM. Від механізму подачі дроту залежить стабільність і точність подачі дроту. Для виготовлення зовнішнього корпусу камери згоряння було обрано механізм подачі дроту Aristo RoboFeed 3004w (рисунок 5.20). Він включає систему контролю подачі, функції керування продувки та подачі газу та рух дроту у два боки. Механізм обладнаний кріпильними болтами з гумовими поглиначами для захисту компонентів від різкого прискорення та уповільнення робота. 4-х роликовий механізм подачі з канавками як у ведучих, так і в притискних роликах

забезпечує стабільну подачу та низький знос дроту, що допомагає забезпечити надійну подачу дроту. Механізм подачі легкодоступний і всі зношені деталі можна замінити без інструментів. Усі електронні компоненти захищені в окремому відсіку.



Рисунок 5.20 - Механізм подачі дроту Aristo RoboFeed 3004w

Таблиця 5.7 - Технічні характеристики механізму подачі дроту Aristo RoboFeed 3004w

Параметр	Значення
Напруга живлення, В, Гц	42, 50/60
Механізм подачі	4 ведучих колеса
Розмір ведучих роликів, мм	30
Швидкість подачі дроту, м/хв	0,8-30
Габарити Д×Ш×В, мм	362×246×235
Вага, кг	7,3
Контроль швидкості	Імпульсний енкодер
Клас захисту корпусу	IP 23
Розмір дроту, мм	0,6-1,6

5.9 Створення програми робота

Програмування промислового робота можна здійснювати онлайн і оффлайн. Схема оффлайн програмування робота для виготовлення зовнішнього корпусу камери згоряння зображена на рисунку 5.21. При створенні керуючої програми задається траєкторія руху пальника, рухи позиціонерів, налаштовується джерело струму, механізм подачі дроту та додаткові функції.

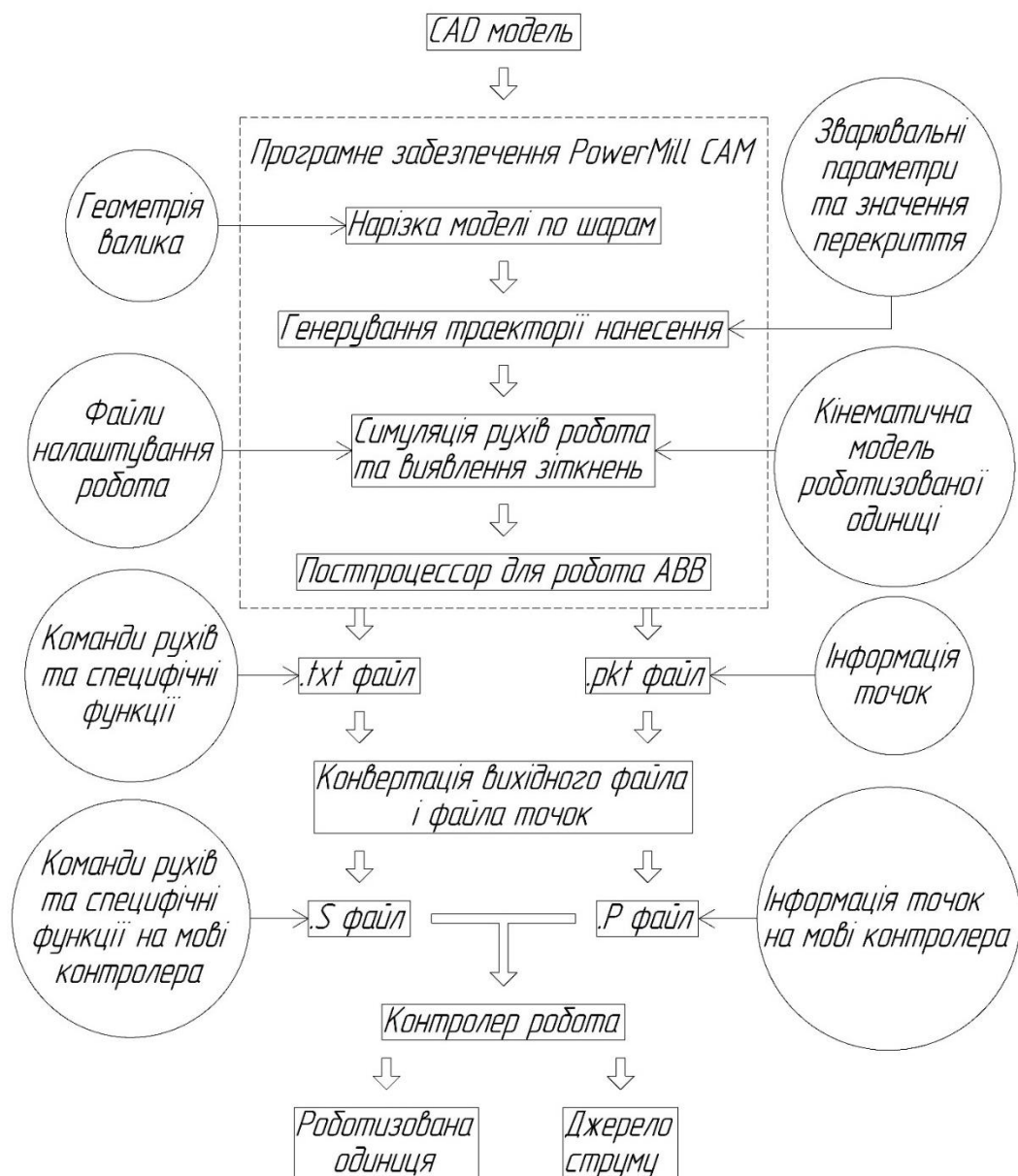


Рисунок 5.21 – Схема оффлайн програмування роботи

5.10 Контроль якості

Для отримання гарантованої якості виробу необхідно забезпечити контроль показників на вході і моніторинг процесу виробництва в режимі реального часу. Втілення цього принципу на практиці є складним і дорогим, особливо з урахуванням новизни процесів адитивного виробництва, необхідної інфраструктури, рівня цифровізації і організації моніторингу. А дорогий і трудомісткий процес проведення випробувань для контролю і посвідчення якості відлякує виробників і користувачів технології. Для отримання максимальної вигоди від впровадження АТ потрібно забезпечити заводський стандарт якості власних надрукованих деталей.

Для забезпечення якості зовнішнього корпусу камери згоряння необхідно виконувати візуальний контроль під час нанесення матеріалу та після завершення друку перед механічною обробкою. Важливими параметрами для контролю є температура між проходами, постійність вильоту електродного дроту та висота валика у передбачених межах. Після завершення нанесення шарів зовнішній корпус має мати допустимі геометричні розміри та не мати деформацій. Після механічної обробки проводиться повний візуальний та люмінесцентний контроль згідно умов для корпусних деталей ГТД.

5.11 Механічна обробка виробу

5.11.1 Токарна обробка виробу, виготовленого методом WAAM

У зовнішньому корпусі камери згоряння для механічної обробки можна виділити кілька типів поверхонь: зовнішні, внутрішні і торцеві. Для кожної поверхні розраховується свій режим різання. Згідно з кресленням виробу

(рисунок 5.2) дві поверхні є базовими. Відносно цих поверхонь ведеться обробка інших поверхонь і забезпечується допустима величина биття.

При проектуванні технології виготовлення зовнішнього корпусу камери згоряння методом WAAM було закладено мінімально необхідні значення припуску для механічної обробки, які також враховують величину хвилястості поверхні (рисунок 5.22).

Розрахунок глибини різання починається після визначення типу обробки. Черновим точінням видаляється близько 60% припуску. Напівчистовим точінням видаляється 30%. А решта 10% (0,25-0,7) мм залишаються на чистову обробку. Розрахунок режимів різання для обробки зовнішнього корпусу камери згоряння, виготовленого методом WAAM, зведений у таблицю 5.8. Розрахункова вага видаленого матеріалу складає 9,74 кг.

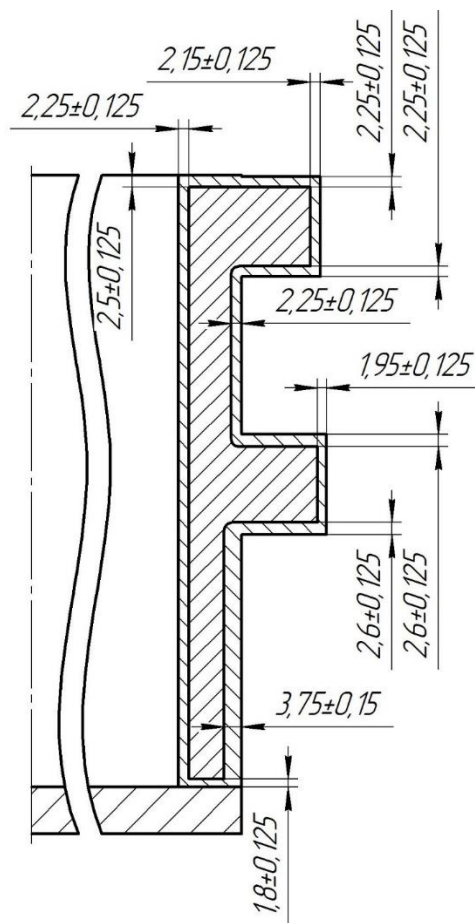


Рисунок 5.22 - Ескіз перерізу виробу з основними припусками на механічну обробку

Таблиця 5.8 - Розрахунок режимів різання для обробки виробу, виготовленого методом WAAM [36]

Зміст переходу	Вид робіт	Глибина різання, мм	Довжина робочого ходу, мм	Припуск, мм	Швидкість різання, м/хв	Частота обертання шпинделя, об/хв	Хвилинна подача, мм/хв	Основний час робочого ходу, хв	Число робочих ходів	Розрахункова потужність різання, кВт
Точіння торця	Чорнове	1,50	30,4	1,50	117	76	72	0,42	1	6,4
	Напівчистове	0,75	30,4	0,75	207	134	34	0,91	1	2,0
	Чистове	0,25	30,4	0,25	244	158	40	0,77	1	0,8
Розточування внутрішньої поверхні	Чорнове	1,35	131,3	1,35	95	70	67	1,95	1	5,8
	Напівчистове	0,65	131,3	0,65	169	125	31	4,20	1	1,8
	Чистове	0,25	131,3	0,25	195	144	36	3,64	1	0,8
Перестановка в патроні										
Відрізання										
Точіння торця меншого фланця	Чорнове	1,35	16,9	1,35	117	76	75	0,52	1	5,9
	Напівчистове	0,65	16,9	0,65	211	137	34	0,49	1	1,8
	Чистове	0,25	16,9	0,25	244	158	40	0,43	1	0,8
Точіння торців більшого фланця	Чорнове	1,60	18,2	1,60	117	75	70	0,26 (x2)	1	6,7
	Напівчистове	0,75	18,2	0,75	207	133	33	0,55 (x2)	1	2,0
	Чистове	0,25	18,2	0,25	244	157	39	0,46 (x2)	1	0,8
Точіння зовнішньої поверхні меншого фланця	Чорнове	1,20	17,0	1,20	117	76	78	0,22	1	5,4
	Напівчистове	0,70	17,0	0,70	209	135	34	0,50	1	1,9
	Чистове	0,25	17,0	0,25	244	158	40	0,43	1	0,8

Продовження таблиці 5.8

Зміст переходу	Вид робіт	Глибина різання, мм	Довжина робочого ходу, мм	Припуск, мм	Швидкість різання, м/хв	Частота обертання шпинделя, об/хв	Хвилинна подача, мм/хв	Основний час робочого ходу, хв	Число робочих ходів	Розрахункова потужність різання, кВт
Точіння зовнішньої поверхні більшої фланця	Чорнове	1,65	16,3	1,65	117	75	70	0,23	1	6,8
	Напівчистове	0,70	16,3	0,70	209	134	34	0,48	1	1,9
	Чистове	0,25	16,3	0,25	244	157	39	0,41	1	0,8
Точіння зовнішньої поверхні між фланцями	Чорнове	1,35	38,7	1,35	118	82	80	0,49	1	5,9
	Напівчистове	0,65	38,7	0,65	211	147	37	1,05	1	1,8
	Чистове	0,25	38,7	0,25	244	169	42	0,91	1	0,8
Точіння зовнішньої поверхні меншого циліндра	Чорнове	2,00	56,8	2,00	118	82	69	0,82	1	7,9
	Напівчистове	1,40	56,8	1,40	188	131	33	1,73	1	3,5
	Чистове	0,35	56,8	0,35	232	161	40	1,41	1	1,0
Точіння торця	Чорнове	1,00	7,5	1,00	119	84	90	0,08	1	4,7
	Напівчистове	0,55	7,5	0,55	217	153	38	0,20	1	1,5
	Чистове	0,25	7,5	0,25	244	172	43	0,17	1	0,8

5.11.2 Токарна обробка виробу, виготовленого зі злитку

При проектуванні технології виготовлення зовнішнього корпусу камери згоряння методом механічної обробки зі злитку або поковки було закладено стандартні значення припуску для механічної обробки. Поперечний переріз злитку та розміри припусків на обробку зображені на рисунку 5.23.

Розрахунок режимів різання для виготовлення зовнішнього корпусу камери згоряння зі злитку зведений у таблицю 5.9.

Розрахункова вага видаленого матеріалу складає 39,84 кг.

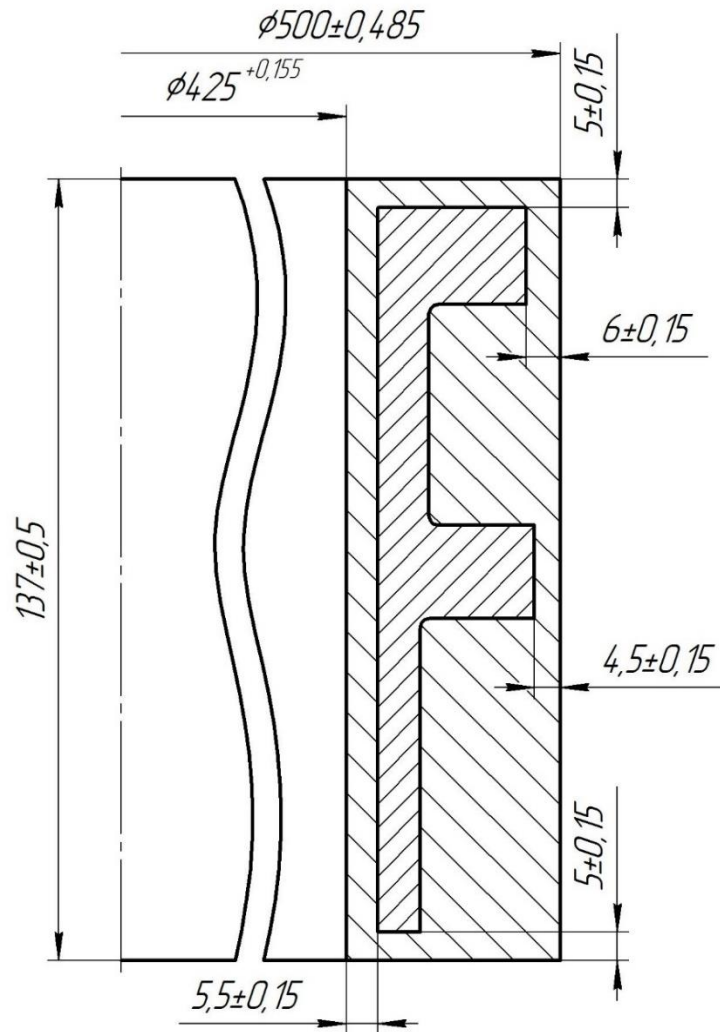


Рисунок 5.23 - Ескіз перерізу виробу для виготовлення зі злитку

Таблиця 5.9 - Розрахунок режимів різання для обробки виробу, виготовленого зі злитку [36]

Зміст переходу	Вид робіт	Глибина різання, мм	Довжина робочого ходу, мм	Припуск, мм	Швидкість різання, м/хв	Частота обертання шпинделя, об/хв	Хвилинна подача, мм/хв	Основний час робочого ходу, хв	Число робочих ходів	Розрахункова потужність різання, кВт
Точіння торця	Чорнове	1,50	37,5	3,00	117	74	71	1,05	2	6,4
	Напівчистове	1,50	37,5	1,50	186	119	30	1,26	1	3,7
	Чистове	0,50	37,5	0,50	220	140	35	1,07	1	1,4
Розточування внутрішньої поверхні	Чорнове	1,75	137	3,50	95	71	62	4,42	2	7,1
	Напівчистове	1,50	137	1,50	149	112	28	4,89	1	3,7
	Чистове	0,50	137	0,50	176	132	33	4,15	1	1,4
Перестановка в патроні										
Точіння зовнішньої поверхні меншого циліндра	Чорнове	2,50	56	22,50	116	74	59	8,49	9	9,3
	Напівчистове	1,50	56	1,50	186	119	30	1,88	1	3,7
	Чистове	0,50	56	0,50	220	140	35	1,60	1	1,4
Точіння зовнішньої поверхні між фланцями	Чорнове	2,10	30,7	21,00	116	74	63	4,86	10	8,2
	Напівчистове	1,50	30,7	1,50	186	119	30	1,03	1	3,7
	Чистове	0,50	30,7	0,50	220	140	35	0,88	1	1,4
Точіння зовнішньої поверхні меншого фланця	Чорнове	2,00	21,0	4,00	117	74	64	0,65	2	7,9
	Напівчистове	1,50	21,0	1,50	186	119	30	0,71	1	3,7
	Чистове	0,50	21,0	0,50	220	140	35	0,60	1	1,4

Продовження таблиці 5.9

Зміст переходу	Вид робіт	Глибина різання, мм	Довжина робочого ходу, мм	Припуск, мм	Швидкість різання, м/хв	Частота обертання шпинделя, об/хв	Хвилинна подача, мм/хв	Основний час робочого ходу, хв	Число робочих ходів	Розрахункова потужність різання, кВт
Точіння зовнішньої поверхні більшої фланця	Чорнове	1,5	24,3	3,00	117	74	71	0,68	2	6,4
	Напівчистове	1,5	24,3	1,5	186	119	30	0,82	1	1,9
	Чистове	0,5	24,3	0,5	220	140	35	0,69	1	1,4
Точіння торця меншого фланця	Чорнове	2,00	17,0	2,00	117	74	64	0,26	1	7,9
	Напівчистове	1,50	17,0	1,50	186	119	30	0,57	1	3,7
	Чистове	0,50	17,0	0,50	220	140	35	0,48	1	1,4
Точіння торців більшого фланця	Чорнове	2,00	20,0	2,00	117	74	64	0,31 (x2)	1	7,9
	Напівчистове	1,50	20,0	1,50	186	119	30	0,67 (x2)	1	3,7
	Чистове	0,50	20,0	0,50	220	140	35	0,57 (x2)	1	1,4
Точіння торця	Чорнове	1,50	7,5	3,00	117	74	71	0,21	2	6,4
	Напівчистове	1,50	7,5	1,50	186	119	30	0,25	1	3,7
	Чистове	0,50	7,5	0,50	220	140	35	0,21	1	1,4

5.11.3 Обладнання для механічної обробки

Відповідно до габаритних розмірів заготовок, що проходять механічну обробку, було обрано універсальний токарний верстат DMF MORI SL403 (рисунок 5.24). Цей верстат забезпечує високу швидкість і максимальну точність обробки, має блок охолодження масла в стандартному виконанні, блокову конструкцію для забезпечення високої жорсткості, час перемикання револьверної головки 0,4 сек (1 позиція) та хід задньої бабки 2000 мм.

Основні технічні характеристики верстату вказані у таблиці 5.10.



Рисунок 5.24 - Універсальний механообробний комплекс DMF MORI SL403

Таблиця 5.10 - Технічні характеристики універсального токарного верстату DMG MORI SL403

Параметр	Значення
Максимальний діаметр заготовки	935 мм
Максимальний діаметр точіння	650 мм
Максимальна довжина заготовки при обробці в центрах (що обробляється)	2158 мм
Максимальний діаметр затискного патрона	533 мм
Максимальна частота обертання шпинделя	2400 об/хв
Потужність (тривалість включення 100%)	30 кВт (АС)
Крутний момент (тривалість включення 100%)	2626 Нм
Кількість приводних інструментів / максимальна частота обертів	12/3000 об/хв
Прискорений хід осей X / Y / Z	20/24 м/хв
Вага верстата	15000 кг
Висота/ширина/глибина	2455/3789/2338 мм

6 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗРАХУНОК

У даному розділі дипломного проекту надано технічне нормування операцій, виробничу програму, матеріальне забезпечення для виготовлення зовнішнього корпусу камери згоряння ГТД з корозійностійкого сплаву 410NiMo методом WAAM. Розраховано ефективний (дійсний) фонд часу роботи обладнання, необхідну кількість обладнання та чисельність персоналу ділянки.

6.1 Адитивне виробництво з точки зору маркетингу

Адитивне виробництво – це один з видів сучасного виробництва, що найбільш динамічно розвивається і застосовується в автомобілебудуванні, авіабудуванні, космічній галузі, а також в радіоелектронному виробництві, приладобудуванні і медицині. Адитивне виробництво – це клас технологій, ідея якого полягає в створенні деталей складної форми шляхом пошарового нанесення матеріалу відповідно до тривимірної комп'ютерної моделі на відміну від традиційних методів виробництва, заснованих на видаленні матеріалу або методі формування.

Технологія WAAM забезпечує гнучкість, що дозволяє швидко почати виробництво складної, індивідуально розробленої продукції, яка або не може бути виготовлена за допомогою традиційних методів виробництва (виготовлення деталей складної конфігурації, що містять внутрішні канали або закриті порожнини), або потрібна в малих кількостях. Із застосуванням даної технології стає можливим оптимізація конфігурації виробів під спеціальні вимоги, зниження масогабаритних характеристик і поліпшення функціональних особливостей без зниження міцності і довговічності виробів, об'єднання декількох компонентів в одну деталь з метою спрощення збірки і прискорення

виробництва. Мала тривалість стадій розробки і швидкий запуск виробу у виробництво збільшують економічну доцільність дрібносерійного виробництва і випуску кастомізованої продукції. Використання сучасних цифрових технологій, програмного забезпечення в сукупності з автоматизацією процесу забезпечує можливість швидкої передачі комп'ютерної 3D-моделі в будь-яку точку світу, де встановлено відповідний роботизований комплекс, що дозволяє організувати локальне виробництво в світових масштабах, децентралізувати виробництво, спростити логістику, скоротити час поставок, зменшити обсяг складських запасів, організувати виробництво запчастин для ремонту в місцях його проведення під час виникнення потреби.

На теперішній час у аерокосмічній галузі гостро стоїть питання розробки технології, що може замінити теперішні методи виготовлення великих конструкцій, таких як хрестоподібні елементи, панелі з посиленнями, нервюри та інше, які виготовляються із заготовок або великих поковок з неприйнятним співвідношенням Buy-to-Fly. Цей показник являє собою відношення маси початкової заготовки до маси готового виробу; в аерокосмічному секторі значення 10 або навіть 20 не є незвичайними.

Ключові принципи АТ та їх потенційний вплив на прибуток компанії та моделі структури ринку:

- універсальне обладнання: універсальність дозволяє фірмам виробляти кастомізовану продукцію на замовлення; загальні витрати можуть бути нижчими, оскільки зміна товару не передбачає зміни обладнання; зниження витрат при збільшенні різноманітності продукції; менша кількість бар'єрів для мобільності для обслуговування більшої кількості сегментів ринку може призвести до посилення конкурентоспроможності;
- кастомізація та гнучкість без витрат: кастомізована продукція може бути виготовлена без зайвих витрат при виробництві, що потенційно може дозволити підняти ціни на індивідуальні замовлення; відсутність додаткових витрат часу на кастомізацію, що веде до підвищення

попиту на продукт; клієнти можуть отримати найбільш відповідний товар, тоді як ринкові ціни можуть бути нижчими;

- складність без витрат: покращення продукту та зміни у дизайні можна здійснити без втрат у виробництві, що призводить до підвищення попиту на продукт; більш висока складність дизайну не має впливу на собівартість, бо не ускладнює процес виготовлення; незначні витрати на модифікацію та повторне виведення товару на ринок: пропонується більша різноманітність; більша різноманітність продукції без додаткових витрат;
- Скорочення об'єму монтажних робіт: загальний час обробки замовлення може бути скорочений; менше браку через меншу кількість ручної роботи; незначні витрати на модифікацію основної продукції; зниження прямих витрат при виробництві продукції, що вимагає збірки; може привести до зниження прямих витрат при виробництві продукції, що вимагає збірки.

Важливо відмітити, що більшість АТ є молодими у промисловості відносно традиційних методів виготовлення і ринок цих технологій тільки почав інтенсивно розвиватися. Це може означати лише те, що з часом, з поширенням і розвитком цих технологій (зменшення енерговитрат, зниження коефіцієнту Buy-To-Fly, зменшення вартості обладнання) їх економічна ефективність буде тільки зростати.

Однією з цілей цієї роботи є зменшення витрат дорогого матеріалу, що йде на виготовлення однієї деталі. З цією метою пропонується змінити технологію виготовлення деталі, використовуючи існуюче на підприємстві обладнання. В залежності від конфігурації виробу технологія WAAM дозволяє скоротити як найменш у три рази об'єм матеріалу, що видаляється під час механічної обробки.

6.2 Технічне нормування операцій

6.2.1 Норма часу на наплавлення

Основний час нанесення шарів було розраховано виходячи з довжини кола, яке необхідно пройти роботу в кожному проході, і швидкості руху робота за формулою:

$$t_{\text{осн}} = \frac{\pi d}{V} \quad (6.1)$$

де d – діаметр окружності циліндра, що наноситься;

V – швидкість пересування пальника.

Згідно режиму швидкість пересування пальника дорівнює 7 мм/с.
Розраховані значення внесені до таблиць 6.1-6.3.

Таблиця 6.1 - Норма часу на виготовлення основного циліндру корпусу

Проход	1	2	3
Радіус, мм	218,00	222,50	224,75
Довжина траєкторії, мм	1369,73	1398,01	1412,15
Час одного проходу, с	195,68	199,72	201,74
Час одного шару, с	597,13		
Час 101 шару, с	60309,83		

Таблиця 6.2 - Норма часу на виготовлення меншого фланцю корпусу

Номер шару	Радіус, мм	Довжина траєкторії, мм	Час 1-го проходу, с	Час 5-и проходів, с
1	230,55	1448,59	206,94	1034,71
2	231,85	1456,76	208,11	1040,54
3	233,15	1464,92	209,27	1046,37
4	234,45	1473,09	210,44	1052,21
5	235,75	1481,26	211,61	1058,04
6	237,05	1489,43	212,78	1063,88
7	238,35	1497,60	213,94	1069,71
8	239,65	1505,77	215,11	1075,55
9	240,95	1513,93	216,28	1081,38
10	242,25	1522,10	217,44	1087,22
11	243,55	1530,27	218,61	1093,05
12	244,85	1538,44	219,78	1098,88
13	246,15	1546,61	220,94	1104,72
				13906,26

Таблиця 6.3 - Норма часу на виготовлення більшого фланцю корпусу

Номер шару	Радіус, мм	Довжина траєкторії, мм	Час 1-го проходу, с	Час 5-и проходів, с
1	230,55	1448,59	206,94	1034,71
2	231,85	1456,76	208,11	1040,54
3	233,15	1464,92	209,27	1046,37
4	234,45	1473,09	210,44	1052,21
5	235,75	1481,26	211,61	1058,04
6	237,05	1489,43	212,78	1063,88
7	238,35	1497,60	213,94	1069,71
8	239,65	1505,77	215,11	1075,55
9	240,95	1513,93	216,28	1081,38
10	242,25	1522,10	217,44	1087,22
11	243,55	1530,27	218,61	1093,05
12	244,85	1538,44	219,78	1098,88
13	246,15	1546,61	220,94	1104,72
14	247,45	1554,77	222,11	1110,55
				15016,81

Загальний час роботи робота без врахування часу на охолодження між проходами та шарами і без врахування можливих ситуацій аварійних зупинок

робота під час процесу нанесення матеріалу склав 89232,9 секунд, або 1487,215 хвилин, або 24,79 години.

Норма часу для пошарового будування деталі визначається за формулою:

$$t_{\text{напл}} = t_{\text{осн}} + t_{\text{ох}} + t_1 \times k \quad (6.2)$$

де $t_{\text{осн}}$ – основний час, год;

$t_{\text{ох}}$ – час охолодження між шарами, год (приймаємо 30 год);

t_1 – допоміжний час, год;

k – коефіцієнт, що враховує витрати на природні потреби робітника, відпочинок та обслуговування робочого місця.

$$t_{\text{напл}} = 24.79 + 30 + 0.2 \times 1.13 = 55.02 \text{ год} \quad (6.3)$$

Таблиця 6.4 - Технічне нормування операцій

Найменування операції	Норма штучного часу, н/год
Нанесення шарів	55,02
Візуальний контроль якості	0,18
Норма часу на одиницю виробу	55,20

6.2.2 Норма часу на механічну обробку

Згідно з розрахунками режимів різання, вказаних в пункті 5.12.1, загальний час механічної обробки виробу, виготовленого методом WAAM складає 25,0 хв. Цей час включає лише час проходження різця по виробу. Додатково треба включити час на установку і зняття виробу, час на установку і зміну інструментів, час на визначення координат виробу, час на зміну положення виробу та час відрізання підкладки. Час на створення програми обробки для

механообробного устаткування не враховується у цьому розрахунку, бо виконується лише один раз для всієї серії.

Остаточний час механічної обробки виробу, виготовленого методом WAAM зведений в таблиці 6.5:

Таблиця 6.5 - Час механічної обробки виробу, виготовленого методом WAAM

Найменування операції	Час роботи різця	Установка виробу	Зняття виробу	Установка інструментів	Зміна інструментів	Визначення координат	Зміна положення виробу	Відрізання підкладки	Всього
Час, хв	25,0	20,0	10,0	10,0	4,1	4,5	1,0	1,2	75,8

Згідно з розрахунками режимів різання, вказаних в пункті 5.12.2, загальний час виготовлення зовнішнього корпусу зі злитку складає 44,81 хв. Цей час включає лише час проходження різця по виробу.

Остаточний час виготовлення зовнішнього корпусу зі злитку зведений в таблиці 6.6:

Таблиця 6.6 - Час виготовлення зовнішнього корпусу зі злитку

Найменування операції	Час роботи різця	Установка виробу	Зняття виробу	Установка інструментів	Зміна інструментів	Визначення координат	Зміна положення виробу	Всього
Час, хв	44,81	25,00	10,00	20,00	4,10	4,50	1,00	109,41

6.3 Виробнича програма та її матеріальне забезпечення

Основою для розрахунку ділянки з виготовлення зразків для випробувань зварювальних матеріалів є виробнича програма в штуках. У данному дипломному проєкті приймаємо виробничу програму з виготовлення корпусу зовнішнього рівною 200 зразкам.

Таблиця 6.7 - Виробнича програма зразків за рік

Найменування виробу	Норма часу на виріб, н/год	Виробнича програма	
		Одиниць	н/год
Корпус зовнішній	55,2	200	11040

Таблиця 6.8 - Розрахунок потреби в матеріалах і їх вартість

Найменування матеріалу	Норма витрати		Ціна за одиницю матеріалу, грн	Вартість на програму, грн
	На виріб	На програму		
Дріт 410NiMo	28 кг	5600 кг	330	1848000
Захисний газ Ar (80%) + CO ₂ (20%)	16248 л	3249600 л	0,08	259968
Всього	-	-	-	2107968

Транспортні витрати складають 10% від вартості виробів – 210796,8 грн.

Балансова вартість матеріалів з урахуванням транспортних витрат:

$$2107968 + 210796,8 = 2318764,8 \text{ грн} \quad (6.4)$$

6.4 Розрахунок кількості обладнання та площі ділянки

На даній виробничій ділянці однозмінний режим роботи при п'ятиденному робочому тижні – 40 годин. Тривалість робочої зміни 8 годин.

Номінальний фонд часу роботи обладнання для тризмінного режиму роботи робота прийнятий 6000 годин, та для однозмінної роботи слюсаря та контролера якості 2000 год. Ефективний (дійсний) фонд часу роботи обладнання за рік та слюсаря з контролером якості за рік визначаються за формулами 6.5 та 6.6 відповідно:

$$F_{\text{еф}}^{\text{об}} = F_{\text{ном}} \cdot (1 - K_{\text{в}}) = 6000 \cdot (1 - 0,07) = 5580 \text{ год} \quad (6.5)$$

де $F_{\text{ном}}$ – номінальний фонд часу роботи устаткування;

$K_{\text{в}}$ – коефіцієнт витрат часу на ремонт та обслуговування обладнання, $K_{\text{в}} = 0,07$.

$$F_{\text{еф}}^{\text{р}} = F_{\text{ном}} \cdot (1 - K_{\text{в}}) = 2000 \cdot (1 - 0,07) = 1860 \text{ год} \quad (6.6)$$

де $F_{\text{ном}}$ – номінальний фонд часу роботи слюсара та контролера;

$K_{\text{в}}$ – коефіцієнт витрат часу на ремонт і обслуговування устаткування, $K_{\text{в}} = 0,07$.

До складу основних фондів ділянки входять устаткування, будівлі, цінний інструмент і пристосування. Розрахунок необхідної кількості обладнання по кожному типу ведеться за формулою:

$$C_{pi} = \frac{\sum_{i=1}^m t_i N_i}{F_{\text{еф}}^{\text{об}}} \quad (6.7)$$

де m – кількість видів робіт;

t_i – норма часу i -ої операції, год;

N_i – річна програма i -го виробу шт;

$F_{\text{еф}}^{\text{об}}$ – ефективний фонд роботи обладнання в рік.

Прийнята кількість обладнання встановлюється шляхом округлення до цілої величини (C_{po}).

Коефіцієнт завантаження устаткування розраховується за формулою:

$$K_3 = \frac{C_p}{C_{po}} \quad (6.8)$$

де C_p – розрахункова кількість обладнання, од;

C_{po} – прийнята кількість обладнання, од.

При умові, що один робот наплавляє два вироби одночасно, розрахунок кількості роботів для наплавлення проводимо за формулою:

$$C_p = \frac{55,2 \cdot 200}{6000 \cdot 2} = 0.92 \text{ од} \quad (6.9)$$

Приймаємо кількість установок $C_{po} = 1$ од.

$$K_3 = \frac{0.92}{1} = 0.92 \quad (6.10)$$

Розрахунок кількості верстатів для механічної обробки:

$$C_T = \frac{1,25 \cdot 200}{6000} = 0.05 \text{ од} \quad (6.11)$$

Приймаємо кількість установок $C_T = 1$ од.

$$K_3 = \frac{0.05}{1} = 0.05 \quad (6.12)$$

Таблиця 6.9 - Розрахунок кількості обладнання, його потужності і собівартості

Найменування устаткування	Кількість устаткування, шт	Коефіцієнт завантаження, Кз	Ціна устаткування за прејскурантом, грн	Потужність, кВт/год
Робот АВВ IRB 2400 з додатковим обладнанням	1	0,92	714200	0.87
Позиціонер АВВ IRBP А	2	0,92	243700 (x2)	0.6
Контролер АВВ IRC5	1	0,92	305300	0.6
Джерело зварювального струму	1	0,92	415700	9,05
DMG MORI SL 403	1	0,05	2750000	30
Всього	6		4672600	40,92

Транспортні витрати та витрати на установку обладнання складають 10% від вартості устаткування – 467260 грн

Балансова вартість устаткування з урахуванням транспортних витрат:

$$Q_{\text{обор}} = 4672600 + 467260 = 5139860 \text{ грн} \quad (6.13)$$

Балансова вартість цінного інструменту складає 3 % балансовій вартості устаткування:

$$Q_{\text{инстр}} = 5139860 \cdot 0.03 = 154195.8 \text{ грн} \quad (6.14)$$

Балансова вартість виробничого інвентаря приймаємо 2 % від вартості устаткування, а господарського 210 грн на одного робітника і 265 грн на одного керівника.

$$Q_{\text{инв}} = 5139860 \cdot 0.02 + 1735 = 104532.2 \text{ грн} \quad (6.15)$$

де 1735 – вартість господарського інвентаря, грн.

Площа ділянки складає $18 \times 12 = 216 \text{ м}^2$

Вартість будівель визначається на основі розрахованої площі та вартості 1 м^2 будівель (4175 грн за м^2). Вартість споруд становить 5 % вартості будівель.

Вартість будівлі площею 216 м^2 складає 901800 грн. Вартість споруд 45090 грн.

Таблиця 6.10 - Основні фонди ділянки їх структура і амортизаційні відрахування

Групи основних фондів	Балансова вартість, грн	Структура, %	Термін експлуатації (роки)	Річні амортизаційні відрахування, грн
Будівлі	901800,0	14,21	45	20040
Споруди	45090,0	0,71	30	1503
Устаткування	5139860,0	81,00	25	205594,4
Інструмент	154195,8	2,43	10	15419,58
Інвентар	104532,2	1,65	5	20906,44
Загалом	6345478	100		263463,42

6.5 Розрахунок кількості персоналу ділянки

Чисельність основних виробничих робітників – операторів-зварників визначаємо згідно того, що один оператор обслуговує одного робота. Приймаємо один оператор на зміну. При тризмінній роботі загальна кількість операторів приймаємо три чоловіка.

Чисельність основних виробничих робітників – слюсарів на нормованих роботах розраховується по операціям, згідно з розрядами і професіями за формулою:

$$R_o = \frac{\sum_{i=1}^m t_i N_i}{F_{\text{еф}}^p K_{\text{вн}}} \quad (6.16)$$

де m – кількість видів робіт;

t_i – норма часу i -ой операції, год;

N_i – річна програма i -го виробу шт;

$K_{\text{вн}} = 1,05$ – коефіцієнт виконання норм вироблення;

$F_{\text{еф}}^p$ – ефективний фонд роботи робітника в рік.

$$R_o = \frac{1.25 \cdot 200}{1860 \cdot 1.05} = 0.13 \quad (6.17)$$

Приймаємо чисельність слюсарів одна особа, чисельність контролерів якості одна особа. Чисельність допоміжних робітників за професіями розраховується за нормами обслуговування або по робочих місцях. Чисельність керівників на ділянці розраховується згідно зі штатним розкладом. Загальна чисельність персоналу ділянки викладена в таблиці 6.11.

Таблиця 6.11 - Загальна чисельність персоналу

Персонал	Чисельність, чол	За розрядами			За змінами		
		IV	V	VI	I	II	II
Оператор-зварювальник	3	-	-	3	1	1	1
Слюсар	1	-	1		1	-	-
Всього	4	-	1	3	2	1	1
Контролер	1	-	1	-	1	-	-
Налагоджувальник	1	-	-	1	1	-	-
Електрик	1	-	1	-	1	-	-
Всього	3	-	2	1	3	-	-
Майстер	1	-	-	-	1	-	-
Всього	1				1		
Разом	8	-	3	4	6	1	1

6.6 Фонд оплати праці

Сума заробітної плати, яка виплачується працівникам підприємства, утворює фонд заробітної плати. Фонд заробітної плати розраховується згідно з прийнятими формами і системами оплати праці. Цей показник розраховується окремо по кожній групі працівників, і в цілому по ділянці.

Річний фонд зарплати складається з тарифного фонду, доплат і премій.

Тарифний фонд заробітної плати основних працівників-відрядників розраховується по формулі:

$$Z_{\text{відр}} = N_i \sum_{i=1}^n P_i \quad (6.18)$$

де N_i - річна виробнича програма, шт;

n - кількість операцій технологічного процесу;

P_i - розцінка на операцію розраховується по формулі:

$$P_i = C_i \cdot t_i \quad (6.19)$$

де C_i – годинна тарифна ставка відповідного розряду, грн;

t_i – норма часу на операцію, год.

Розрахунок розцінок зведений в таблиці 6.12.

Таблиця 6.12 - Розрахунок розцінок за операціями

Операція	Норма часу, год	Розряд	Годинна тарифна ставка, грн.	Розцінка, грн.
Нанесення шарів	55,2	6	62,93	3473,74
Механічна обробка	1,25	5	55,33	69,16

Тарифний фонд заробітної плати основних працівників, а саме трьох операторів-зварювальників складає:

$$З_{\text{відр,осн}} = 200 \cdot 3473,74 = 694748 \text{ грн} \quad (6.20)$$

Тарифний фонд заробітної плати основних працівників, а саме оператора-слюсаря складає:

$$З_{\text{відр,осн}} = 200 \cdot 69,16 = 13832 \text{ грн} \quad (6.21)$$

Тарифний фонд основної заробітної плати основних робітників складає:

$$694748 + 13832 = 708580 \text{ грн} \quad (6.22)$$

Тарифний фонд додаткової заробітної плати складає 50 % від основної:

$$З_{\text{дод}} = 708580 \cdot 0,5 = 354290 \text{ грн} \quad (6.23)$$

Річний фонд заробітної плати основних робітників:

$$З_{річн} = З_{відр,осн} + З_{дод} = 708580 + 354290 = 1062870 \text{ грн} \quad (6.24)$$

Тарифний фонд заробітної плати допоміжних працівників–погодинників визначається за формулою:

$$З_{доп} = C_i \cdot K_{тар.сер} \cdot F_{еф}^p \cdot R_{доп} \quad (6.25)$$

де C_i – годинна тарифна ставка i -го розряду, грн;

$R_{доп}$ – чисельність допоміжних працівників, чол;

$K_{тар.сер}$ – середній тарифний коефіцієнт.

$$K_{тар.сер} = \frac{\sum_{i=1}^m k_i R_i}{R_{доп}} \quad (6.26)$$

де m – кількість допоміжних працівників, чол;

k_i – тарифний коефіцієнт i -ого розряду;

R_i – кількість допоміжних працівників i -ого розряду;

$R_{доп}$ – кількість допоміжних робітників i -ого розряду.

$$K_{тар.сер} = \frac{1.6 \cdot 3}{3} = 1.6 \quad (6.27)$$

$$З_{доп} = 36.5 \cdot 1.6 \cdot 1860 \cdot 3 = 325872 \text{ грн} \quad (6.28)$$

Заплановані доплати і премії – 50 % від тарифного фонду:

$$З_{прем} = З_{доп} \cdot 0.5 = 147312 \cdot 0.5 = 162936 \text{ грн} \quad (6.29)$$

Річний фонд заробітної плати допоміжних працівників складає:

$$З_{\text{річн.доп}} = З_{\text{доп}} + З_{\text{прем}} = 325872 + 162936 = 488808 \text{ грн} \quad (6.30)$$

Відрахування на соціальне страхування розраховується відповідно до чинного законодавства складає 22 % від суми $З_{\text{осн}}$ та $З_{\text{доп}}$.

Звідна відомість фонду заробітної плати усіх категорій працюючих, чисельність працівників і їх середня зарплата в таблиці 6.13.

Таблиця 6.13 - Звідна відомість оплати праці

Категорія персоналу	Чисельність персоналу, осіб	Фонд зарплати, грн.			Відрахування на соціальні заходи. грн
		Основна заробітна плата, грн	Додаткова заробітна плата, грн	Річний фонд заробітної плати, грн	
Основні робітники	4	708580	354290	1062870	233831,4
Допоміжні робітники	3	325872	162936	488808	107537,76
Керівник	1	177145	88572,5	265717,5	58457,85
Всього	8	1211597	605798,5	1817395,5	399827,01

6.7 Розрахунок собівартості робіт

Собівартість продукції річного випуску визначається усіма витратами ділянки протягом року по наступних статтях прямих і непрямих витрат.

6.7.1 Прямі витрати

- а) Основні і допоміжні матеріали – 2107968 грн;
- б) тарифна заробітна плата основних працівників – 708580 грн;
- в) доплати, допоміжна зарплата, премії – 354290 грн;
- г) нарахування на соціальне страхування – 233831,4 грн;
- д) паливо і енергія на технологічні цілі.

6.7.2 Непрямі витрати

Непрямі витрати визначаються складанням річних витрат, оскільки ці статті є комплексними.

Загальновиробничі витрати вміщують витрати на утримання та експлуатацію обладнання, цехові витрати і послуги виробничого характеру. До витрат на на утримання та експлуатацію устаткування також входять витрати на силову електроенергію:

$$E_c = C \cdot F_{до} \cdot W \cdot K_3 \cdot K_s \quad (6.31)$$

де C – вартість 1 кВт енергії ($C = 2,68$ грн);

$F_{до}$ – ефективний фонд роботи устаткування за рік, год;

W – споживана потужність устаткування дільниці, кВт;

K_3 – коефіцієнт завантаження обладнання;

K_s – коефіцієнт попиту, який враховує витрату електроенергії в мережі ($K_s=0,8$).

$$E_c = 2.68 \cdot 5580 \cdot (10.92 \cdot 0.92 + 30 \cdot 0.05) \cdot 0.8 = 138230,6 \text{ грн} \quad (6.32)$$

Витрати на утримання та експлуатацію обладнання вміщують витрати на технічне обслуговування машин і механізмів, витрати на поточний ремонт обладнання, цехового транспорту та інструментів, знос малоцінних і швидкозношуваних приладів, заробітну плату допоміжного персоналу та інші. Цехові витрати вміщують витрати, пов'язані з поточним ремонтом та амортизацією будівель цеху, заробітну плату керівників і спеціалістів цеху, витрати на охорону праці та техніку безпеки в цеху та інші.

Загальновиробничі витрати складають в середньому 400% до основної заробітної плати та розраховуються за формулою:

$$ЗВВ = ЗП_0 \cdot \frac{\alpha}{100}, \text{ грн} \quad (6.33)$$

де α - % загальновиробничих витрат;

$ЗП_0$ – основна заробітна плата, грн.

$$ЗВВ = 708580 \cdot \frac{400}{100} = 2834320 \text{ грн} \quad (6.34)$$

Вищенаведені витрати складають виробничу собівартість.

Адміністративні витрати вміщують витрати, пов'язані з утриманням адміністративно - управлінського персоналу підприємства, а також утриманням та експлуатацією основних засобів загального виробничого призначення, охорону праці та техніку безпеки персоналу та інші. Адміністративні витрати складають в середньому 500% від основної заробітної плати основних виробничих робітників та розраховуються за формулою:

$$АВ = ЗП_0 \cdot \frac{\beta}{100}, \text{ грн} \quad (6.35)$$

де β - % адміністративних витрат;

$ЗП_0$ – основна заробітна плата, грн.

$$AB = 708580 \cdot \frac{500}{100} = 3542900 \text{ грн} \quad (6.36)$$

Повна собівартість одиниці продукції складає:

$$C_{\pi} = \frac{2834320+3542900}{200} = 31886,1 \text{ грн} \quad (6.37)$$

Таблиця 6.14 - Калькуляція собівартості корпусу зовнішнього

Найменування статей витрат	Витрати, грн		
	на програму	на одиницю, за новою технологією	на одиницю, за старою технологією
Допоміжні і основні матеріали	2107968,00	10539,84	19140,00
Тарифна заробітна плата основних працівників	708580,00	3542,90	3295,8
Доплати, додаткова заробітна плата, премії основних працівників	354290,00	1771,45	1647,9
Нарахування на заробітну плату	233831,40	1169,16	1087,614
Загальновиробничі витрати	2834320,00	14171,60	13183,2
Електроенергія на технологічні цілі	138230,6	691,15	921,88
Повна собівартість корпусу зовнішнього	6377220	31886,10	39276,42

В разі, якщо вироби будуть реалізовані за межами підприємства, необхідно розрахувати ціну продажу.

$$C_{\text{пр}} = C_{\pi} + \text{П} + \text{ПДВ} \quad (6.38)$$

де C_{π} – повна собівартість, грн;

П – прибуток, грн (норматив рентабельності 25%);

ПДВ – податок на додану вартість (20%).

$$C_{\text{пр}} = 31886,1 + 7971,53 + 6377,22 = 46234,85 \text{ грн} \quad (6.39)$$

6.8 Економічне обґрунтування виготовлення виробу методом WAAM

6.8.1 Розрахунок економічного ефекту

Розрахунок економічного ефекту від впровадження нової технології полягає у порівнянні собівартості продукції за старою і новою технологіями. У результаті економічний ефект від впровадження нової технології склав:

$$E = N \cdot (C_{\text{ст}} - C_{\text{нов}}) \quad (6.40)$$

де N – виробнича програма, шт.;

$C_{\text{ст}}$ – собівартість за старою технологією, грн;

$C_{\text{нов}}$ – собівартість за новою технологією, грн.

$$E = 200 \cdot (39276,42 - 31886,1) = 1478064 \text{ грн} \quad (6.41)$$

Економічний ефект за розрахунковий рік складає 1478064 грн.

Також оцінку ефективності та результативності діяльності можна здійснити за наступними показниками:

а) фондівдача:

$$\Phi_{\text{отд}} = \frac{C_{\text{п}} - C_{\text{мп}}}{\Phi_{\text{осн}}} \quad (6.42)$$

де $C_{\text{п}}$ – повна собівартість продукції за рік;

$C_{\text{мп}}$ – вартість напівфабрикатів і матеріалів;

$\Phi_{\text{осн}}$ – вартість основних фондів.

$$\Phi_{\text{отд}} = \frac{6377220 - 2107968}{6345478} = 0,68 \text{ грн} \quad (6.43)$$

б) продуктивність роботи одного працівника, грн/чол:

$$\text{Пр} = \frac{C_{\text{п}} - C_{\text{мп}}}{\sum K} \quad (6.44)$$

де $\sum K$ – кількість робітників.

$$\text{Пр} = \frac{6377220 - 2107968}{8} = 533656,5 \text{ грн/чол} \quad (6.45)$$

в) фондомісткість:

$$\Phi_{\text{м}} = \frac{\Phi_{\text{осн}}}{C_{\text{п}} - C_{\text{мп}}} \quad (6.46)$$

$$\Phi_{\text{м}} = \frac{6345478}{6377220 - 2107968} = 1,49 \text{ грн} \quad (6.47)$$

Показники ефективності та результативності діяльності виробничої дільниці наведені в таблиці 6.15.

Таблиця 6.15 - Показники ефективності та результативності

Найменування показника	Значення
Річний випуск виробів:	
- у натуральному вимірі, штук	200
- по трудомісткості, нормо-годин	11040
Виробнича площа ділянки, мкв	216
Вартість основних засобів, грн	2107968
Спискова чисельність персоналу усього, осіб	8
- основні робочі	4
- допоміжні робочі	3
- керівники, спеціалісти	1
Фонд оплати праці, грн	1817395,5
Середня заробітна плата за місяць, грн	18931,2
Продуктивність праці одного працівника, грн/осіб	533656,5
Фондовіддача	0,68
Коефіцієнт завантаження обладнання	0,92
Фондомісткість	1,49
Собівартість одиниці продукції, грн	31886,1
Економічний ефект за розрахунковий рік	1478064

Зовнішній корпус камери згоряння можливо виготовити більш традиційними методами, такими як точне лиття або фрезерування чи точіння зі злитку або поковки. Механічна обробка із заготовок призводить до економічно нераціонального використання матеріалу, а обладнання для лиття і виготовлення форм має вартість, щонайменше в 7 разів більшу за обладнання для наплавлення. Запропонована технологія дозволяє підвищити коефіцієнт використання матеріалу в порівнянні з традиційною механічною обробкою і дозволяє уникнути використання дорогого обладнання для лиття, що призводить до зниження собівартості виготовлення зовнішнього корпусу камери згоряння.

6.9 Розрахунок і планування ділянки

Розміщення цеху, всіх його виробничих відділень і ділянок, а також допоміжних, адміністративно-конторських і побутових приміщень повинно, по можливості, повністю задовольняти всім специфічним якостям, вимогам процесів, які підлягають виконанню в кожному з цих відділень.

Дільниця виготовлення корпусів зовнішніх буде розташовуватися в прольоті, ширина якого визначатиметься шляхом підрахунку суми розмірів ширини робочих місць, проходів та проїздів між ними. Виходячи з того, що для виконання річного плану виготовлення корпусів зовнішніх потрібен 1 робот, виробнича площа складатиме 216 м^2 , що відповідає одному прольоту, ширина якого складає 18 м. Величина кроку колон дорівнює 12 м.

7 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

В розділі надані основні заходи з охорони праці при розробці технологічного процесу виготовлення зовнішнього корпусу камери згоряння стенду для випробування ГТД способом адитивного електродугового вирощування.

7.1 Аналіз потенційних небезпек

Для впровадження належних заходів по забезпеченню безпеки при виробництві зовнішнього корпусу камери згоряння стенду для випробування ГТД необхідно проаналізувати потенційні небезпеки. Такими небезпеками є:

- а) небезпеки, які пов'язані з порушенням вимог ергономіки стосовно організації робочих місць дослідників в приміщенні дослідницької лабораторії, зокрема: невідповідальності розмірів робочих зон а також максимально можливої кількості осіб, що можуть там перебувати відповідно до ДБН В.2.2-28:2010 «Будинки і споруди. Будинки адміністративного та побутового призначення» та ДСТУ Б В.2.2-29:2011 «Будівлі підприємств. Параметри.», нерационального розташування дослідницького приладдя та офісного обладнання;
- б) можливість ураження електричним струмом при виконанні службових обов'язків внаслідок порушення правил з електробезпеки, несправності енергоспоживаючого обладнання, відсутності групових або індивідуальних засобів захисту, що може призвести до електричних травм або летального наслідку;
- в) небезпеки, які пов'язані з використанням посудин для зберігання робочих газів під тиском або компресорних установок, зокрема:

порушень правил зберігання, переміщення та експлуатації посудин під тиском, перегріві циліндрів компресорних установок, що може призвести до вибухів та великомасштабних руйнувань;

г) небезпеки, які пов'язані з безпосереднім проведенням зварювання або наплавлення зразків або дослідницьких виробів, а саме:

- можливість отруєння, що пов'язано з виділенням у навколишнє середовище інертних газів та аерозолів тугоплавких металів у вигляді окисних і нітридних сполук, які утворюються унаслідок конденсації парів при зварюванні та наплавленні внаслідок відсутності або несправності місцевої витяжної вентиляції та не використання індивідуальних засобів захисту;
- можливість опіку внаслідок непередбаченого торкання нагрітих поверхонь;
- електроофтальмія – потужне ультрафіолетове випромінювання від електричної дуги, інтенсивне інфрачервоне випромінювання, що може бути пов'язано з порушенням правил безпеки, не використанням індивідуальних засобів захисту;

д) можливість отримання механічних травм при роботі з роботизованим обладнанням та при токарній обробці отриманої заготовки внаслідок порушення правил з охорони праці при використанні механообробного обладнання;

е) небезпеки які пов'язані з обробкою результатів досліджень з використанням ПК зокрема ушкодження кістково-м'язового апарату внаслідок довготривалої роботи в одностатійній позі, що може призвести до зниження працездатності та розвитку професійних захворювань;

ж) невідповідність вимогам ДБН В.2.5-28-2006 «Природне та штучне освітлення» освітлення робочих зон дослідницької лабораторії, що може бути пов'язано з виходом з ладу освітлювальних приладів, надмірної їх забрудненості або хибного розрахунку їх кількості та

потужності. Це може призвести до погіршення зору, погіршення здатності розрізняти об'єкти, і як наслідок до травмування;

- з) незадовільні параметри мікроклімату, які повинні відповідати фізіологічним потребам організму працюючих, із врахуванням енергетичних витрат на виконувану роботу згідно з ДСН 3.3.6.042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень» внаслідок неефективної роботи систем опалення та повітрообміну, що може призвести до загальних захворювань;
- и) небезпеки, які притаманні надзвичайним ситуаціям, зокрема: можливість загоряння внаслідок порушень правил пожежної безпеки, які зазначені в НАПБ А.01.001-2014 «Правила пожежної безпеки в Україні», а саме хибне визначення видів та кількості первинних засобів пожежогасіння відносно категорій приміщень з пожежної безпеки, що може привести до пожежі; неправильні дії персоналу в умовах надзвичайних ситуацій різного характеру, причинами яких є непідготовленість персоналу до дій в умовах надзвичайних ситуацій, низька ефективність управління в цих умовах, що може призвести до тяжких травм або летального наслідку.

7.2 Заходи по забезпеченню безпеки

Згідно з аналізом при виробництві зовнішнього корпусу камери згоряння ГТД необхідно забезпечити наступні заходи безпеки:

- а) правильна організація робочого місця передбачає виконання ергономічних вимог, які визначаються існуючими стандартами ДСТУ ГОСТ 12.2.061:2009 «Система стандартів безпеки праці. Устаткування виробниче. Загальні вимоги безпеки до робочих

місць», а ДСТУ 8604:2015 «Дизайн і ергономіка. Робоче місце для виконання робіт у положенні сидячи. Загальні ергономічні вимоги» визначає загальні ергономічні вимоги до робочого місця при виконанні робіт сидячи.

Місце проведення дослідної роботи обладнане робочим столом з встановленим на ньому персональним комп'ютером і робочим кріслом.

Конструкція робочого столу в лабораторії повинна забезпечувати оптимальне розміщення на робочій поверхні використовуваного устаткування з урахуванням його кількості і конструктивних особливостей, а також характеру виконуваної роботи. Допускається використання робочих столів різних конструкцій, що відповідають сучасним вимогам ергономіки. Поверхня робочого стола повинна мати коефіцієнт відбиття 0,5–0,7. Висота поверхні столу повинна регулюватися в межах 680–800 мм, при відсутності такої можливості висота робочої поверхні столу повинна складати 725 мм.

Робочий стіл повинен мати простір для ніг висотою не менше 600 мм, шириною не менше 500 мм, глибиною на рівні колін не менше 450 мм і на рівні витягнутих ніг – не менше 650 мм.

Конструкція робочого крісла повинна забезпечувати підтримку раціональної робочої пози під час роботи, дозволяти змінювати позу з метою зниження статичного напруження м'язів шийно-плечової області і спини для попередження розвитку втоми. Робоче крісло повинно мати наступні основні елементи: сидіння, спинку і стаціонарні або знімні підлокітники, регулюватися по висоті, куту нахилу сидіння і спинки, висоті підлокітників. Регулювання кожного параметра незалежні.

Розташування технологічного обладнання повинно забезпечувати його безпечну експлуатацію, зручне обслуговування і ремонт. Повинні бути передбачені зони обслуговування (для постійних

робочих місць довжина зони $\geq 1,5$ м, ширина ≥ 1 м. Для ремонтних робочих місць довжина зони $\geq 1,5$ м, ширина $\geq 0,8$ м) висота зони обслуговування (від настилу до конструктивних елементів ≥ 2 м);

- б) для попередження ураження електричним струмом необхідно забезпечити відповідність вимогам до захисних заходів згідно ДСТУ Б В.2.5-82:2016 «Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом» і здійснювати наступні заходи захисту:

Організаційні заходи: до виконання робіт допускаються особи віком не молодше 18 років, що пройшли навчання та перевірку знань з електробезпеки згідно ДНАОП 1.1.10-1.01-2000 «Правила безпечної експлуатації електроустановок» та отримали допуск з електробезпеки відповідної групи. Для кожного електроспоживного обладнання повинні бути складені експлуатаційні схеми нормальної і аварійної роботи.

Технічні заходи: всі не ізольовані струмопровідні елементи електрообладнання повинні бути надійно огорожені суцільними огороженнями, зняття або відкриття можливе тільки за допомогою спеціальних пристроїв. Струмоведучі частини мають розташовуватися на недоступній висоті. Висота розташування визначається значенням напруги: при напрузі до 1000 В – не менше 3,5 м, при напрузі більше 1000 В – не менше 6 м. Електричне блокування здійснює розрив ланцюга спеціальними контактами згідно ГОСТ 12.4.155 – 85 «ССБТ. Устройства защитного отключения. Классификация. Общетеchnические требования».

Захисне заземлення або занулення. Принцип дії захисного заземлення або занулення полягає у зниженні до безпечних значень напруги дотику, яка обумовлена замиканням на корпус. Електрообладнання необхідно заземлювати або занулювати у відповідності з ПУЕ - 2015 «Правила улаштування

електроустановок». Огороджувальні пристрої та інші металеві неструмоведучі частини повинні бути заземлені.

При роботах, що пов'язані з можливістю ураження електричним струмом необхідно використовувати індивідуальні засоби захисту: сухі брезентові рукавиці, робу, взуття.

Для виключення можливості враження електричним струмом, передбачено проведення навчання з електробезпеки, атестації на відповідну групу електробезпеки та отриманням посвідчення встановленого зразка, відповідно СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007 «Норми випробування електрообладнання» проводити періодичний контроль ізоляції не рідше одного разу на рік виміром її активного опору при випробуванні підвищеною напругою протягом 1 хвилини. Перед початком роботи перевірити наявність і справність: огорожень і запобіжних пристроїв, струмоведучих частин електричної апаратури (пускатів, трансформаторів, кнопок і інших), заземлювальних пристроїв, захисних блокувань. При виявленні несправностей до роботи не приступати, про несправності повідомити своєму безпосередньому керівнику.

Електроустаткування, що використовується в лабораторії згідно ПУЕ – 2015 відноситься до установок напругою до 1000 В. За ступенем небезпеки ураження електричним струмом приміщення лабораторії відноситься до класу приміщень без підвищеної небезпеки;

- в) для виключення можливості отримання травм, пов'язаних з використанням посудин для зберігання робочих газів під тиском або компресорних установок необхідно діяти згідно з НПАОП 0.00-1.81-18 «Правила охорони праці під час експлуатації обладнання, що працює під тиском», а саме:

- перевірити і переконатися в справності вимірювальних приладів на балонах для газів, обладнання і інструментів, огорожень, вентиляції;
- перевірити стійкість балонів і правильність їх закріплення;
- переконатися у відсутності на робочому місці пожежонебезпечних матеріалів.

Працівник не повинен розпочинати роботу при порушеннях цілісності газового балона (наявності тріщин або вм'ятин), при відсутності на балоні клейма з датою його випробування, при несправності газового редуктора або манометра на редукторі.

Балони з газами слід зберігати в одноповерхових складах з покриттями легкого типу, обладнаних вентиляцією, без горищних приміщень.

Підлоги в складському приміщенні необхідно виконувати з матеріалів, які виключають іскроутворення при ударі по них металевими предметами. Підлоги повинні настилатися не нижче 0,1 м від рівня землі.

Балони з газом, що встановлюються в приміщенні, слід розташовувати на відстані не менше 1 м від радіатора опалення і не менше 5 м від джерела тепла з відкритим вогнем.

При влаштуванні екрана, що оберігає балони від нагрівання, відстань між балоном і опалювальним приладом може бути зменшено до 0,5 м. Відстань між балонами і запобіжним екраном повинна бути не менше 10 см.

Балони біля стін будівель необхідно встановлювати на відстані не менше 0,5 м від дверей і вікон першого поверху і 3 м - від вікон і дверей цокольних і підвальних поверхів, а також каналізаційних колодязів та вигрібних ям.

Не допускається розміщення газових балонів біля запасних (пожежних) виходів з приміщень, з боку головних фасадів будівель, в проїздах з інтенсивним рухом транспорту.

Підігрівати балони для підвищення тиску забороняється.

При експлуатації балонів забороняється повністю вибирати газ, що знаходиться в них. Залишковий тиск газу в балоні повинен бути не менше 0,05 МПа (0,5 кгс / кв. См).

Якщо тиск в балонах виявиться вище допустимого, необхідно короточасним відкриванням вентиля випустити частину газу в атмосферу або охолодити балон холодною водою з метою зниження тиску. При випуску газу з балона або продуванні вентиля чи пальника працівнику необхідно перебувати в стороні, протилежної напрямку випуску газу.

При виконанні робіт в зимовий час в разі замерзання вентиля на балоні відігрівати його слід тільки гарячою водою.

Роботи необхідно зупинити:

- якщо тиск в посудині піднявся вище допустимого;
- при виявленні несправностей запобіжних клапанів;
- при несправності манометра;
- при виникненні пожежі, котра безпосередньо загрожує посудині, що знаходиться під тиском.

г) для попередження отруєнь зварювальними газами і аерозолями, що представляють собою оксиди заліза, сполуки марганцю і інших елементів при роботі в закритих приміщеннях необхідно передбачити місцеву витяжну примусову вентиляцію.

Повітрообмін за умови виділення шкідливих речовин (газів, парів, пилу), що надходять у робочу зону, з метою розбавлення їх для гранично допустимих концентрацій:

$$L_B = \frac{G_{BP}}{q_{пдк} - q_{п}} \cdot 3600, \text{м}^3/\text{год} \quad (7.1)$$

де L_B – кількість видаляемого повітря в звлежності від схеми механічної вентиляції, $\text{м}^3/\text{год}$;

G_{BP} – кількість шкідливих речовин, що виділяються у виробничих приміщеннях, $\text{мг}/\text{с}$;

$q_{пдк}$ – граничнодопустима концентрація шкідливих речовин у приміщенні, $\text{мг}/\text{м}^3$;

$q_{п}$ – концентрація шкідливих речовин в зовнішньому повітрі, що подається в приміщення ($q_{п} = 0,3 \cdot q_{пдк}$), $\text{мг}/\text{м}^3$.

$$q_{п} = 0,3 \cdot 0,1 = 0,03, \text{мг}/\text{м}^3 \quad (7.2)$$

$$L_B = \frac{0,25}{0,1 - 0,03} \cdot 3600 = \frac{0,25}{0,07} \cdot 3600 = 12960 \text{ м}^3/\text{год} \quad (7.3)$$

Місцева примусова витяжна вентиляція повинна забезпечувати повітрообмін зі швидкістю, не меншою за $12960 \text{ м}^3/\text{год}$;

- д) Для виключення механічних травм працівники, зварювальних і наплавочних ділянок повинні забезпечуватися захисним спецодягом та індивідуальними захисними засобами відповідно до ДСТУ EN ISO 11611:2016 «Одяг захисний для використання під час зварювання та суміжних процесів».

При експлуатації промислових роботів, роботизованих технологічних комплексів і ділянок основними причинами впливу небезпечних виробничих факторів на працюючих є наступні:

- непередбачені рухи виконавчих пристроїв промислових роботів при наладці, ремонті, під час навчання і виконання керуючої програми;

- раптова відмова в роботі промислового робота або технологічного обладнання, що входить до складу роботизованого комплексу;
- помилкові (ненавмисні) дії оператора або наладчика при наладці, ремонті або під час роботи робота в автоматичному режимі;
- доступ людини в робочий простір робота при роботі в режимі виконання програми;
- порушення умов експлуатації промислового робота або роботизованого технологічного комплексу;
- порушення вимог ергономіки і безпеки праці при плануванні роботизованого технологічного комплексу і ділянки.

Промислові роботи, призначені для експлуатації в умовах підвищеної температури і запиленості повітря, у вибухо-і пожежонебезпечних середовищах і в інших несприятливих умовах виробничої середовища, повинні мати відповідне захисне виконання.

Електроустаткування промислових роботів виконується в строгій відповідності з «Правилами улаштування електроустановок» (ПУЕ) – 2015.

Шумові характеристики повинні відповідати ГОСТ 12.1.003-76.

Ділянки, на яких потенційно може опинитись людина під час виконання переміщень робота повинні бути обладнані спеціальними рамками-датчиками руху, які можуть миттєво припинити рух робота в разі потрапляння людини в робочу зону.

Дроти живлення механізму подачі зварювального дроту, підведення захисного газу, дроти живлення, трубки системи охолодження повинні бути змонтовані та закріплені таким чином, щоб уникати захаращення простору та не допускати перекручення кабелів та дротів під час руху робота.

Органи управління і засоби відображення інформації повинні бути розташовані на панелі пульта управління і відповідати ергономічним вимогам.

Сигнальні кольори і знаки безпеки, що наносяться на промислові роботи, повинні відповідати встановленим вимогам;

- е) для запобігання статистичного навантаження при користуванні ПК рекомендовано використовувати перерви в роботі 10 хв. через кожні дві години. Синдром зап'ястного каналу, або тунельний синдром зап'ястя, який може бути наслідком хронічної травми, трапляється у людей внаслідок тривалої роботи з мишею: постійні напруга і здавлювання приводить до мікротравм, здавлювання нерва прилеглими оточуючими тканинами, через що виникає набряк.

Для попередження тунельного синдрому потрібно дотримуватися кількох правил організації робочого місця:

- оптимальна висота клавіатури від підлоги – 65-75 см;
- наявність ергономічних і зручних особисто для вас миші і клавіатури;
- можливість регулювання висоти і нахилу клавіатури (відстань від поверхні стола до середини клавіатури – не більше 30 мм, кут підйому клавіатури – від 2° до 15°);
- наявність у клавіатури підставки для рук;
- наявність килимка для миші з захистом від тунельного синдрому (спеціальний виступ забезпечує правильне положення кисті);
- наявність стільця або крісла з підлокітниками.

7.3 Заходи по забезпеченню виробничої санітарії та гігієни праці

Згідно з аналізом при виробництві зовнішнього корпусу камери згоряння ГТД необхідно забезпечити наступні заходи виробничої санітарії та гігієни праці:

ж) незадовільне освітлення робочої зони, що може бути пов'язано з виходом з ладу освітлювальних приладів або надмірної забрудненості. Це може привести до погіршення зору, погіршення здатності розрізняти об'єкти, а в результаті і до травмування.

Рівень природної освітленості залежить від величини об'єкту і розряду зорової роботи.

На промислових підприємствах лампи застосовуються тільки разом зі світильником, який розподіляє світловий потік, захищає лампу від руйнування, підводить електричний струм і закріплює лампу. Для освітлення використовують лампи розжарювання і люмінесцентні лампи.

Природне освітлення має важливе фізіолого-гігієнічне значення для працівників. Воно сприятливо впливає на органи зору, стимулює фізіологічні процеси, підвищує обмін речовин та покращує розвиток організму загалом і діє тонізуюче. Сонячне випромінювання зігріває та знезаражує повітря, очищуючи його від збудників багатьох хвороб (наприклад, вірусу грипу). Природне освітлення має і психологічну дію, створюючи в приміщенні для працівників відчуття безпосереднього зв'язку з довкіллям. Природне освітлення по відношенню до штучного не вимагає затрат на експлуатацію.

Штучне освітлення може бути загальним та комбінованим. Загальним називають освітлення, за якого світильники розміщуються у верхній зоні приміщення рівномірно (загальне рівномірне освітлення) або з врахуванням розташування робочих

місць. Рівень штучного освітлення вибирають з урахуванням найменшого розміру об'єкту, контрасту об'єкту з фоном і характеристики фону. Комбіноване освітлення складається із загального та місцевого (крізь віконні отвори і ліхтар будівлі).

з) мікрокліматичні умови виробничих приміщень характеризуються такими показниками:

- температура повітря;
- відносна вологість повітря;
- швидкість руху повітря;
- інтенсивність теплового (інфрачервоного) опромінення;
- температура поверхні.

При виконанні робіт операторського типу, пов'язаних з нервово-емоційним напруженням в кабінетах, пультах і постах керування технологічними процесами, в залах обчислювальної техніки та інших приміщеннях повинні дотримуватися оптимальні умови мікроклімату (температура повітря 22-24 град.С, відносна вологість 60-40%, швидкість руху повітря не більш 0,1 м/сек.). Температура внутрішніх поверхонь робочої зони (стіни, підлога, стеля), технологічного обладнання (екрани і т. ін.), зовнішніх поверхонь технологічного устаткування, огорожуючих конструкцій не повинна виходити більш ніж на 2 град.С за межі оптимальних величин температури повітря.

У теплий період року для зниження температури повітря в робочому просторі необхідно використовувати природну вентиляцію, або загально обмінну витяжну вентиляцію відповідно до ГОСТ 12.1.005-88 «Система стандартів безпеки праці. Загальні санітарно-гігієнічні вимоги до повітря робочої зони». У холодний період року використовуються системи водяного опалення відповідно до СНіП 2.04.05-91 «Опалення, вентиляція та кондиціонування».

Інтенсивність теплового опромінення працюючих від нагрітих поверхонь технологічного устаткування, освітлювальних приладів, інсоляція від зашкленних огорожень не повинна перевищувати 35,0 Вт/м² - при опроміненні 50% та більше поверхні тіла, 70 Вт/м² - при величині опромінюваної поверхні від 25 до 50%, та 100 Вт/м² - при опроміненні не більше 25% поверхні тіла працюючого.

При наявності відкритих джерел випромінювання (нагрітий метал, скло, відкрите полум'я) допускається інтенсивність опромінення до 140,0 Вт/м². Величина опромінюваної площі не повинна перевищувати 25 % поверхні тіла працюючого при обов'язковому використанні індивідуальних засобів захисту (спецодяг, окуляри, щитки).

Формовані параметри мікроклімату на робочих місцях повинні бути досягнені, в першу чергу, за рахунок раціонального планування виробничих приміщень і оптимального розміщення в них устаткування з тепло-, холодо- та вологовиділеннями. Для зменшення термічних навантажень на працюючих передбачається максимальна механізація, автоматизація та дистанційне управління технологічними процесами і устаткуванням.

7.4 Заходи по забезпеченню безпеки у надзвичайних ситуаціях

7.4.1 Заходи з пожежної безпеки

Комплекс протипожежних заходів для дослідницької лабораторії, обладнаної ПК та зварювальним роботом, розроблений згідно вимог НАПБ А.01.001-2014 «Правила пожежної безпеки в Україні».

На дослідній зварювальній ділянці небезпечними чинниками пожежі є:

- зварювальна дуга;

- іскри і частки розплавленого металу, які виникають при електрозварюванні;
- підвищена температура виробів, які піддаються зварюванню і різанню.

При виконанні дослідницької роботи вибухонебезпечні гази та сухі речовини не використовувалися. Виходячи з аналізу речовин та матеріалів, які використовуються при роботі у лабораторії згідно ДСТУ EN 2:2014 «Класифікація пожеж (EN 2:1992, EN 2:1992/A1:2004, IDT)» у приміщенні лабораторії можлива пожежа класу Е (горіння електроустановок, що перебувають під напругою до 1000 В); відповідно до вимог ДСТУ Б В.1.1-36:2016 «Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною безпекою», воно належить до категорії «Г» з пожежної безпеки – простір з негорючими речовинами і/або матеріалами у гарячому, розпеченому і/або розплавленому стані, процес обробки яких супроводжується виділенням променистого тепла, утворенням іскор і/або полум'я.

Оскільки приміщення дослідницької лабораторії належить до категорії «Г» з пожежної безпеки, тому згідно вимог ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги» воно має II ступінь вогнестійкості.

Пожежна безпека на складально-зварювальній ділянці може бути забезпечена сукупністю заходів, спрямованих на попередження пожеж, запобігання поширення вогню в разі виникнення пожеж і створення умов, що сприяють швидкій ліквідації пожежі, що почалася.

Для виключення можливості загорянь, внаслідок порушення правил пожежної безпеки, необхідно проводити інструктаж і перевірку знань правил пожежної безпеки, відповідно до НАПБ А.01.001-2014 «Правила пожежної безпеки України» та НПАОП 0.00-4.12-05 «Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці».

Засоби пожежогасіння в цехах повинні відповідати Правилам пожежної безпеки в Україні, виходячи з категорії виробництв щодо пожежовибухонебезпеки.

Первинні засоби пожежогасіння, що розміщуються на об'єкті або обладнанні, повинні відповідати ГОСТ 12.4.009-83 «ССБТ. Пожарная техника для защиты объектов. Основные виды. Размещение и обслуживание».

7.4.2 Правила проведення евакуаційних заходів при вибуху вибухових речовин

Безпека у надзвичайних ситуаціях – це стан захищеності населення, об'єктів економіки та довкілля від небезпеки у надзвичайних ситуаціях.

Надзвичайна ситуація техногенного та природного характеру – порушення нормальних умов життя та діяльності людей на окремій території чи об'єкті на ній або на водному об'єкті, спричинене аварією, катастрофою, стихійним лихом чи іншою небезпечною подією, зокрема епідемією, епізоотією, епіфітотією, пожежею, яке призвело (може призвести) до неможливості проживання населення на території чи об'єкті, ведення там господарської діяльності, загибелі людей та значних матеріальних втрат.

Захист населення і територій від НС техногенного та природного характеру – система організаційних, технічних, медико-біологічних, фінансово-економічних та інших заходів щодо запобігання та реагування на НС техногенного та природного характеру і ліквідації їх наслідків, що реалізуються центральними і місцевими органами виконавчої влади, органами місцевого самоврядування, відповідними силами та засобами підприємств, установ та організацій, незалежно від форм власності й господарювання, добровільними формуваннями і спрямовані на захист населення і територій, а також матеріальних і культурних цінностей та довкілля.

Неправильні дії персоналу в умовах надзвичайних ситуацій різного характеру, причинами яких є невідповідність персоналу до дій в умовах НС, низька ефективність управління в цих умовах, що може привести до травмування або смерті.

Забезпечення безпеки персоналу досягається підвищенням стійкості промислового об'єкта в умовах НС; організацією рятувальних і відновлювальних робіт на промисловому об'єкті, наявністю технічних ресурсів до більш швидкої евакуації персоналу із зони ураження.

Таким чином, для створення ефективної системи охорони праці та створення безпечних умов для персоналу необхідно:

- обов'язкове проведення медичних оглядів, проведення інструктажів, допуск до роботи осіб старше 18 років, які пройшли навчання за фахом, відповідно НВАО 0.00.-4.12-05 «Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці»;
- використання індивідуальних захисних засобів відповідно до ГОСТ 12.4.103-83 «Одяг спеціальний захисний, засоби індивідуального захисту ніг і рук», щитки захисні ГОСТ 12.4.035 78 «ССБТ Щитки захисні лицьові для електрозварників»;
- регулярно проводиться перевірка захисного заземлення, відсутність оголених проводів, відкритих скруток пробоїв ізоляції ПУЕ-2015 «Правила улаштування електроустановок»;
- перевірка наявності та справності засобів індивідуального захисту органів дихання згідно ГОСТ 12.4.034-2001 «Система стандартів безпеки праці. Засоби індивідуального захисту органів дихання»;
- робоча зміна не повинна перевищувати встановленої для даної категорії працівників щоденної тривалості робочого часу, в перебігу кожної години відпочинок на 5 хвилин;

- проведення перевірки освітленості робочої зони і справності освітлювальних ламп відповідно ДБН В.2.5-28-3006 «Природне і штучне освітлення. Норми проектування»;
- перевірка системи водяного опалення та кондиціювання ділянки відповідно до ГОСТ 12.1.005-88 «Система стандартів безпеки праці. Загальні санітарно-гігієнічні вимоги до повітря робочої зони»;
- проведення оглядів усіх засобів пожежогасіння (вогнегасники, пожежні щити) знаходяться на ділянці відповідно до СНіП 2.01.02-85 «Протипожежні норми проектування будівель і споруд»;
- контроль рівня освітленості – по ГОСТ 24940-81;
- контроль пожежної небезпеки – ГОСТ 12.1.004-85;
- контроль за станом вентиляції робочих місць – по ГОСТ 12.3.018-79.

ВИСНОВКИ

В роботі було проведено аналіз переваг технології WAAM перед іншими адитивними металевими технологіями та виготовленням виробів механічною обробкою зі злитків. Розглянуто економічну доцільність використання WAAM в порівнянні з механічною обробкою. Згідно з сучасними дослідженнями економічна ефективність технології WAAM зростає з ростом швидкості нанесення матеріалу. Проведено аналіз проблем і задач технології, які потребують вирішення. Розглянуто можливість застосування і верифікації чисельного моделювання для дослідження розподілу температури при виготовленні виробів технологією WAAM.

В дослідницькій частині проекту було проведено ряд експериментів для визначення фізичних параметрів, які в подальшому були використані при розробці термічної симуляції процесу виготовлення зовнішнього корпусу камери згоряння випробувального стенду ГТД. Дані, отримані з термічного аналізу, були використані для дослідження циклу нагріву-охолодження з метою подальшого дослідження і оптимізації технології WAAM.

В технологічній частині було розроблено технологію виготовлення зовнішнього корпусу камери згоряння випробувального стенду ГТД методом WAAM. Було розраховано кількість шарів та проходів з урахуванням величини перекриття та хвилястості поверхні, обрано оптимальні параметри режиму нанесення та розраховано режими різання для механічної обробки зовнішнього корпусу. Для виготовлення зовнішнього корпусу камери згоряння було обрано сучасне обладнання, яке відповідає всім вимогам технології.

Проведений розрахунок економічної ефективності впровадження технології показав доцільність використання технології WAAM при виготовленні зовнішнього корпусу камери згоряння. Очікуваний економічний ефект за рік складає 1478064 грн. Запропоноване виробництво відповідає вимогам охорони праці, та санітарно-будівельним нормам.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Ding D. et al. Adaptive path planning for wire-feed additive manufacturing using medial axis transformation // J. Clean. Prod. Elsevier Ltd, 2016. Vol. 133. P. 942–952.
2. Montevecchi F. et al. Heat accumulation prevention in Wire-Arc-Additive-Manufacturing using air jet impingement // Manuf. Lett. 2018. Vol. 17. P. 14–18.
3. Williams S.W. et al. Wire + Arc Additive Manufacturing // Mater. Sci. Technol. 2015. Vol. 32, № 7. P. 641–647.
4. Allen J. An Investigation into the Comparative Costs of Additive Manufacture vs. Machine from Solid for Aero Engine Parts // Cost Eff. Manuf. via Net-Shape Process. 2006. P. 17-1-17–10.
5. Martina F., Williams S.W. Wire+arc additive manufacturing vs. traditional machining from solid: a cost comparison. 2015. P. 27.
6. Seleš K., Perić M., Tonković Z. Numerical simulation of a welding process using a prescribed temperature approach // J. Constr. Steel Res. 2018. Vol. 145. P. 49–57.
7. Ragotzky B., Launert B., Krausche T. Welding simulation for the calculation of the welding stresses on welded I-girders. 2014.
8. Ding J. et al. Thermo-mechanical analysis of Wire and Arc Additive Layer Manufacturing process on large multi-layer parts // Comput. Mater. Sci. Elsevier B.V., 2011. Vol. 50, № 12. P. 3315–3322.
9. Montevecchi F. et al. Finite Element mesh coarsening for effective distortion prediction in Wire Arc Additive Manufacturing // Addit. Manuf. Elsevier B.V., 2017. Vol. 18. P. 145–155.
10. Shubert M., Pandheeradi M. An Abaqus Extension for 3-D Welding Simulations // Mater. Sci. Forum. 2013. Vol. 768–769. P. 690–696.
11. Ding J. et al. A computationally efficient finite element model of wire and arc

- additive manufacture // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2014. Vol. 70, № 1–4. P. 227–236.
12. Simunovic S. et al. Metal Big Area Additive Manufacturing : Process Modeling and Validation // NAFEMS World Congr. 2017. 2017. № June. P. 1–17.
 13. Graf M. et al. Numerical simulation of metallic wire arc additive manufacturing (WAAM) // AIP Conf. Proc. 2018. Vol. 1960, № May.
 14. Bai X., Zhang H., Wang G. Improving prediction accuracy of thermal analysis for weld-based additive manufacturing by calibrating input parameters using IR imaging // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2013. Vol. 69, № 5–8. P. 1087–1095.
 15. Lei Y., Xiong J., Li R. Effect of inter layer idle time on thermal behavior for multi-layer single-pass thin-walled parts in GMAW-based additive manufacturing // Int. J. Adv. Manuf. Technol. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018. Vol. 96, № 1–4. P. 1355–1365.
 16. Goldak J., Chakravarti A., Bibby M. A new finite element model for welding heat sources // Metall. Trans. B. 1984. Vol. 15, № 2. P. 299–305.
 17. Montevecchi F. et al. Finite Element Modelling of Wire-arc-additive-manufacturing Process // Procedia CIRP. The Author(s), 2016. Vol. 55. P. 109–114.
 18. Cao J., Gharghoury M.A., Nash P. Finite-element analysis and experimental validation of thermal residual stress and distortion in electron beam additive manufactured Ti-6Al-4V build plates // J. Mater. Process. Technol. Elsevier B.V., 2016. Vol. 237. P. 409–419.
 19. Denlinger E.R., Irwin J., Michaleris P. Thermomechanical Modeling of Additive Manufacturing Large Parts // J. Manuf. Sci. Eng. 2014. Vol. 136, № 6. P. 061007.
 20. Al-Karawi J., Schmidt J. Application of infrared thermography to the analysis of welding processes. 2016. № January 2004.
 21. Slaughter A. et al. How to Ensure Bad Quality in Metal Additive Manufacturing // Proc. 12th Int. Conf. Availability, Reliab. Secur. - ARES '17. 2017. P. 1–10.
 22. Bagavathiappan S. et al. Infrared thermography for condition monitoring - A review // Infrared Phys. Technol. Elsevier B.V., 2013. Vol. 60. P. 35–55.

23. Seppala J.E., Migler K.D. Infrared thermography of welding zones produced by polymer extrusion additive manufacturing // Addit. Manuf. Elsevier B.V., 2016. Vol. 12. P. 71–76.
24. Yang D., Wang G., Zhang G. Thermal analysis for single-pass multi-layer GMAW based additive manufacturing using infrared thermography // J. Mater. Process. Technol. Elsevier B.V., 2017. Vol. 244. P. 215–224.
25. Mattei S. et al. Using infrared thermography in order to compare laser and hybrid (laser+MIG) welding processes // Opt. Laser Technol. 2009. Vol. 41, № 6. P. 665–670.
26. FLIR Systems. Thermal Imaging Guidebook for building and renewable energy applications // Guid B. 2011. P. 68.
27. Kozakov R. et al. Weld pool temperatures of steel S235 while applying a controlled short-circuit gas metal arc welding process and various shielding gases // J. Phys. D. Appl. Phys. 2013. Vol. 46, № 47.
28. Ding X.P. et al. Application of infrared thermography for laser metal-wire additive manufacturing in vacuum // Infrared Phys. Technol. 2017. Vol. 81. P. 166–169.
29. Bai X. et al. Numerical analysis of heat transfer and fluid flow in multilayer deposition of PAW-based wire and arc additive manufacturing // Int. J. Heat Mass Transf. Elsevier Ltd, 2018. Vol. 124. P. 504–516.
30. Rubber C., Co P., Report D. TABLE OF EMISSIVITY OF VARIOUS SURFACES Introduction // Mikron Instrum. Co. 2018.
31. Salerno L.J., Kittel P. Thermal contact conductance // Int. J. Heat Mass Transf. 1997. Vol. 12, № 3. P. 279–300.
32. Wu B. et al. Effects of heat accumulation on the arc characteristics and metal transfer behavior in Wire Arc Additive Manufacturing of Ti6Al4V // J. Mater. Process. Technol. Elsevier, 2017. Vol. 250, № August. P. 304–312.
33. Ding D. et al. The effects of forced interpass cooling on the material properties of wire arc additively manufactured Ti6Al4V alloy // J. Mater. Process. Technol. Elsevier, 2018. Vol. 258, № March. P. 97–105.

34. Denlinger E.R. et al. Effect of inter-layer dwell time on distortion and residual stress in additive manufacturing of titanium and nickel alloys // J. Mater. Process. Technol. Elsevier B.V., 2015. Vol. 215. P. 123–131.
35. Ding D. et al. A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM) // Robot. Comput. Integr. Manuf. Elsevier, 2015. Vol. 31. P. 101–110.
36. Walsh R.A. McGraw-Hill Machining and Metalworking Handbook. 2nd ed. Ann Arbor: McGraw-Hill, 1999. 1683 p.

Формат	Зона	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание
				<u>Документация</u>		
A1			ГКІЮ 196119.006 В0	Установка для виготовлення зовнішнього корпусу камери згоряння за технологією WAAM	1	
				<u>Прочие изделия</u>		
Б4	1			Пальник ESAB Aristo RT2	1	
Б4	2			Датчик зіткнень ESAB KS-1	1	
Б4	3			Промисловий робот ABB IRB2400	1	
Б4	4			Механізм подачі дроту ESAB Aristo RoboFeed 3004w	1	
Б4	5			Зварювальні та керувальні кабелі	1	
Б4	6			Канал зварювального дроту	1	
Б4	7			Контролер ABB IRC5	1	
Б4	8			Барабан зварювального дроту 250 кг	1	
Б4	9			Джерело зварювального струму ESAB Aristo Mig U5000i	1	
Б4	10			Центр обслуговування пальника ABB TSC2013	1	
Б4	11			Несуча сталева платформа	1	
Б4	12			Позиціонер ABB IRBP A-250	1	
A1	13		ГКІЮ 196119.001	Зовнішній корпус камери згоряння	1	

ГКІЮ 196119.006			
Изм./Лист	№ док-м.	Подп.	Дата
Разраб.	Молочков Д.Е.		
Пров.	Куликовський Р.А.		26.12.19
Н.контр.	Щимикін С.О.		26.12.19
Утв.	Обчинников О.В.		
Установка для виготовлення зовнішнього корпусу камери згоряння за технологією WAAM			
Лист	Лист	Листов	
		1	
НУЗП, каф. ОТЗВ ІФ-318м			

Дубл.			
Взам.			
Подл.			

Розроб.	Молочков		
Перевір.	Куликовський		
Н. контр.	Шумикін		

Листів	Лист
--------	------

ГКІЮ 196119.006 ВО

ДП

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХІКА

СОГЛАСОВАНО

КОМПЛЕКТ ДОКУМЕНТІВ

ЗАТВЕРДЖЕНО

на технологічний процесу виготовлення зовнішнього
корпусу камери згоряння

Нормоконтроль

Дата

Впроваджений у виробництво

Акт № _____ Дата _____.

Зав. кафедрою ОТЗВ

Дата

комплект документів

відповідає

ТД

											Листів	Лист
Розроб.			Молочков								ГКІЮ 196119.00 ЗВ	
Перев.			Куликовський									
Н. контр.			Шумикін									

А	Цех	Уч.	РМ	Опер.	Код. найменування операції					позначення документа				
Б	Код. найменування обладнання				СМ	Проф.	Р	УТ	КОИД	ЕН	ОП	Кшт	Тпз	Тшт
К/М	Найменування деталі сб. одиниці або матеріалу				Позначення, код					ОП	ЕВ	ЕН	КИ	Н. расх
А 01					005 Нанесення шарів									
Б 02	Робот ABB IRB2400				Оператор-зварювальник VI					55,2				
М 03	Зовнішній корпус камери згоряння; дріт 07X12НМБФ-III d=0.8 мм; Ar 80% + CO2 20%													
О 04	Провести наплавлення 128 шарів													
Р 05	U=16.5 В; V _{зв} =0,42 м/хв; V _{др} =6 м/хв													
06														
А 07					010 Механічна обробка									
Б 08	Універсальний механообробний верстат DMG MORI SL 403				Оператор-слюсар V					1,26				
М 09	Зовнішній корпус камери згоряння													
О 10	Токарна обробка виробу													
11														
12														
13														