

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю.М. ПОТЕБНІ

електричної інженерії та кіберфізичних систем

(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота (проект)

другий (магістерський) рівень

(рівень вищої освіти)

на тему Дослідження виготовлення литих катодів з нікелевого сплаву на математичній моделі з метою підвищення якості управління процесом нанесення покриттів на лопатки авіадвигунів

Виконав: студент II курсу, групи 8.1512
спеціальності 151 Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології

(код і назва спеціальності)

спеціалізації _____

(код і назва спеціалізації)

освітньої програми Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології

(назва освітньої програми)

Єфанов В. С.

(ініціали та прізвище)

Керівник к.т.н., доцент Овчинникова І. А.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент Курілець І.А.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю.М. ПОТЕБНІ

Кафедра Електричної інженерії та кіберфізичних систем
 Рівень вищої освіти другий (магістерський) рівень
 Спеціальність _____
(код та назва)
 Спеціалізація 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(код та назва)
 Освітня програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

д.т.н., проф.

 В.Л.Коваленко
 « _____ » _____ 2023 року

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЕКТ) СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)

Єфанову Володимирі Сергійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

- 1 Тема роботи (проекту) Дослідження виготовлення литих катодів з нікелевого сплаву на математичній моделі з метою підвищення якості управління процесом нанесення покриттів на лопатки авіадвигунів
керівник роботи Овчинникова Ірина Анатоліївна, к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
- затвержені наказом ЗНУ від « 01 » травня 2023 року № 639-с
- 2 Строк подання студентом роботи 5 грудня 2023р
- 3 Вихідні дані до роботи: технологіч документація, відкриті джерела інформації, власні розробки, результати експериментальних досліджень
- 4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Опис об'єкта автоматизації; шляхи вдосконалення складу катодів; розробка технології нанесення покриттів; аналіз експериментальних даних; моделювання системи автоматичного управління; результати моделювання; техніко-економічне обґрунтування
- 5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): характеристики об'єкту дослідження; математична модель властивостей сплавів; результати імітаційного моделювання; техніко-економічне обґрунтування; висновки та перспективи розвитку

6 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання визначення	завдання примітка
Розділ 1	Овчинникова І. А., к.т.н., доцент	<i>Овчинникова</i>	<i>Овчинникова</i>
Розділ 2	Овчинникова І. А., к.т.н., доцент	<i>Овчинникова</i>	<i>Овчинникова</i>
Розділ 3	Овчинникова І. А., к.т.н., доцент	<i>Овчинникова</i>	<i>Овчинникова</i>
Розділ 4	Овчинникова І. А., к.т.н., доцент	<i>Овчинникова</i>	<i>Овчинникова</i>
Розділ 5	Овчинникова І. А., к.т.н., доцент	<i>Овчинникова</i>	<i>Овчинникова</i>
Розділ 6	Овчинникова І. А., к.т.н., доцент	<i>Овчинникова</i>	<i>Овчинникова</i>
Розділ 7	Овчинникова І. А., к.т.н., доцент	<i>Овчинникова</i>	<i>Овчинникова</i>

4 Дата видачі завдання 05.06.2023

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Срочок виконання етапів роботи	Примітка
1	Визначення особливостей технологічного процесу. Збір теоретичного матеріалу. Вибір та обґрунтування напрямку проведення дослідження	31.08.2023	<i>Виконано</i>
2	Аналіз напрямків підвищення якості виготовлення катодів для покриттів	10.10.2023	<i>Виконано</i>
3	Проведення досліджень та аналіз отриманих результатів	25.10.2023	<i>Виконано</i>
4	Розробка та дослідження процесів на математичній моделі	10.11.2023	<i>Виконано</i>
5	Узагальнення отриманих результатів, Оформлення роботи	01.12.2023	<i>Виконано</i>
6	Підготовка презентації та доповіді	05.12.2023	<i>Виконано</i>
7	Надання роботи до рецензії. Нормоконтроль	07.12.2023	<i>Виконано</i>

Студент *Сфанов* В. С. Сфанов
(підпис) (ініціали та прізвище)Керівник роботи (проекту) *Овчинникова* І. А. Овчинникова
(підпис) (ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер *Овчинникова* І. А. Овчинникова
(підпис) (ініціали та прізвище)

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ,	7
СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ	7
ВСТУП	8
РОЗДІЛ 112 ПРОБЛЕМИ ТА ШЛЯХИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ЗЛИВКІВ КАТОДІВ ДЛЯ НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТІВ ЛОПАТОК АВІАДВИГУНІВ, СТАН ПИТАННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЙОГО ВИРІШЕННЯ	12
1.1 Аналіз жароміцних сплавів і покриттів на нікелевій основі, що працюють у високотемпературному газовому потоці	12
1.2 Методи виготовлення зливків катодів	14
1.2.1 Виготовлення катодів методом електронно-променевого переплаву .	14
1.2.2 Виготовлення катодів методом вакуумно-індукційної виплавки	19
1.2.3 Виготовлення катодів методом вакуумно-дугового переплаву	22
1.3 Способи підвищення довговічності деталей з нікелевих сплавів при газовій корозії	28
1.4 Обґрунтування мети і формулювання задач наукового дослідження	33
1.5 Висновки до розділу 1	35
РОЗДІЛ 237 РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТІВ КАТОДАМИ З РІЗНИХ СКЛАДІВ	37
2.1 Обґрунтування використання нової іонно-плазмової установки КІБ замість АПН-250.....	37
2.2 Дослідження покриття, нанесеного катодом ВДП, легованим Y	41
2.3 Дослідження покриття, нанесеного катодом ВДП, легованим La.....	42
2.4 Дослідження покриття, нанесеного катодом ВДП, легованим Hf.....	42
2.5 Дослідження покриття, нанесене катодом ВДП, легованим La + Y	43
2.6 Дослідження покриття, нанесене катодом ВДП, легованим Y + Hf+La	44
2.7 Порівняння властивостей отриманих покриттів з СДП-2.....	45
2.8 Висновки до розділу 2	45
РОЗДІЛ 347 ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ	

ЛОПАТОК ТУРБИНИ З ЖАРОСТІЙКИМ ПОКРИТТЯМ	47
3.1 Технологія нанесення градієнтного покриття; зменшення шорсткості поверхні	47
3.2 Випробування модифікованих покриттів на жаростійкість	52
3.3 Використання отриманих результатів досліджень у авіадвигунобудуванні для підвищення ресурсу лопаток турбіни газотурбінних двигунів.....	54
3.4 Висновки до розділу 3	55
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА МОДЕЛІ ТА СИСТЕМИ ОПТИМІЗАЦІЇ ВЛАСТИВОСТЕЙ СПЛАВІВ	57
4.1 Розробка математичної моделі	57
4.2 Розробка алгоритму роботи оптимізаційної системи.....	60
4.3 Моделювання системи оптимізації властивостей сплавів в Simulink ...	62
РОЗДІЛ 5. РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ	72
РОЗДІЛ 6. ТЕХНІКО ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ДІЛЯНКИ ПО НАПИЛЕНЮ ЛОПАТОК	77
6.1 Економічне нормування технологічних операцій.....	77
6.2 Техніко-економічне обґрунтування ділянки	78
6.2.1 Виробнича програма та її матеріальне забезпечення	78
6.2.2 Розрахунок кількості обладнання, площі ділянки	78
6.2.3 Розрахунок кількості персоналу ділянки	82
6.2.4 Розрахунок матеріальних витрат	84
6.2.5 Розрахунок фондів заробітної плати працівників.....	87
6.3 Собівартість виробу	89
6.4 Розрахунок економічного ефекту.....	92
6.5 Аналіз показників і висновки.....	93
6.6 Планування ділянки	95
РОЗДІЛ 7. ОХОРОНА ПРАЦІ І НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА. БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	97
7.1 Аналіз потенційних небезпек.....	97

7.2 Заходи щодо забезпечення безпеки	98
7.3 Заходи щодо забезпечення виробничої санітарії та гігієни праці	101
7.4 Заходи з пожежної безпеки.....	102
7.5 Заходи щодо забезпечення безпеки в надзвичайних ситуаціях.....	103
7.6 Висновки по розділу 7	104
ВИСНОВКИ.....	106
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	108

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ,
СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ

- ВІВ – вакуумно-індукційна виплавка;
ЕПП – електронно-променевий переплав;
ВДП – вакуумно-дуговий переплав;
ГМ – гранульна металургія;
ВПТВЕ – вакуумно-плазмова технологія високих енергій;
КІБ – установка для нанесення покриттів;
АПН-250 – установка для нанесення покриттів;
ГТД – газотурбінний двигун;
РСМА – рентгеноспектральний мікроаналіз;
ПЕМ – просвічувальна електронна мікроскопія;
РЕМ – растрова електронна мікроскопія;
КВМ – коефіцієнт використання матеріалу;
СДП – сплав для покриття;
LPPS – low pressure plasma spraing;
PVD – physical vapour deposition;
CVD – chemical vapour deposition.

ВСТУП

Актуальність теми. Проблеми забезпечення надійності, довговічності і ресурсу роботи газових турбін є найбільш складними серед чисельних проблем, що виникають на шляху розвитку сучасних авіаційних газотурбінних двигунів (ГТД). Найважливішим елементом газової турбіни є лопатки ротора, матеріал і конструкція яких значною мірою визначають ресурс її роботи і допустиму температуру газу перед турбіною, що безпосередньо впливає на питому тягу, економічність й інші характеристики двигунів.

У перших газотурбінних двигунах температура газів перед турбіною становила 600-850 °С, однак в подальшому значно підвищилася, досягнувши в даний час 1200-1400 °С і навіть вище.

Таким чином, застосування для теплонавантажених деталей ГТД нових матеріалів з більш високими характеристиками жароміцності, жаростійкості, втомної міцності, фазової та структурної стабільності стало першочерговим завданням, оскільки жароміцності сучасних сплавів на нікелевій та нікель-кобальтової основі для деталей високотемпературної зони газотурбінних двигунів явно недостатньо.

Для вирішення проблем надійності і ресурсу газових турбін найчастіше застосовують нові жароміцні сплави зі спрямованою стовбчастою і монокристалічною структурою, композиційні та інтерметалідні матеріали.

Якщо застосування нових, жароміцних сплавів, вирішує проблему збільшення опірності деформаціям і руйнуванню лопаток при високих температурах і навантаженнях, то для надійного захисту від хімічного руйнування поверхонь під впливом газової корозії, потрібні жаростійкі захисні покриття.

До найбільш ефективних і поширених жаростійких покриттів належать покриття на основі алюмінідів нікелю, високі захисні властивості

яких забезпечуються їх здатністю окислюватися з утворенням плівки Al_2O_3 . Довговічність таких покриттів лімітується вмістом алюмінію в поверхневому шарі, а також наявністю стабілізуючих модифікаторів, що забезпечують стабілізацію його вмісту на рівні, необхідному для формування плівки Al_2O_3 .

У зв'язку з цим актуальним є підвищення характеристик литих зливків катодів з новою геометрією, що використовуються для нанесення жаростійких покриттів лопаток авіадвигунів.

Мета та задачі досліджень.

Мета роботи – удосконалення металургійних процесів отримання катодів нової геометрії та складу, шляхом підвищення комплексу якісних та технологічних характеристик зливків.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Дослідити зв'язок між технологічними чинниками виготовлення катодів та процесом осадження та формування жаростійких покриттів.
2. Дослідити вплив технологічних чинників на процес осадження та формування жаростійких покриттів на деталях ГТД.
3. Дослідити вплив модифікуючих елементів на характеристики жаростійкості.
4. Розробити модель та систему прогнозування властивостей сплавів в залежності від вмісту модифікаторів.
5. Розробити технологію зняття градієнтного жаротривкого покриття з поверхні лопаток без пошкодження їх геометрії.
6. Виготовити дослідні зразки деталей газотурбінних двигунів, з нанесеним на них модифікованим покриттям.

Об'єкт досліджень – процеси виготовлення катодів із нікелевого сплаву.

Предмет досліджень – закономірності формування структури зливків і її вплив на властивості жаростійких покриттів.

Методи дослідження.

При створенні математичних моделей використовувався балансовий метод, методи математичної статистики, моделювання, числові методи вирішення систем балансових та диференціальних рівнянь. Перевірка основних теоретичних положень виконана з використанням математичного моделювання та результатів експериментальних досліджень. Застосовується оперативний вимір та управління енерговиділенням з використанням коефіцієнтів нерівномірності енерговиділення за обсягом активної зони, що обчислюються системою внутрішньореакторного контролю.

Хімічні склади сплавів і покриттів визначали рентгеноспектральним і хімічним методами, а структурних складових енергодисперсійним рентгеноспектральним методом. Металографічні дослідження проводили з використанням оптичного, растрового і просвічуючого електронного мікроскопів.

Механічні властивості визначали за стандартними методиками при статичному і динамічному навантаженні, також визначали жаростійкість серійного і модифікованого покриття. Дослідження виконувалися на приладах і обладнанні, які пройшли відповідний метрологічний контроль. Жаростійкість покриття досліджували за допомогою вагового методу. Обробка статистичних даних виконувалася за загальноприйнятими методами математичної статистики.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Розширене уявлення про закономірності впливу вихідних типів структури катодів на якість іонно-плазмового покриття. Встановлено, що за рахунок подрібнення структури катодів, виготовлених методом ВДП, вдалося повністю позбавитись в покритті крапельної фази розміром більше 60 мкм. Це дозволило зменшити шорсткість поверхні лопатки з Ra 2,02...2,21 до Ra 1,85...1,90.

2. Розширені уявлення про закономірності впливу геометричних

характеристик катодів на технологію нанесення градієнтного покриття. Доведено, що застосування методу ВДП дає можливість отримання катодів у формі циліндра з оптимальною структурою та хімічним складом. Це забезпечило можливість його використання для нової технології нанесення градієнтного покриття в діапазоні товщин 43 ... 95 мкм.

Практичне значення отриманих результатів.

Із застосуванням математичної моделі визначено ефективні режими легування матеріалу катода, що дозволяє отримати рівномірнішу структуру покриття та забезпечити однорідність хімічного складу.

Особистий внесок здобувача. У кваліфікаційній роботі основні положення, наукові результати та висновки отримані автором самостійно. Дослідження впливу різних металургійних методів виготовлення катодів зі сплава системи Ni-Cr-Al модифікованого Y, Hf, La та їх поєднанням, а також схеми нанесення покриттів виконані автором. Здобувачем сформульована і обґрунтована методологія проведення експериментів, а також практична реалізація експериментальних методик, весь комплекс вимірювальних, аналітичних і числових розрахунків був виконан за його участю. Досліджено вплив методів виготовлення катодів та режимів осадження на структуру і механічні властивості покриттів..

Структура та обсяг кваліфікаційної роботи. Дисертація складається з анотації, вступу, п'яти розділів, висновків, містить список використаних джерел та додатки. Загальний обсяг дисертації становить 113 сторінок, з них 103 сторінок основного тексту, 25 таблиць, 27 рисунків, 43 використаних літературних джерел на 6 сторінках.

РОЗДІЛ 1

ПРОБЛЕМИ ТА ШЛЯХИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ЗЛИВКІВ КАТОДІВ ДЛЯ НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТІВ ЛОПАТОК АВІАДВИГУНІВ, СТАН ПИТАННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЙОГО ВИРІШЕННЯ

1.1 Аналіз жароміцних сплавів і покриттів на нікелевій основі, що працюють у високотемпературному газовому потоці

Проблема довговічності деталей газотурбінних двигунів, що працюють в умовах впливу високотемпературного газового потоку, є однією з найважливіших в машинобудуванні. Особливої гостроти ця проблема набуває при створенні сучасних авіаційних двигунів, для яких основними ознаками є збільшення температури газів перед турбіною. Якщо в перших газотурбінних двигунах (ГТД) робочі температури матеріалу становили 600-900 °С, то в подальшому значно підвищилися, досягнувши на даний час 1400 °С і більше, при одночасному зменшенні маси конструкції і збільшенні ступеня стиснення повітря в компресорі [1]. Збільшення параметрів двигуна неминуче веде до зростання навантажень на деталі і вузли, ускладнення конструкцій і пошуку нових технологій забезпечення тривалої працездатності ГТД [2].

З літературних джерел відомо, що обмеження ресурсів високотемпературних двигунів пов'язане зі зростанням напруженості в деталях турбіни, сопла та камери згоряння. Тому розробка покращених жароміцних, жаростійких сплавів, надійних методів захисту від газової корозії, зменшення маси конструкції є однією з провідних завдань машинобудування.

Конструктивні рішення, які закладаються в авіадвигуни нових поколінь, як правило, знаходяться за межами можливостей відомих матеріалів. Тому особливої гостроти набуває необхідність розробки нових матеріалів і технологічних процесів, які повинні забезпечити деталям мати

підвищені характеристики жароміцності, жаростійкості, опірності термічній втомі [3].

На початкових етапах авіадвигунобудування провідну роль мала розробка конструктивних вдосконалень. Згодом, як видно з аналізу, для 4-го покоління авіадвигунів ролі конструкції і технологій зрівнялися, а для 5-го і 6-го поколінь внесок нових матеріалів і технологій в забезпечення параметрів авіадвигунів вже складає більше 70% [1-5].

Необхідність довготривалої експлуатації деталей авіадвигунів при температурах до 1100 °С і короткочасно до 1150 °С обумовило застосування жароміцних і жаростійких нікелевих сплавів. При більш високих температурах використовуються сплави на основі інтерметалідів Ni_3Al і $NiAl$ [6, 7].

Частка нікелевих сплавів в авіадвигунобудуванні складає не менше 70% маси конструкцій ГТД. Властивості цих сплавів забезпечуються наявністю легувальних елементів, технологією лиття деталей, штампуванням і оптимізацією режимів термічної обробки. Легування здійснюється з метою як безпосереднього зміцнення γ -твердого розчину, так і виділення зміцнюючої γ' -фази, під час твердіння. Сучасні нікелеві сплави легують хромом, кобальтом, алюмінієм, титаном, ніобієм, гафнієм, вольфрамом, танталом, а також додають рідкісноземельні метали [8].

Таким чином, застосування нових, більш жароміцних сплавів, вирішує проблему підвищення опору деформаціям і руйнуванню лопаток при дії високих температур і напруг. Але не менш важлива проблема - підвищення надійності захисту поверхонь деталей від високотемпературної газової корозії, що вирішується застосуванням надійних і довговічних жаростійких захисних покриттів.

Застосування сучасних технологій дозволяє підвищувати експлуатаційні характеристики жароміцних сплавів та покриттів, а один із основних шляхів їх вдосконалення полягає у покращенні кожного етапу виплавки зливків заготовок катодів та реалізації процесу осадження

покривів на поверхні лопаток.

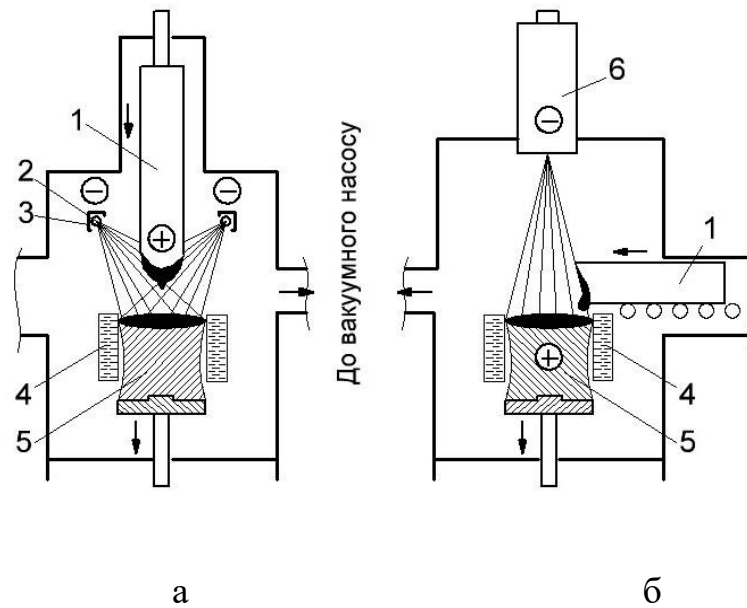
1.2 Методи виготовлення зливок катодів

1.2.1 Виготовлення катодів методом електронно-променевого переплаву

Одним з перспективних способів отримання особливо чистих і однорідних тугоплавких металів є електронно-променевий переплав (ЕПП). Цей спосіб вважають найбільш економічним при отриманні Та, Мо, W, а також сталей і сплавів на основі нікелю, кобальту та ін. Зіставлення всіх рафінуючих переплавок показує, що при ЕПП найкраще видаляються гази, елементи з високою пружністю пару і включення високої та низької щільності завдяки високому вакууму, температурі і спрямованій кристалізації [20].

Процес ЕПП заснований на використанні теплової енергії, що виділяється в розплавленому металі при бомбардуванні його швидкими електронами. Стикаючись з поверхнею нагрітого металу, електрони значну частину своєї кінетичної енергії передають металу, підвищуючи його температуру. Отримати щільний, що не розсіюється в просторі, потік електронів можна тільки в глибокому вакуумі, при тиску меншому, ніж 10^{-2} Па. Тому всі установки ЕПП забезпечені системами спеціальних насосів для отримання глибокого вакууму в робочому просторі [21].

Схема установок ЕПП приведена на рисунку 1.1 [20]. Джерелом електронів може служити розігрітий до високої температури кільцевий катод (рисунок 1.1 а), або, так звані, електронно-променеві гармати (рисунок 1.1 б). В установках ЕПП такої конструкції висока напруга (до 30000 В) створюється між розігрітим катодом, електродом, що розплавляється, і поверхнею зливка, що наплавляється, який служить анодом



а – з кільцевим катодом; б – з електронною гарматою.

1 – електрод, що розплавляється; 2 – кільцевий катод; 3 – екран; 4 – кристалізатор; 5 – зливоч, що наплавляється; 6 – електронна гармата

Рисунок 1.1 – Схема установок електронно-променевого переплаву

Електрони, що випромінюються катодом, розганяються електричним полем до високих швидкостей і при ударі о поверхню металу придбана ними кінетична енергія перетворюється на теплову. Це дозволяє концентрувати тепло біля поверхні розплаву в кристалізаторі і на поверхні електрода, що розплавляється.

У результаті електронно-променевого переплаву в металі значно зменшується вміст газів, досягається високий ступінь чистоти по неметалевим включенням, задана макроструктура зливків і висока однорідність металу. ЕПП забезпечує глибоке очищення металу від шкідливих домішок, кольорових металів і дозволяє отримувати в литому вигляді високореакційні та тугоплавкі метали, що вимагають для свого розплавлення дуже високу температуру. Крім того, електронно-променеві установки застосовують для нанесення покриттів на метал і неметалеві матеріали, для пайки, зварювання, отримання монокристалічних металів. Електронно-променево плавлення знайшло широке застосування як метод

отримання особливо чистих металів і сплавів у вакуумі. Порівняно з традиційними способами вакуумної металургії (вакуумне індукційне плавлення), ЕПП дозволяє отримувати метали і сплави з більш низьким вмістом шкідливих домішок, у результаті чого істотно поліпшуються їх фізичні та механічні характеристики, підвищується надійність і довговічність виготовлених з них виробів [22].

ЕПП дозволяє регулювати параметри в широких межах, тому ЕПП можна використовувати не тільки витратні електроди, а й некомпактну або сипучу шихту (губка, стружка і т. п.), а також відходи прокатного або ковальсько-штампувального виробництва [23].

Найбільш широко в промисловості застосовують ЕПП витратні електроди в кристалізатор. Залежно від типу і кількості використовуваних електронних гармат електрод, що витрачається, подають в зону плавлення вертикально, горизонтально або похило. Вертикальна подача електрода створює більш вигідні умови рафінування металу, оскільки торець електрода, оплавленого під впливом електронного променя, приймає форму конуса, що збільшує реакційну поверхню. При бічній (горизонтальній або похилій) подачі електрод екранує від електронного променя ділянку поверхні металеві ванни в кристалізаторі, що призводить до неоднорідного розподілу енергії і погіршення умов формування зливка. Конструкція установок ЕПП забезпечує поділ електронних променів на дві частини: одна – для нагріву заготовки, що переплавляється, а друга – для нагріву поверхні рідкої ванни в кристалізаторі. Витратну заготовку опускають в зону плавлення за допомогою механізму, що подає. Під впливом бомбардування прискореними електронами здійснюються нагрів і плавлення нижнього торця заготовки. Розплавлений метал при цьому стікає у водоохолоджуваний кристалізатор, де створюється рідка ванна, що підігрівається відхиленою частиною електронного променя [21]. Різновидом технологічної схеми електронно-променевого плавлення в

кристалізаторі є переплав сипучої шихти (порошку, гранул, губки, стружки і т.п.), що застосовується для отримання компактного зливка, який потім піддається повторному ЕПП. За такою схемою переробляють титановий скрап, порошок ніобію та інші матеріали [24]. Робота установки ЕПП вимагає глибокого вакууму. Тому виникають проблеми при ЕПП металів і сплавів з високим рівнем газонасиченості, а також металів і сплавів з високою пружністю парів і сталей, легованих такими елементами. Для установок ЕПП характерна більш низька продуктивність порівняно з установками ВДП аналогічної потужності. Так, при однаковій потужності 150-200 кВт швидкість плавлення електрода в печах ВДП становить 5-10 кг/хв, а в установках ЕПП всього 0,4-0,5 кг/хв. Тому повний ККД електронного плавлення становить близько 10% і пояснюється необхідністю витримувати кожен чергову порцію забрудненого домішками металу, що потрапляє у ванну кристалізатора в перегрітому стані протягом певного часу, для отримання необхідного ступеня рафінування. Істотно підвищити ККД електронного плавлення можна при проведенні процесу рафінування металу не в кристалізаторі, а в проміжній ємності, тобто до потрапляння порції металу в кристалізатор.

Рідкий метал із заготовки, що оплавляється потрапляє в кристалізатор не відразу, а проходить додаткове рафінування в проміжній ємності, зробленої у вигляді водоохолоджувального лотка, а потім стікає в кристалізатор. Наявність проміжної ємності виключає падіння в кристалізатор шматків металу, що переплавляється при можливому розтріскуванні заготовки і дозволяє переплавляти не тільки якісно підготовлені заготовки, але й стружку, лом, порошок і т. п. Крім того, при подібній конструкції установок забезпечується більш глибоке рафінування металу внаслідок збільшення ступенів процесу і більш розвиненою поверхнею випаровування. Подальшим розвитком установок з проміжною ємністю є електронні плавильні установки з холодним подом [20].

Металургійні особливості ЕПП полягають у рафінуванні металу і

засновані на взаємодії металу, що розплавляється, з глибоким вакуумом. Рідкий метал утворюється на торці заготовки, що оплавляється, у вигляді крапель, стікає у кристалізатор, утворює рідку ванну на поверхні зливка, що наплавляється.

Незалежне джерело теплоти при ЕПП дає можливість в широких межах регулювати швидкість наплавлення зливка і тривалість перебування металу в рідкому стані [21].

При переплаві витратної заготовки метал піддається рафінуванню на трьох етапах існування його в рідкому стані: в півці на торці електрода, що оплавляється, в краплях і на поверхні рідкої ванни. При однаковому діаметрі електрода, при ЕПП з вертикальною подачею заготовки, її кінець, що оплавляється, набуває конічної форми, за рахунок чого площа цієї поверхні в 2-4 рази перевищує площу поперечного перерізу електрода. У поєднанні з вищою температурою рідкого металу, більш глибоким вакуумом в робочому просторі це створює сприятливі умови для кращої дегазації металу, випаровування кольорових металів, вакуумно-вуглецевого розкислення і дисоціації неметалевих включень. Видалення домішок відбувається, в основному, в півці рідкого металу на кінці електрода, що оплавляється. При ЕПП легованих сталей і хромистих сплавів на торці цього електрода видаляється 70-80% кольорових металів, 40-50% азоту і міді. Зниження концентрації таких домішок, як Рb, Вi, Sb, Cu, Sn досягає більш 60% їх первинного вмісту, тобто відділяється значно більше, ніж при ВДП. У 2-4 рази більше, порівняно з ВДП, видаляється при ЕПП водень з високолегованих сталей. Його залишкова концентрація після ЕПП, зазвичай, не перевищує $1 \text{ см}^3/100 \text{ г}$. За рахунок цього конструкційні сталі стають нефлокеночутливі. Вміст азоту у високолегованих сталях після ЕПП також в 1,5-2 рази нижче, ніж після ВДП [25].

Слід зазначити, що дистиляція металу від шкідливих домішок при ЕПП супроводжується також випаровуванням легуючих елементів і основи сплаву, що є негативною стороною рафінування. Втрати сплаву за рахунок

випаровування досягають 3-5%. Конденсат на стінках камери установки ЕПП складається переважно з Mn, Cr і Fe. [26].

Рафінування металу від кисню здійснюється ЕПП за тим же механізмом, що і в інших процесах в умовах вакууму. Високі вакуум і температура рідкого металу сприяють дисоціації вихідних неметалевих включень, відновленню їх вуглецем, виділенню включень, що не встигли дисоціювати на поверхню металу і їх подальшої коагуляції з відокремленням шлакової фази [27, 28].

До переваг електронно-променевої технології можна віднести [22, 29, 30]:

- рафінуючу здатність процесу по видаленню легколетючих домішок;
- суттєве зниження вмісту домішок проникнення (O, C, H, N), що визначають структуру та механічні властивості металів;
- відсутність корозії обладнання, довготривалий термін його використання;
- можливість автоматизації процесу плавлення;
- рівномірність структури сплавів з регулюванням розміру зерна.

До недоліків:

- відсутність можливості використовувати дрібні фракції шихти при виплавках;
- неоднорідність складу зливоків за рахунок поступового оплавлення шихти.

1.2.2 Виготовлення катодів методом вакуумно-індукційної виплавки

Вакуумно-індукційні печі (вакуумно-індукційна виплавка (ВІВ)) – це різновид електричних печей, що працюють на принципі роботи трансформатора. В індукційних печах змінне електромагнітне поле наводиться за допомогою спіралеподібного, що охолоджується водою або

повітрям, індуктора (первинна обмотка), за яким пропускають первинний змінний електричний струм. За вторинну обмотку використовується безпосередньо переплавлений ливарний сплав або стінка тигля. Саме в них знаходиться вторинний струм, який генерується в теплову енергію. Важливою особливістю індукційних печей є інтенсивна циркуляція рідкого металу, що викликається впливом електромагнітних полів. Інтенсивність перемішування пропорційна квадрату ампер - витків $(I_n)^2$ і обернено пропорційна частоті струму (f). Перемішування розплаву прискорює процеси плавлення і вирівнювання розплаву за хімічним складом і температурою. Це є позитивною стороною індукційних печей. Іншою особливістю є те, що щільність вторинного (індукованого) струму досягає максимуму на поверхні розплаву, тобто під стінами футерування, і знижується у напрямку до внутрішніх його верств. Причому товщина поверхневого шару металу, де в основному спостерігається вторинний електричний струм, залежить від частоти даного струму, а саме значення товщини поверхневого шару будь-якого провідника (Δ), де в основному тече електричний струм, обернено пропорційний квадрату його частоти ($\Delta \rightarrow I/f^2$). Тому основна теплова енергія генерується саме в цьому шарі провідника. Основними перевагами індукційних печей є [32]:

- генерування теплової енергії безпосередньо в матеріалі, що нагрівається і значно знижує втрати енергії;
- досягнення температури розплаву лімітується тільки стійкістю вогнетривкої футеровки печі;
- циркуляція розплаву в печі, яка прискорює процеси плавлення і стабілізації властивостей;
- незначний угар легуючих елементів;
- знижений вміст газів в розплаві.

Основними недоліками індукційних печей є:

- низька температура шлаку і, відповідно, мала його активність,

тобто шлак не має ефективну рафінуючу властивість;

- значне роз'їдання футеровки під дією шлаку;

- ускладненість ремонту футеровки внаслідок малої товщини стінок і вертикального їхнього економічного розташування, особливо це стосується тигля малої місткості;

- обмежена ємність ванни.

Конструкції індукційних печей.

Індукційною піччю називається частина індукційної установки, що включає індуктор, каркас, камеру для плавлення, а також механізми нахилу. Залежно від способу наведення вторинного струму в сплави, що переплавляються, і конструктивного виконання, розрізняють два різновиди індукційних печей: тигельні і каналні. Індукційні тигельні печі (ІТП) широко застосовуються в промисловості для плавлення чорних і кольорових металів як на повітрі, так і у вакуумі і в захисних атмосферах. На даний час використовуються такі печі ємністю від десятків грамів до десятків тонн. Тигельні індукційні печі застосовують, головним чином, для плавлення високоякісних сталей та інших спеціальних сплавів, які вимагають особливої чистоти, однорідності і точності хімічного складу, що недосяжно в полумєневих і дугових печах.

Відмінність каналних печей від тигельних полягає в тому, що перетворення електромагнітної енергії в теплову відбувається в каналі тепловиділення, який повинен бути постійно заповнений електропровідним тілом. Для первинного пуску каналних вакуумних печей у канал заливають розплавлений метал або вставляють шаблон з матеріалу, який буде плавитися в печі. При завершенні плавлення метал з печі зливають в повному обсязі, залишаючи, так зване, болото, яке забезпечує заповнення каналу тепловиділенням для подальшого пуску. Для полегшення заміни подового каменю індукційні одиниці сучасних печей виготовляють відокремленими. У каналних індукційних печах виплавляють кольорові метали та їх сплави, чавун [35].

До переваг ВІВ можна віднести високий рівень перемішування металу, що сприяє усередненню хімічного складу, але конструктивні особливості методу зменшують площу реагування розплаву з рафінуючим середовищем і залежно від режиму видалення домішок може знижуватися загальний ступінь рафінування.

Важливим недоліком цього методу є застосування тиглів, що виготовлені із вогнетривких матеріалів, які контактують з розплавом. Наведення шлакової ванни є також негативним технологічним параметром виплавки жаростійких сплавів. Вакуумно-індукційний переплав застосовується для виготовлення заготовок і подальшого переплаву, тобто в технологіях з декількома переплавами, що збільшує собівартість таких сплавів [36].

1.2.3 Виготовлення катодів методом вакуумно-дугового переплаву

На даний час вакуумно-дуговий переплав (ВДП) є одним з основних способів підвищення якості сталей і сплавів найрізнішого сортаменту (шарикопідшипникові сталі, жароміцні сплави, конструкційні сталі та ін.).

Процес ВДП заснований на перепаві металу у вакуумній дуговій печі в результаті нагрівання і плавлення витратного електрода електричною дугою великої потужності [37].

Електрична дуга горить між торцем переплавного електрода і поверхнею ванни рідкого металу. Переплав здійснюється у вакуумній камері, з якої системою вакуумних насосів безперервно відкачуються гази, що виділяються в процесі переплавки і парування металу. Електрод кріпиться на спеціальному штоку, що вводиться у вакуумну камеру через ковзне вакуумне ущільнення. За рахунок високої температури електричної дуги торець електрода безперервно оплавлюється. Метал у вигляді крапель стікає в мідний водоохолоджувальний кристалізатор, де формується зливоч. Під час оплавлення електрода і наплавлення зливка відбувається автоматичне переміщення електрода таким чином, щоб відстань між

торцем електрода і зливком, що наплавляється, залишалася постійною.

Ще у 1892 р. принцип дугового переплаву з використанням витратного електрода був винайдений М.Г. Слав'яновим; у 1904 р. піч з електродом, що витрачається, при зниженому тиску в робочій камері, була використана для отримання литого танталу - металу з температурою плавлення 2900 °С. Обробку сталі методом ВДП почали використовувати з 1953 р. [38].

У процесі ВДП відбувається значне видалення з металу газів (водень, азот), а також неметалевих включень. При ВДП з металу в результаті випаровування успішно видаляються домішки кольорових металів (Pb, Zn, Bi, Cd, Sb, Sn). Зливки кристалізуються у водоохолоджувальному мідному кристалізаторі, виходять однорідними за хімічним складом і макроструктурою. Процес ВДП використовується для переплавки тугоплавких і високореактивних металів (Nb, Ti, Zr, Mo та ін.), також сплавів на основі нікелю і кобальту.

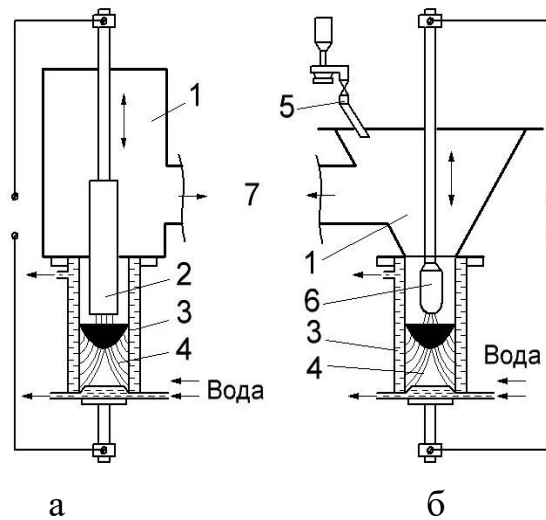
Принцип переплавки металів у вакуумі з використанням в якості джерела тепла електричної дуги був використаний уже після успішного плавлення сталі в дугових електричних печах. Спочатку цей процес застосовували для отримання в литому вигляді тугоплавких металів (танталу, молібдену, титану, цирконію). Саме з'єднання дугового розряду, як джерела тепла з високою температурою, з глибоким вакуумом, який `1201i5013tmjgl'mgaбезпечував відсутність взаємодії легкоокислювальних металів з атмосферою, дозволило отримання зливок цих тугоплавких і високореакційних металів. У середині ХХ століття у зв'язку з швидким розвитком ракетної техніки і реактивної авіації вакуумно-дуговий переплав (ВДП) почали застосовувати для переплавки електродів з жароміцних сплавів. Передумовою для розвитку технології ВДП стосовно отримання зливок і сплавів на основі заліза і кобальту, а також нержавіючих, жароміцних та інших сплавів стало значне поліпшення службових властивостей спеціальних сталей і сплавів після переплавки у вакуумі.

Тому ВДП знайшов широке застосування при отриманні металів і сплавів з гарними фізико-хімічними властивостями, які експлуатуються в умовах високих температур, знакозмінних навантажень, жорсткого рентгенівського випромінювання та ін. [38]. У промислових умовах методом ВДП отримують середньо- і високолеговані сталі, а також сплави на основі Ni, Co і Ti.

На даний час працюють установки ВДП, що дозволяють отримувати високоякісні зливки масою до 60 т. З таких зливків виробляють великі поковки виключно високої якості. Однак більшість установок ВДП, що працюють на металургійних заводах, мають місткість печей (масу зливка), що не перевищує 10-12 т. Найбільшого поширення набули печі ВДП 2-6 т.

Принцип дії і налаштування установок вакуумно-дугового переплаву

Існують два принципово відмінних типи вакуумних дугових печей: з витратним і невитратним електродом (рисунок 1.2).

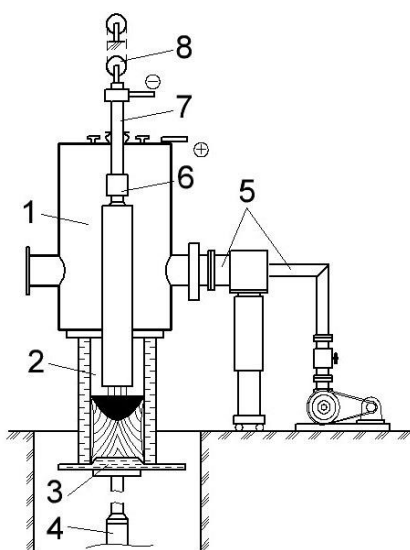


а – з витратним електродом; б – з невитратним електродом

1 – вакуумна камера; 2 – електрод, що витрачається; 3 – кристалізатор; 4 – зливоч, що наплавляється; 5 – живильник для подачі шихти; 6 – тугоплавка насадка електрода, що не витрачається; 7 – напрямок до вакуумних насосів

Рисунок 1.2 – Вакуумні дугові печі [44]

У печах з витратним електродом (рисунок 1.2 а) дуга горить між електродом, що переплавляється і поверхнею ванни рідкого металу, а в печах з невитратним електродом (рисунок 1.2 б) – між графітовим або металевим електродом і розплавленим металом. В обох випадках переплав ведеться у вакуумній камері. При використанні невитратного електрода останній бере участь в процесі тільки як провідник струму. При веденні плавлення з невитратним електродом існує небезпека забруднення металу, що переплавляється матеріалом електрода, внаслідок його електричної ерозії і можливості відколювання частин. Спільним елементом вакуумних дугових печей є мідний водоохолоджувальний кристалізатор, в якому розплавлений метал твердне і поступово набуває форми зливка. Загальна компоновка вузлів установки ВДП приведена на рисунку 1.3.



1 – робоча камера; 2 – кристалізатор; 3 – піддон; 4 – механізм підйому електрода; 5 – вакуумна система; 6 – вузол кріплення електрода до штоку; 7 – шток електродотримача; 8 – підвіска штока

Рисунок 1.3 – Основні вузли установки ВДП

Технологічний цикл ВДП складається з декількох етапів: підготовчі та допоміжні операції, вакуумування робочого об'єму установки і перевірка натікання, власне, переплав.

Підготовчі операції включають виплавку вихідного металу, виготовлення та підготовку електродів, чистку кристалізатора, установку електрода в піч і закріплення його в електродотримачі [45]. Для підготовки витратних електродів використовується метал, виплавлений у відкритих дугових печах. Більш раціонально застосовувати електроди, відлиті на установці напівбезперервного розливання слалі, в основному без обдирання. При цьому відрізається верхня частина електрода з усадочною раковиною: проводиться зачистка абразивами. Кривизна електрода повинна бути не більше 20 мм на всю довжину (7-8 м). Довжина і вага електродів повинні забезпечувати отримання зливка певних маси і розмірів. Переплав може проводитися із затравочною шайбою або без неї. В останньому випадку торець електрода змочується іонізатором (NaCl, KCl). Електродотримачі виготовляються із м'якого заліза або з тієї ж марки сталі, що і витратні електроди, з'єднання електрода з електродотримачем здійснюється або приварюванням, або спеціальним захватом.

Процес переплавки включає три основні періоди: початковий (або період розведення ванни), основний і завершальний (або період виведення усадочної раковини). У початковий період, при роботі із затравочною шайбою, після збудження дугового розряду між торцем електрода і затравочною шайбою, що укладається на піддон, здійснюють короткочасний прогрів електрода малим струмом. Струм протягом 2-5 хв плавно піднімається до значень, що складають 115-120% від робочого струму, а для електрода УПНРС $\sim 120-130\% I_p$ (за практичними даними) [44]. Витримка на підвищеному струмі $\sim 10-30$ хвилин. Після повного наведення ванни струм поступово (протягом 5 хв) знижується до номінального. При розведенні процесу без затравочної шайби попередньо проводять розігрів торця електрода малими струмами, що не викликають його оплавлення. Після закінчення прогріву струм протягом однієї хвилини збільшується до значень, що у 1,3-2 рази перевищують робочий I_p . Після наведення ванни підвищений струм витримується ще протягом 5-10 хв, а

потім поступово знижується до I_p . Напруга на дузі при наведенні ванни рекомендується 26-29 В. Тривалість початкового періоду зазвичай не перевищує 10% загального часу переплаву. На початку основного періоду робочий струм знижують до номінального або робочого значення. Величину робочого струму вибирають з урахуванням діаметра кристалізатора, хімічного складу металу, що переплавляється, та схильності його до ліквідації. Тривалість переплавки електрода складає основну частку тривалості плавлення і на печах різної місткості становить від 3 до 20 годин. У завершальний період плавлення поступово знижують робочий струм, щоб зменшити обсяг рідкої ванни і, відповідно, знизити обсяг усадочної раковини. Після відключення струму зливки охолоджують у вакуумі до повної кристалізації металу у верхній його частині. Потім напускають повітря, охолоджують зливку до темно-червоного кольору. Усадка зливка полегшує його витяг з кристалізатора. Після вивантаження зливка у вакуумну камеру кристалізатор і піддон очищають від конденсату і готують для наступного плавлення. Основним показником нормального ходу плавлення ВДП є швидкість наплавлення зливка.

Таким чином застосування технології ВДП на відміну від ВІВ і ЕПП при виготовленні катодів дозволяє сформувати щільну, дисперсну макро- і мікроструктуру, що відрізняється однорідним фазовим складом і рівномірним розподілом структурних складових. Використання методу ВДП (у порівнянні з методами ВІВ та ЕПП) максимально наближає структуру, хімічний склад та властивості сплаву до катодів, отриманих методом ГМ.

Раціонально використовувати у серійному виробництві катодів технологію ВДП, так як вона у разі дешевша за ГМ.

Вакуумно-дуговий переплав є порівняно недорогим з економічної точки зору. Але даний метод припускає використання витратного електрода та «глухого» кристалізатора. При цьому виникає потреба у застосуванні витратного електрода такого ж хімічного складу, як і сплав

даного типу. Проведення процесу невитратним електродом чи застосування порційної подачі компонентів є неможливим у зв'язку з використанням «глухого» кристалізатора. Виплавка в такий кристалізатор до того ж може призвести до неоднорідності за хімічним складом по висоті зливка.

1.3 Способи підвищення довговічності деталей з нікелевих сплавів при газовій корозії

Підвищення жаростійкості авіаційних сплавів досягається легуванням алюмінієм та хромом. Це дозволяє сформувати на робочій поверхні деталей стійку оксидну плівку, що складається з оксидів Cr_2O_3 , Al_2O_3 , NiCr_2O_4 . Для отримання ефективних захисних покриттів використовують багаторазове легування алюмінідами, створюють вдосконалені композиції і впроваджують нові технологічні процеси.

Алюмініди CoAl , Ni_3Al , NiAl формують основну інтерметалідну фазу більшості захисних покриттів деталей ГТД, що працюють при високих температурах [64].

Дифузійні захисні покриття, що одержують технологіями порошкового або газового алітування [67], хромоалітування [68], шлікерного алітування, алюмосиліціювання продовжують широко використовуватись для підвищення механічних характеристик деталей. Проте, такі покриття обмежуються по товщині до 0,04 ... 0,06 мм через їх значну крихкість, тому важливо підвищувати стійкість до розтріскування покриттів [69].

Найбільш широкого розповсюдження отримали конденсаційні покриття, одержувані магнетронним, іонно-плазмовим, електронно-променевим методами. Хімічний склад сплавів для жаростійких покриттів наведено в таблиці 1.3 [7].

Багатошарові композитні покриття, що містять у своєму складі W, Ta, Gd, La, Pt, Hf, Si, Yb створюють шляхом спільного застосування різних

методів [7].

Таблиця 1.3 – Хімічний склад сплавів для покриттів

Марка сплаву	Вміст елементів, % мас					
	Ni	Al	Cr	Co	Y	Si
СДП-1	Осн.	12	20	20	0,4	-
СДП-2	Осн.	12	20	-	0,4	-
ВСДП-11	-	Осн.	-	-	1,5	5
ВСДП-16	15	Осн.	-	-	1,5	-

Введенням в покриття таких мікролегуючих елементів як Y, La, Ce, Hf, Er, Yb підвищують стійкість оксидної плівки до відколювання при термоциклах.

Для гальмування дифузійних процесів в покриття вводять тугоплавкі метали Ta, W, Re, чи формують бар'єрні шари з карбідів легуючих елементів. Такі покриття добре протидіють не тільки окисленню, але і сольовій корозії. Для подрібнення зерна структури покриття нерідко рекомендують застосування термомеханічної обробки. Така обробка підвищує в'язкість і стійкість до утворення тріщин покриттів. Одночасно досягається бажаний напружений стан в системі сплав-покриття, формуються залишкові стискаючі напруження, які позитивно впливають на міцність деталей та їх стійкість до втоми.

Так само слід зазначити, що при високих температурах, понад 1400 °С, досить ефективно застосування теплбар'єрних покриттів, які зазвичай включають жаростійку металеву і керамічну складові.

Керамічна складова покриття, як правило, складається з оксиду цирконію, стабілізованого оксидом ітрію. Вона зазвичай має стовпчасту дендритну структуру з орієнтованих монокристалів. Фазовий склад нанесеного поверхневого шару металічного покриття визначає орієнтацію кристалів конденсату.

Кристали керамічного конденсату, зароджуючись у вакуумі, повторюють орієнтацію кристалів поверхневої металевої структури.

Плазмова технологія нанесення керамічних покриттів дозволяє сформувати шар щільної кераміки. Проте, такі покриття менш стійкі до пластичної деформації, легше розтріскуються і відшаровуються. Якість теплобар'єрних покриттів значною мірою залежить від якості керамічних порошків: ZrO_2 , Y_2O_3 . Наявність Y_2O_3 обумовлено необхідністю стабілізації ZrO_2 від фазових перетворень. Плазмова технологія нанесення теплобар'єрних покриттів застосовується переважно при виготовленні соплових апаратів і деталей камери згоряння авіадвигунів [7].

Для підвищення теплопровідності в кераміку вводять оксиди рідкісноземельних металів. Стійкість теплобар'єрних покриттів найбільше залежить від стійкості композитного покриття до пропускання кисню до металічної основи.

Склад і властивості зносостійких та жаростійких покриттів значною мірою залежать від технології їх нанесення. Методи створення таких покриттів за допомогою осадження діляться на фізичні (PVD) і хімічні (CVD). Усередині цих двох груп існує досить велика кількість методів нанесення покриттів, у тому числі комбінованих або методів з підтримкою чи активацією процесу від інших джерел енергії [75].

Процеси нанесення покриттів PVD і CVD засновані на різних явищах. Кінцевий же результат і в тому, і в іншому випадку - осадження з газової фази матеріалу покриття на підкладку. При фізичному осадженні (PVD) матеріал покриття переходить з твердого стану в газову фазу в результаті випаровування під впливом теплової енергії або в результаті розпилення за рахунок кінетичної енергії зіткнення часток з матеріалом. Енергія, розподіл і щільність потоку часток визначаються методом нанесення, параметрами процесу і формою часток. Нанесення покриттів методом PVD проводиться при температурі до 450 °C, що практично не обмежує вибір матеріалів, на які наноситься покриття. PVD - процеси

проводять у вакуумі або в атмосфері робочого газу при досить низькому тиску. Вакуум необхідний для полегшення перенесення часток від джерела (мішені) до виробу (підкладки) при мінімальній кількості зіткнень з атомами або молекулами газу. Ця ж умова визначає обов'язковість прямого потоку часток. У результаті покриття наноситься тільки на ту частину виробу, яка орієнтована до джерела часток. Швидкість осадження залежить в цьому випадку від відносного розташування джерела і матеріалу. Для рівномірного нанесення покриття необхідний плавний рух матеріалу або застосування кількох, певним чином розташованих, джерел. У той же час, оскільки покриття наноситься тільки на поверхню, направлену до джерела часток, метод дозволяє селективно наносити покриття тільки на певні частини поверхні, залишаючи інші без нанесеного шару. Це абсолютно неможливо при використанні методу хімічного осадження (CVD). Основними факторами, що визначають якість покриття, нанесеного методом фізичного осадження, є чистота вихідних матеріалів і реакційного газу, а також необхідний рівень вакууму [75].

Метод хімічного осадження (CVD) практично не має обмежень за хімічним складом покриттів. Всі присутні частки можуть бути осаджені на поверхню матеріалу. Які покриття при цьому утворюються, залежить від комбінації матеріалів і параметрів процесу. Якщо процес протікає при заповненні простору реакційноздібним газом (киснем, азотом або вуглеводнями), в результаті хімічної реакції між атомами завантажених металів і молекулами газу відбувається нанесення оксидних, нітридних та карбідних покриттів. Склад покриття залежить від парціального тиску газу і швидкості осадження покриття. При використанні CVD-методу хімічні реакції відбуваються в безпосередній близькості або на поверхні матеріалу, що оброблюється. На противагу процесам PVD, при яких тверді матеріали покриття переводяться в газоподібну фазу випаровуванням або розпиленням, при CVD-процесі в камеру для нанесення покриття подається суміш газів, причому для протікання необхідних хімічних

реакцій потрібна температура до 1100 °С [75].

Процеси CVD відбуваються при тисках 100-1000 Па. Покриття наноситься на всю поверхню виробу. Відпадає необхідність обертання виробу, яке має місце при методі PVD. Це одна з переваг CVD. Завдяки високій температурі нанесення, що забезпечує часткову дифузію і наноситься в основу, покриття CVD характеризуються кращою адгезією.

У вітчизняному машинобудуванні для напилення жаростійких покриттів частіше застосовується технологія, розроблена ВІАМ. Та установки АПН-250 або МАП призначені для нанесення, жаростійких, ерозійно-стійких, зносостійких та інших видів покриттів іонно-плазмовим способом у вакуумі.

При використанні установки АПН-250 застосовується метод іонно-плазмового напилення. Його суть полягає в тому, що у вакуумній камері із залишковим тиском $6,65 * 10^{-2}$ Па запалюється дуга між циліндричним катодом, що знаходиться в центрі і, розташованим по периферії, кільцевим анодом. Струм дуги локально (в катодній плямі) нагріває катод настільки, що його матеріал випаровується й іонізується. У проміжку між катодом і анодом розташовані лопатки, на які теж подається електрична напруга, і іони потрапляють не тільки на анод, а й на ці лопатки, прискорюючись електричним полем.

Переваги іонно-плазмового процесу осадження:

1. Можливість управління енергією часток плазми, шляхом прискорення або гальмування іонів зміною електричного потенціалу деталі.
2. Спрямованість потоку плазми, що забезпечує високі значення КІМ катода.
3. Можливість осадження покриття при відносно низькій температурі основи (немає необхідності зовнішнього підігріву).
4. Можливість отримання складних покриттів.

Недоліки іонно-плазмового процесу осадження:

1. Недостатня кількість технологічних посадочних місць для установки напилювання лопаток.
2. Неефективна витрата матеріалу катода – 50 ... 60% залишається невикористаним через його геометрію.
3. Для проведення дослідних робіт потрібні значні витрати на виготовлення катодів через їх геометрію і матеріал.

Установка іонно-плазмового напилення КІБ розробки АТ «МОТОР СІЧ» призначена для отримання покриттів як і АПН-250, але має ряд переваг:

1. Можливість напилення холодним катодом.
2. Можливість використання катодів з економічною геометрією.
3. Раціональне до 90 % використання матеріалу катодів.

На цій установці можливо виконання робіт з нанесення комплексних жароміцних покриттів ВСДП-11 і СДП-2 лопаток газотурбінних двигунів. Але ресурс експлуатації даних покриттів недостатній і може бути збільшений за рахунок доопрацювання технології та удосконалення хімічного складу шляхом введення рідкісноземельних металів.

1.4 Обґрунтування мети і формулювання задач наукового дослідження

Приведені в розділі дослідження показали актуальність теми та необхідність вирішення питань, пов'язаних з вивченням впливу технології виготовлення катодів, впливу модифікаторів на структуру матеріалу, який випаровується, створення технології нанесення покриття з диференційованою товщиною шару. Вирішення даних проблем на належному теоретичному і методичному рівні дозволить збільшити ресурс покриття, підвищити його жаростійкість і, як наслідок, збільшити ресурс самого двигуна в цілому.

На сьогоднішній день для підвищення експлуатаційних характеристик лопаток газотурбінних двигунів з жароміцних сплавів застосовуються захисні покриття, основою яких є система Ni-Cr-Al. Нікелеві жароміцні сплави є складними багатокомпонентними і багатофазними системами. В них під дією високих температур і напруг безперервно протікають фазові і структурні перетворення, тобто ці сплави є з фізико-хімічних позицій динамічними системами. Застосування складних систем легування обумовлено необхідністю стабілізації структури, а, отже, і властивостей нанесених покриттів. Такі сплави виготовляються із застосуванням модифікування і мікролегування.

Відомо, що при виробництві жаростійких і жароміцних сплавів на нікелевій основі в їх склад вводяться високоактивні, поверхнево-активні елементи (Y, Hf і La) з метою формування дрібнодисперсних фаз, що стабілізують структуру сплаву і підвищують його властивості. Ці елементи активно взаємодіють з домішками - елементами впровадження (переважно з вуглецем і киснем) і можуть утворювати стабільні карбіди і оксиди на кордонах розділу (міжфазні кордони, скупчення дислокацій і ін.). Також можливе утворення надлишкових з'єднань з Ni і Al.

Крім того, ітрій і лантан локалізуються на кордонах розділів фаз і структурних складових, утворюють надлишкові з'єднання, як з нікелем і алюмінієм, так і з елементами домішок.

Ітрій у відповідних пропорціях стабілізує оксидні плівки алюмінію і хрому, покращує адгезію нанесених покриттів до матеріалу підкладки, підвищує термічну стабільність сплавів, уповільнює коагуляцію зміцнюючих фаз. Ітрій, розчинений в нікелевої матриці, сприятливо діє на жароміцність нікелевих сплавів, що пояснюється гальмуванням дифузійних процесів. Введення ітрію в кількості, що перевищує його межу розчинності (для нікелю це 0,2-0,3 мас.%), призводить до виділення усередині і по кордонах зерен з'єднання, за хімічним складом близького до фази Ni_3Y . При цьому має місце зниження короточасної міцності і

в'язкості.

Hf так само не розчиняється в твердих розчинах і локалізується на кордонах розділів фаз, що призводить до подібного ефекту.

Практично відсутня інформація про вплив Hf і La на характеристики витратних катодів, (їх гомогенність), а як наслідок, і на властивості нанесених покриттів. Відомо, що розчинність La в Ni становить 0,3 ... 0,4% і Hf в Ni знаходиться на рівні приблизно 2%. La і Hf позитивно впливають на гомогенність хімічного складу і однорідність структури сплавів на нікелевій основі.

Оскільки основну роль в характеристиках нанесених покриттів грає якість застосовуваних катодів, необхідно забезпечити отримання їх хімічної, структурної та фазової однорідності з мінімальною кількістю дефектів. Концентрація модифікуючих елементів знаходиться на рівні десятих відсотка їх введення і рівномірний розподіл утруднено і є дуже важливим завданням.

Виходячи з вищевикладеного, прийнято рішення використовувати такі елементи, як La і Hf у вигляді альтернативних мікродобавок замість ітрію, з метою підвищення гомогенності хімічного складу, однорідності структури і технологічності процесу нанесення покриттів.

1.5 Висновки до розділу 1

Тому, враховуючи вище сказане, метою дисертаційної роботи є удосконалення металургійних процесів отримання катодів нової геометрії та складу, шляхом підвищення комплексу якісних та технологічних характеристик зливків. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити ряд наступних задач:

1. Дослідити вплив технологічних чинників та методів виготовлення катодів на процеси формування структури сплава.
2. Дослідити вплив технологічних чинників на процес осадження та

формування жаростійких покриттів на деталях ГТД.

3. Дослідити вплив модифікуючих елементів на характеристики жаростійкості.

4. Розробити модель та систему оптимізації властивостей сплавів.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТІВ КАТОДАМИ З РІЗНИХ СКЛАДІВ

2.1 Обґрунтування використання нової іонно-плазмової установки КІБ замість АПН-250

З першого погляду використання установки АПН-250 здається більш раціональним за рахунок великого об'єму катода і кількості випаровуваного з нього матеріалу, але це не так (рисунок 2.1).



а – трубний катод; б – циліндричний катод.

Рисунок 2.1 – Загальний вигляд катодів

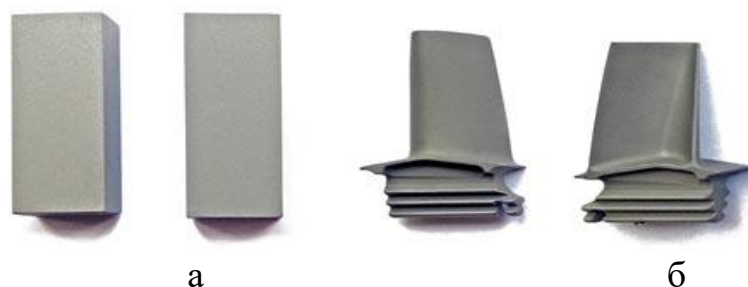
Вага нового трубного катода 25 кг (розмір катода: зовнішній $\text{Ø}185$ мм, внутрішній $\text{Ø}140$ мм, висота 355 мм), а спрацьованого катода, який підлягає заміні, 10 кг, тобто реальне використання матеріалу тільки 15 кг. Крім того, катод у процесі роботи нерівномірно зношується, в наслідок чого, на його поверхні з'являється хвилястість, яка потребує механічної обробки, це, зазвичай, ще 2 операції з проточування, при яких він також втрачає масу, приблизно по 2,5 кг за одну обробку.

Отже кінцевим результатом можна вважати 10 кг розпиленого та осаджуваного матеріалу, 15 кг відходять у переробку. Коефіцієнт використання катода АПН-250 складає 35 .. .40%.

В установці КІБ використовують чотири циліндричні катоди масою 2,5 кг, (розмір катоду: зовнішній Ø120 мм, висота 45 мм), що сумарно складає 10 кг матеріалу. Вага катоду, що підлягає заміні, 0,5 кг, тобто сумарно це 2 кг залишкового матеріалу [90]. Коефіцієнт використання катода КІБ складає 70 ... 80%, що у двічі перевищує коефіцієнт використання катода АПН-250. Крім того, залишок катода (замкова частина) використовується повторно, що суттєво впливає на собівартість виготовлення нового катода. Ще одним плюсом установки КІБ є кількість лопаток, що одночасно напиляються 288 проти 72 на установках АПН-250.

Нанесення жаростійких покриттів.

Покриття наносилось на робочі лопатки турбіни та прямокутні зразки (рисунок 2.2), виготовлені із застосовуваного нікелевого жароміцного сплаву ЖС32-ВІ. Було нанесено, як серійне покриття (Ni-Cr-Al-Y) виготовлене різними способами), так і покриття з різними модифікуючими елементами.



а – прямокутні зразки; б – натурні деталі

Рисунок 2.2 – Зразки та деталі для нанесення покриттів

Покриття наносилось на серійній установці КІБ, параметри технологічного процесу ідентичні для кожного з варіантів, товщина покриття при цьому становила 0,03 мкм ... 0,05 мм (таблиця 2.1).

Таблиця 2.1 – Товщина вимірювання шару покриття на поверхні лопатки

Метод	Товщина покриття, мкм
-------	-----------------------

виготовлення катодів	вх. кромка	вих. кромка	спинка	корито	Полиця хвостовика
Лиття	37 ... 40	36 ... 40	40 ... 45	35 ... 42	25 ... 35
ГМ	38 ... 42	37 ... 41	41 ... 45	36 ... 44	27 ... 35
ВДП	38 ... 40	36 ... 38	40 ... 43	37 ... 42	27 ... 33
ЕПП	40 ... 42	38 ... 42	41 ... 43	36 ... 41	26 ... 32

Слід зазначити, що шорсткість поверхні лопаток та зразків з покриттям Ni-Cr-Al-Y обумовлюється наявністю крапельної фази, яка є невід'ємною частиною плазмового потоку при електродуговому розпиленні матеріалу катода.

Величина і розміри крапельної фази залежать від багатьох параметрів процесу (матеріалу катода, струму дуги, відстані до поверхні, що оброблюється, залишкового тиску в об'ємі камери і т.д.). В даному випадку, при аналогічних параметрах процесу нанесення, розмір і кількість крапельної фази на поверхні лопатки залежить тільки від стану матеріалу, який випаровується з катодів, тобто в кінцевому підсумку від технології їх отримання.

Аналіз отриманих результатів показує, що в усіх варіантах покриттів тріщин і відшарувань не виявлено. Хімічний склад і кількісний вміст елементів по кожному з варіантів представлений в таблиці 2.2. Зчеплення шару покриття з поверхнею лопаток міцне.

Таблиця 2.2 – Хімічний склад і кількісний вміст елементів [91]

№ зони	Елемент, мас. %											
	ГМ			ВІВ			ВДП			ЕПП		
	Al	Cr	Ni	Al	Cr	Ni	Al	Cr	Ni	Al	Cr	Ni
1	6,40	5,38	63,32	6,13	5,39	62,58	6,22	5,55	64,35	7,15	6,78	65,65
2	8,68	11,11	69,47	7,62	9,44	67,67	10,68	10,25	67,45	9,56	9,55	65,35
3	7,19	24,98	59,31	8,65	22,62	60,67	8,19	23,75	59,31	8,55	22,73	57,85

4	7,75	19,05	68,28	7,54	19,98	67,05	7,45	18,82	68,28	7,68	19,54	66,25
---	------	-------	-------	------	-------	-------	------	-------	-------	------	-------	-------

Примітка: зона 1 – поверхня покриття, зона 2 – зона на глибині 10 мкм від поверхні, зона 3 – зона на глибині 20 мкм від поверхні, зона 4 – зона на глибині 30 мкм від поверхні.

За допомогою скануючої растрової електронної мікроскопії оцінювали якість поверхні лопаток з покриттям Ni-Cr-Al-Y, нанесеним із застосуванням досліджуваних катодів і проводили кількісну оцінку крапельної фази з розбивкою по фракціям на фіксованій площі кожної з порівнюваних зразків-лопаток (таблиця 2.3)

Таблиця 2.3 Кількість і розміри крапельної фази на поверхні покриття

Метод виготовлення	Розмір фракції, шт.			
	0.010 ... 0.025 мм	0.025 ... 0.045 мм	0.045 ... 0.060 мм	0.060 ... 0.080 мм
ГМ	79	44	4	0
Литий	142	84	3	2
ВДП	64	58	3	0
ЕПП	123	105	4	5

З таблиці 2.3 випливає, що покриття отримані із застосуванням методів ГМ та ВДП для виготовлення катодів, мають в два рази менше крапельної фази розміром 0,01 ... 0,045 мм і повну відсутність крапельної фази розміром більше 0,065 мм, порівняно з катодами, виготовленими методами ВІВ та ЕПП. Зменшення крапельної фази забезпечує більш низьку шорсткість поверхні лопаток і, відповідно, кращу якість поверхні лопатки в цілому [18].

Слід відзначити, що від шорсткості поверхні лопаток залежить опір газодинамічного середовища. Таким чином при зменшенні шорсткості, збільшується КПД двигуна.

Також слід зазначити, що в процесі експлуатації катоди, виготовлені методами ГМ, та ВДП показали рівномірніше припрацювання поверхні, що

забезпечило збільшення кількості циклів роботи катода.

Цей ефект викликано із-за меншого розміру матеріалу структури в катоді, що впливає на процес випаровування матеріалу.

2.2 Дослідження покриття, нанесеного катодом ВДП, легованим Y

Нижче представлено покриття нанесене методом ВДП (рисунок 2.5) з модифікатором Y.

При нанесенні покриття складу Ni-Cr-Al-Y, його структура рівномірна, дефектів, таких як пористість, тріщини та відшарування, не виявлено.

Є незначні дефекти зони переходу основного матеріалу та покриття, але це є допустимим. В процесі нанесення катода випаровувались стабільно, горіння дуги рівномірне [91].

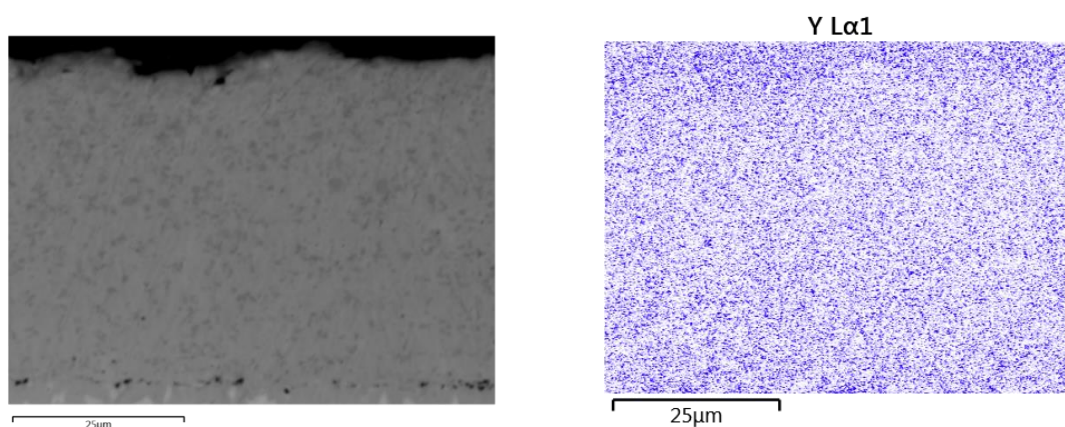


Рисунок 2.5 – Покриття, нанесене катодом, легованим Y [91]

З рисунку 2.5 ми бачимо, що модифікатор Y розподілений рівномірно по всій товщині покриття. Це обумовить рівномірність властивостей в процесі його експлуатації.

2.3 Дослідження покриття, нанесеного катодом ВДП, легованим La

При нанесенні покриття складу Ni-Cr-Al-La, його структура рівномірна, дефектів, таких як пористість, тріщини та відшарування, не виявлено.

Є незначні дефекти зони переходу основного матеріалу та покриття, але це є допустимим. В процесі нанесення катоди випаровувались дуже нестабільно, мало місце короткочасне локальне горіння дуги, але на якість самого покриття це не вплинуло.

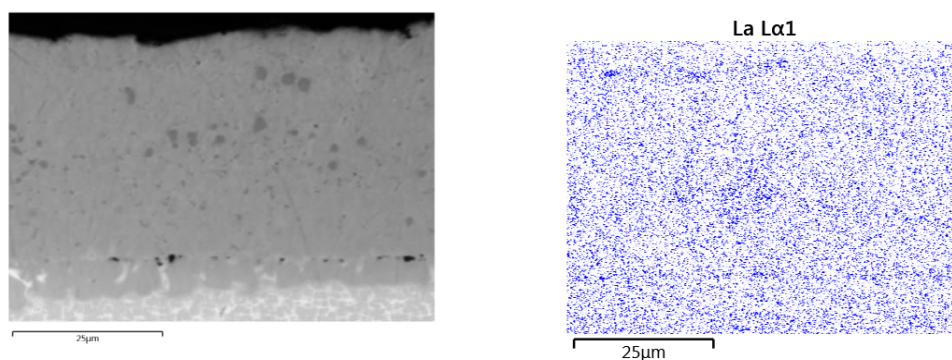


Рисунок 2.6 – Покриття, нанесене катодом, легованим La

З рисунку 2.6 видно, що модифікатор La розподілений рівномірно по всій товщині покриття. Це обумовить рівномірність властивостей в процесі його експлуатації. Також слід зазначити, що наявність лантану у структурі збільшило розміри поєднань з хромом, це може негативно вплинути на подальшу експлуатацію покриття.

2.4 Дослідження покриття, нанесеного катодом ВДП, легованим Hf

При нанесенні покриття складу Ni-Cr-Al-Hf, його структура рівномірна, дефектів, таких як пористість, тріщини та відшарування, не

виявлено.

Є незначні дефекти зони переходу основного матеріалу та покриття, але це є допустимим. В процесі нанесення катоди випаровувались стабільно, горіння дуги рівномірне.

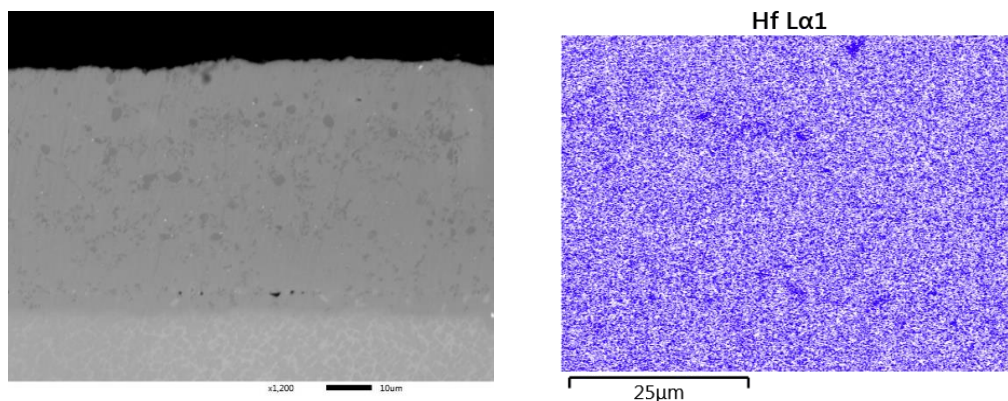


Рисунок 2.7 – Покриття, нанесене катодом, легованим Hf

З рисунку 2.7 бачимо, що модифікатор Hf розподілений рівномірно по всій товщині покриття. Але є місця вкраплення великої кількості Hf в самому покритті, це обумовлено тим, що гафній коагулюється в покритті після нанесення. Ці вкраплення розміром менше за 0,001 мм і розподілені рівномірно.

2.5 Дослідження покриття, нанесене катодом ВДП, легованим La + Y

При нанесенні покриття складу Ni-Cr-Al-La-Y, його структура рівномірна дефектів, таких як пористість, тріщини та відшарування, не виявлено.

Майже відсутні дефектні зони переходу основного матеріалу. В процесі нанесення катоди випаровувались стабільно, горіння дуги рівномірне, але гірше за Ni-Cr-Al-Y.

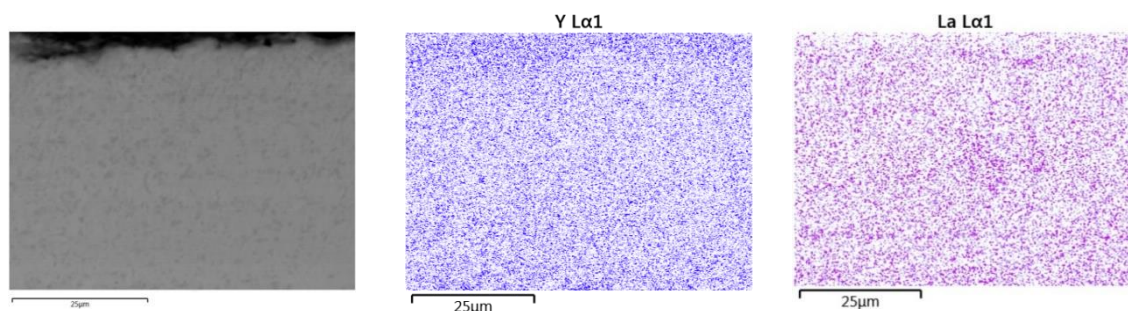


Рисунок 2.8 – Покриття, нанесене катодом, легованим La+Y

З рисунку 2.8 видно, що комплекс модифікаторів La-Y розподілено рівномірно по всій товщині покриття скупчення модифікуючих елементів відсутні.

2.6 Дослідження покриття, нанесене катодом ВДП, легованим Y + Hf+La

При нанесенні покриття складу Ni-Cr-Al-Y-Hf-La, його структура рівномірна, дефектів, таких як пористість, тріщини та відшарування, не виявлено.

Є незначні допустимі дефекти зони переходу основного матеріалу та покриття, але це є допустимим. В процесі нанесення катоди випаровувались стабільно, горіння дуги рівномірне.

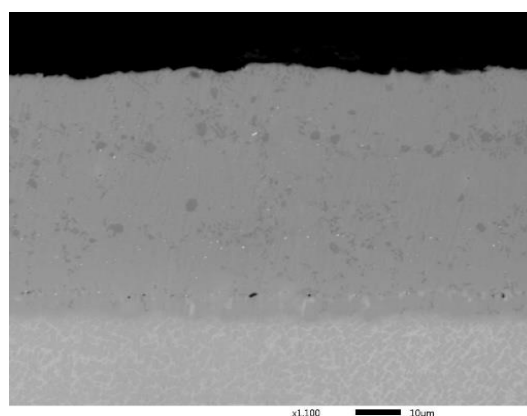


Рисунок 2.9 – Покриття, нанесене катодом, легованим Y + Hf + La

З рисунку 2.9 видно, що комплекс модифікаторів $Y + Hf + La$ розподілено рівномірно по всій товщині покриття. Це обумовить рівномірність властивостей в процесі його експлуатації.

2.7 Порівняння властивостей отриманих покриттів з СДП-2

Нанесення усіх видів покриттів з різними модифікаторами показало суттєвий вплив структури на формування розміру крапельної фази.

Визначено, що La , хоча і подрібнює структуру катода найліпше з усіх варіантів, має найгірший показник горіння дуги та переносу, це виключає його, як самостійного модифікатора сплаву. Раціонально використовувати La тільки у комплексі з іншими модифікаторами.

Ітрій, що серійно використовується, має добрий показник горіння та середні показники крапельної фази та подрібнення структури катода. Його використання є раціональним при нанесенні покриттів з невеликими вимогами до шорсткості.

Додавання Hf дозволило максимально зменшити крапельну фазу по відношенню до Y або La .

Встановлено, що за рахунок подрібнення структури сплаву в катодах, виготовлених методом ВДП, вдалося повністю позбавитись в покритті крапельної фази розміром більше 60 мкм. Це дозволило зменшити шорсткість поверхні лопатки з $Ra\ 2,02\dots 2,21$ до $1,85\dots 1,90$.

2.8 Висновки до розділу 2

1. Доведено, що структура катодів впливає на технологію нанесення покриття та застосування різних рідкісноземельних елементів або їх комплексів для модифікування катодів, параметри випаровування матеріалу при осадженні та забезпечення властивості покриття.

2. Встановлено вплив модифікаторів Y , Hf , La та їх комплексів на

формування структури покриття. Визначено, що La має найгірший показник горіння дуги, структура отриманого покриття рівномірна, бездефектна. Додавання модифікаторів Y та Hf дозволило підвищити показники стабільності горіння дуги. Доведено, що оптимізований склад Ni-Cr-Al-Y-Hf-La (Ni-осн., Cr - 18 ... 22, Al - 11 ... 13, Y - 0,2 ... 0,3, Hf - 0,2 ... 0,3, La - 0,1 ... 0,2) забезпечує оптимальну структуру покриття.

3. Встановлено, що за рахунок зменшення структури сплаву в катодах, виготовлених методом ВДП, вдалося повністю позбавитись в покритті крапельної фази розміром більше 60 мкм. Це дозволило зменшити шорсткість поверхні лопатки з Ra 2,02...2,21 до 1,85...1,90.

РОЗДІЛ 3

ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ЛОПАТОК ТУРБИНИ З ЖАРОСТІЙКИМ ПОКРИТТЯМ

3.1 Технологія нанесення градієнтного покриття; зменшення шорсткості поверхні

В процесі експлуатації лопаток турбіни мають місце пошкодження вхідної кромки пера лопатки з покриттям ГЦП + СДП-2 (ГЦП - газоциркуляційне покриття CrAl, СДП-2 - жаростійкий сплав системи Ni-Cr-Al-Y) (рисунок 3.1). Пошкодження лопаток кваліфіковані як ерозійно-корозійний знос в умовах дії робочих температур, при цьому перегріву матеріалу самої лопатки (ЖС32-ВІ) під час експлуатації не виявлено.

Аналіз характеру і місць виникнення дефектів дозволив розглянути необхідність застосування нового покриття зі збільшеним захисним шаром на вхідний кромці пера лопатки.

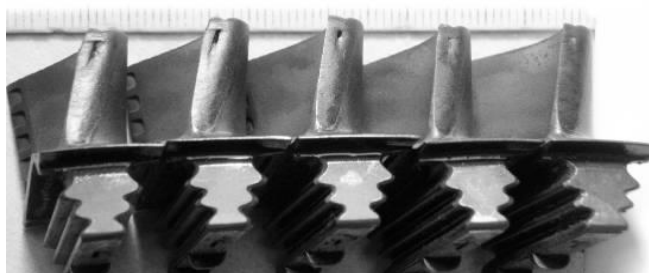


Рисунок 3.1 – Ерозійно-корозійний знос вхідної кромки пера лопаток з серійним покриттям ГЦП + СДП-2

Покриття повинне враховувати навантаження та знос в різних зонах пера лопатки. Так, на вхідний кромці лопатки потрібна додаткова товщина покриття, щоб збільшити час роботи. Для забезпечення цих вимог розроблене градієнтне покриття з локальним нанесенням додаткових шарів.

В якості заміни існуючого покриття ГЦП + СДП-2 запропоноване градієнтне покриття ГЦП + СДП-2 + СДП-2, при цьому останній додатковий шар СДП-2 наносять лише на вхідну кромку пера лопатки (рисунок 3.2).

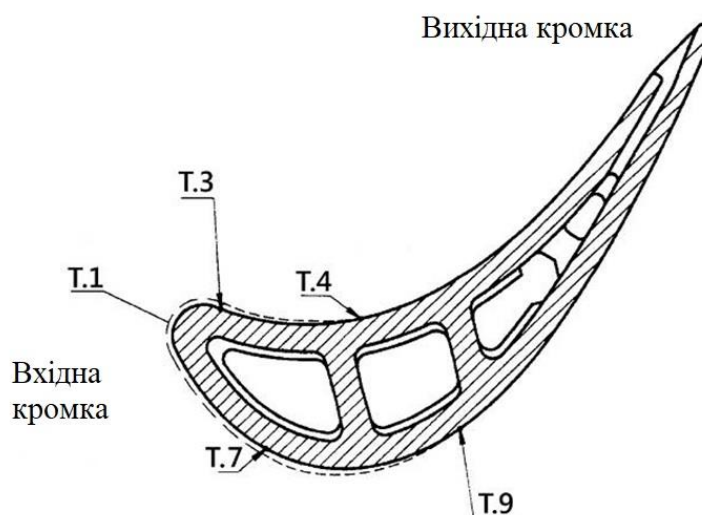


Рисунок 3.2 – Схема нанесення додаткового шару покриття (додатковий шар покриття вказано пунктиром)

Згідно зі схемою (рисунок 3.2) товщина додаткових шарів в точці Т.1 повинна бути максимальною, а в точках Т.4 і Т.9 мінімальною. З огляду на ці вимоги підібрані режими нанесення. Так як на установці КІБ можливе включення кожного з 4 катодів окремо, то катоди, які розташовані зі сторони вихідної кромки пера лопатки були знеструмлені, а катоди з боку вхідної кромки продовжували працювати. Це забезпечило нанесення градієнтного за товщиною шару покриття і виконання вимог схеми диференційованого розподілу товщини (рисунок 3.2).

Для відпрацювання технології нанесення і формування диференційованих шарів покриттів СДП-2 використовувалися лопатки без попередньо нанесеного покриття ГЦП. Контроль товщини сформованого диференційованого шару проводився в точках згідно схеми (рисунок 3.3).

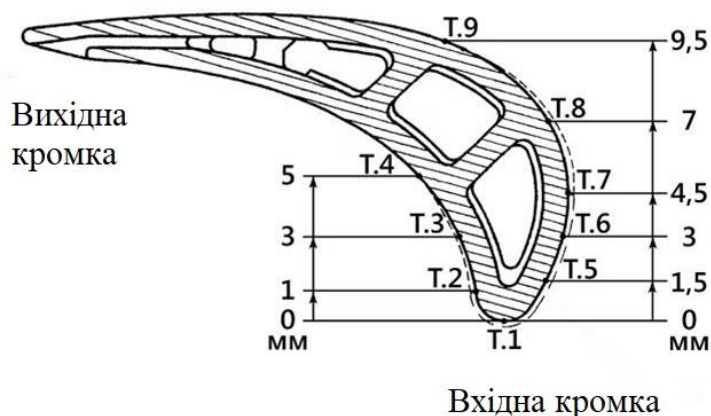


Рисунок 3.3 – Схема розташування контрольних точок (Т.1 ... Т.9) вимірювань товщини покриття

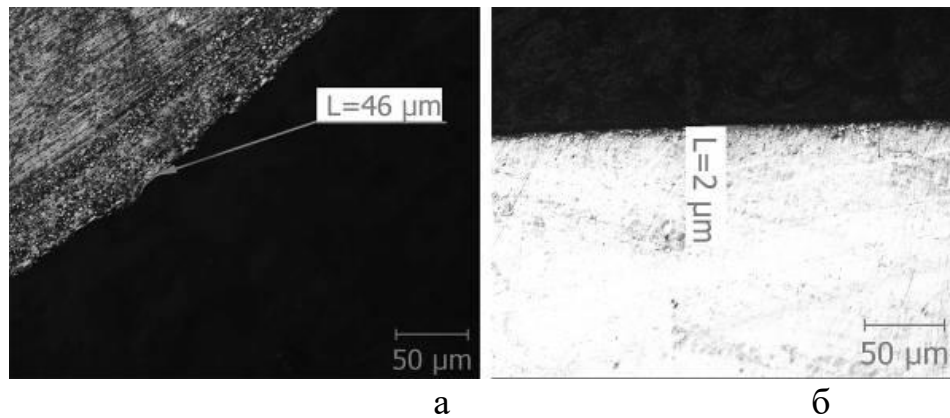
Результати вимірювань товщини шару покриття СДП-2, нанесеного на вхідну кромку згідно рисунка 3.3, представлені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Результати вимірювань товщини покриття СДП-2 в контрольних точках (рисунок 3.3)

Зраз. №	Товщина шару покриття, мкм								
	Т.1	Т.2	Т.3	Т.4	Т.5	Т.6	Т.7	Т.8	Т.9
1	50	44	19	6	50	46	42	8	2
2	48	42	17	3	47	42	40	7	1
3	48	44	19	4	48	45	41	5	2

З таблиці 3.1 видно, що максимальна товщина покриття СДП-2 в точці Т.1 – 48 мкм ... 50 мкм, а мінімальна 1 мкм ... 6 мкм в точках Т.4 і Т.9. Встановлено рівномірне зменшення товщини покриття від Т.1 до Т.9 і Т.4.

Мікроструктурний аналіз шліфів покриття СДП-2 в точках Т.4 і Т.9 (рисунок 3.4) встановив, що зчеплення шару з поверхнею лопатки досить міцне, без дефектів, відшарувань не виявлено.



а - точка Т.4; б - точка Т.9 (рисунок 3.3)

Рисунок 3.4 – Мікроструктура шару покриття СДП-2

Із отриманих результатів вимірювань товщини покриття СДП-2 за профілем пера лопатки (таблиця 3.1) можна зробити висновок, що використання спеціалізованої оснастки забезпечило формування диференційованих шарів покриття необхідних величин.

Технологія нанесення градієнтного жаростійкого покриття ГЦП + СДП-2 + (СДП-2 на вхідну кромку) вимагала попереднього нанесення шару покриття ГЦП + СДП-2 товщиною 40 мкм ... 50 мкм по всьому периметру пера лопатки.

Результати вимірювань товщини шару ГЦП + СДП-2 + (СДП-2 на вхідній кромці), що здійснювалося за схемою (рисунок 3.3) в контрольних точках в двох перетинах (рисунок 3.5) представлені в таблиці 3.2.

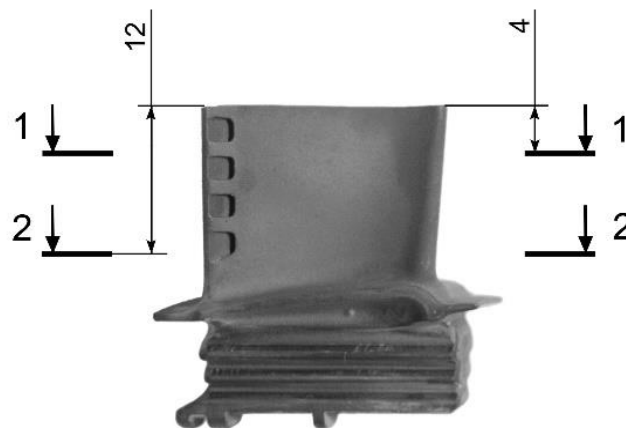


Рисунок 3.5 – Схема місць виготовлення мікрошліфів для виміру

товщини покриття.

Таблиця 3.2 – Результати вимірювань товщини шару ГЦП + СДП-2 + (СДП-2 на вхідну кромку лопатки) в перерізі 1-1 і перерізі 2-2.

Зразок. к. №	Товщина шару покриття, мкм								
	T.1	T.2	T.3	T.4	T.5	T.6	T.7	T.8	T.9
Переріз 1-1									
7	92	84	57	46	91	92	82	47	45
8	95	87	58	45	93	94	84	49	47
9	93	86	58	44	90	89	81	46	44
Переріз 2-2									
7	91	80	50	45	84	88	83	57	43
8	94	85	53	46	87	90	86	56	45
9	93	83	51	45	84	84	82	55	43

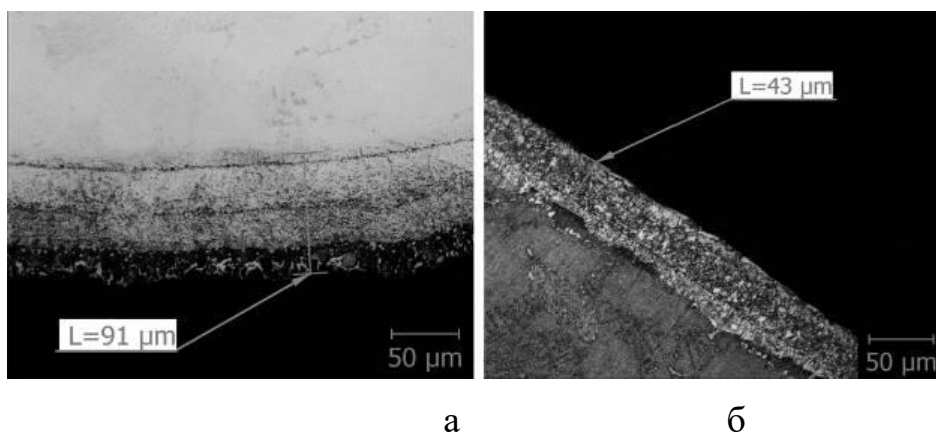
З таблиці 3.2 видно, що максимальна товщина багатошарового покриття доводиться в точці Т.1 - 91 ... 95 мкм, мінімальна – 43 мкм ... 47 мкм в точках Т.4 і Т.9.

Встановлено рівномірне зменшення товщини покриття від Т.1 до Т.9 і Т.4.

Мікроструктурний аналіз шліфів (рисунок 3.6) покриття ГЦП + СДП-2 + (СДП-2) дозволив встановити, що:

- шари ГЦП повністю продифундували до матеріалу лопатки;
- шар СДП-2 рівномірно нанесений на всі трактові поверхні і має товщину 40 мкм ... 45 мкм;
- додатковий шар СДП-2 має диференційований розподіл товщини з максимальним її значенням в 45 мкм (сумарно з товщиною 1 шару СДП-2 до 95 мкм) на вхідній кромці, а мінімальне в середній зоні спинки і корита;

Всі шари покриття високої якості, тріщини, пори або відшарування не виявлені.



а – точка Т.1; б – точка Т.9 (рисунок 5.5) в перерізі 2-2
Рисунок 3.6 – Мікроструктура багат шарового покриття

За допомогою обладнання для спрямованої обробки, вібротілами виконано полірування поверхні покриття. Клас чистоти поверхні збільшився у 4 рази і склав Ra 0,6...0,8.

Спираючись на результати механічної обробки, можна зробити висновок, що велика і середня за розмірами крапельна фаза повністю відсутня. Лунки на поверхні покриття - це сліди ударів вібротіл та залишки кратерів після відриву крапель.

Встановлені закономірності впливу геометричних характеристик катодів на технологію нанесення градієнтного покриття. Доведено, що застосування металургійного методу ВДП дає можливість отримання катодів у формі циліндра з оптимальною структурою та хімічним складом. Це забезпечило можливість його використання для нової технології нанесення градієнтного покриття в діапазоні товщин 43 мкм ... 95 мкм.

3.2 Випробування модифікованих покриттів на жаростійкість

Наступним етапом роботи було випробування отриманих покриттів на жаростійкість, для чого використовували лабораторну електропіч SNOL 6,7/1300.

Кожен із варіантів покриття наносили на зразок зі сплаву ЖС-32 і нагрівали до температури 1050 °С та витримували впродовж 100 ... 400 годин. Результати вимірювання маси зразків представлені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Результати вимірювання маси зразків

Сплав	Час витримки, год			
	100	200	300	400
	Втрата маси, г/м ²			
Без покриття	-60	-	-	-
Ni-Cr-Al-Y	9	15	5	-4
Ni-Cr-Al-La	10	16	4	-5
Ni-Cr-Al-Hf	8	12	5	-1
Ni-Cr-Al-Y-La	9	15	3	-4
Ni-Cr-Al-Y-Hf-La	8	13	5	-3

Слід відмітити що спочатку маса зразків збільшується тому, що відбувається поглинання металом кисню, а вже потім маса зменшується.

Із результатів вимірювання втрати маси зразків в процесі випробувань можна зробити висновок, що найкращого результату вдалося досягти додаванням гафнію у склад сплаву. Обидва сплави з гафнієм показали зменшення втрати маси у процесі жаростійких випробувань. Встановлено, що введенням в покриття мікролегуючих елементів (Y, Hf, La) підвищується жаростійкість сплаву на основі Ni-Cr-Al при температурі 1050 °С на 2%. Визначальним фактором у механізмі підвищення жаростійкості сплаву при високих температурах є утворення алюмінідів та сполук, прискорюючих їх формування. Також в процесі впливу високих температур наявність модифікаторів покращує опірність покриття до відшарування з поверхні лопатки.

3.3 Використання отриманих результатів досліджень у авіадвигунобудуванні для підвищення ресурсу лопаток турбіни газотурбінних двигунів

На підставі проведених досліджень було отримане практичне значення результатів:

1. Розроблено технологію комплексного легування жаростійкого сплаву Ni-Cr-Al із заданою кількістю легуючих елементів і їх рівномірним розподілом по всьому об'єму катода.

2. Розроблено технологію нанесення комплексного градієнтного жаростійкого покриття на трактову поверхню робочих лопаток турбіни.

3. Розроблено дослідно-промислову технологію механічної обробки поверхневого шару градієнтного покриття віброполіруванням із забезпеченням рівномірності знімання покриття, що дозволило підвищити клас шорсткості більш ніж в 2 рази.

4. Проведено випробування деталей з модифікованим градієнтним покриттям на жаростійкість, підтверджено працездатність деталей в умовах впливу високих температур.

Очікуваний економічний ефект від використання установки КІВ включає:

– збільшення завантаження за один цикл нанесення покриття лопатками в тричі;

– збільшення раціонального використання матеріалу катода на 35 ... 40%, що складає економічний ефект більше 3 млн. грн на рік на 2,5 т сплаву;

– можливість розширення технологічних прийомів нанесення покриття.

Таким чином комплексне дослідження методів підвищення якості напилення показало, що вакуумно-дуговий перепплав є найбільш раціональним методом для отримання заготовок катодів нової геометрії

замість ВІВ метода, приблизивши при цьому рівномірність складу та дрібнодисперсність структури до ГМ метода.

Оптимізація складу катодів нової геометрії шляхом комплексного модифікування Y, Hf, La забезпечило підвищення якості отриманого покриття, дозволило впровадити принципово нову градієнтну схему нанесення покриттів, забезпечило збільшення ресурсу турбінних лопаток і можливість застосування модифікованих покриттів в авіадвигунах 5-го покоління.

3.4 Висновки до розділу 3

1. Використовуючи католи розробленого складу та нової геометрії, виготовлені методом ВДП, та промислово установа КІБ, нанесено градієнтне покриття на лопатки турбіни з підвищеною товщиною з 50 мкм до 95 мкм на вхідній кромці, в середній частині профілю лопатки та вихідній кромці товщина покриття не змінилась ~ 43 мкм. Використання такого градієнтного нанесення зі збільшеною товщиною забезпечує підвищення ресурсу робочої лопатки турбіни мінімум у два рази.

2. Розроблено дослідно-промислово технологію механічної обробки вібротілами поверхні градієнтного покриття, клас чистоти поверхні збільшився у 4 рази, а велика і середня за розмірами крапельна фаза повністю відсутня на проточній поверхні лопатки. Забезпечено рівномірне контрольоване зняття покриття, а значення шорсткості підвищилось з Ra 3,2 до Ra 0,4.

3. Проведене дослідження впливу модифікаторів Y, Hf, La на жаростійкість сплаву. Встановлено, що комплексне модифікування Y+Hf+La при температурі 1050 °C дозволяє збільшити жаростійкість на 2%. Визначальним фактором у механізмі підвищення жаростійкості сплаву при високих температурах є утворення алюмінідів та сполук, прискорюючих їх формування. Також в процесі впливу високих температур

наявність модифікаторів покращує опірність покриття до відшаровування з поверхні лопатки.

4. Для збільшення ремонтпридатності лопаток розроблена та запатентована технологія зняття жаротривкого покриття методом електролітно-плазмової обробки. Технологія дозволяє видаляти покриття на основі нікелю з металевої підкладки з мінімальним пошкодженням 0,01 ...0,02 мм, що гарантує збереження геометричних розмірів турбінних лопаток при ремонті.

5. Комплексним дослідженням металургійних методів встановлено, що вакуумно-дуговий переплав є найбільш раціональним методом для отримання заготовок катодів нової геометрії замість ВІВ метода, приблизивши при цьому рівномірність складу та дрібнодисперсність структури до ГМ метода.

Оптимізація складу катодів шляхом комплексного модифікування Y, Hf, La забезпечила підвищення якості отриманого покриття, дозволила впровадити принципово нову градієнтну схему нанесення покриттів, призвела до збільшення ресурсу турбінних лопаток і можливості застосування модифікованих покриттів в авіадвигунах 5-го покоління.

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА МОДЕЛІ ТА СИСТЕМИ ОПТИМІЗАЦІЇ ВЛАСТИВОСТЕЙ СПЛАВІВ

4.1 Розробка математичної моделі

Для ефективного аналізу отриманих експериментальних даних необхідно виявити взаємозв'язок факторів, що визначають хід процесу, і представити їх у вигляді математичної моделі. Математична модель дозволяє отримати інформацію про процеси, які протікають в об'єкті, розрахувати його характеристики та використати отриману інформацію для управління об'єктом в процесі моделювання.

Продуктивність під час експлуатації лопаток, довговічність і вартість виготовлення є трьома основними показниками визначення товщини наплення для лопатки турбіни. Ці параметри повинні бути ретельно підібрані. Теплоізоляційна здатність для експлуатаційних характеристик є найважливішою вимогою. Підвищення жаростійкості авіаційних сплавів досягається легуванням алюмінієм та хромом, що може знизити температуру підкладки, щоб подовжити термін її служби або збільшити температуру на вході в турбіну і тим самим покращуючи ефективність авіадвигунів.

При побудові імітаційної математичної моделі обмежимося спрощеним уявленням про об'єкт. Входом об'єкта є вхідні параметри (фактори), а на виході отримують значення параметрів, що характеризують стан об'єкту дослідження. На такий об'єкт впливають чотири групи факторів, які і визначають його стан.

Математична модель такого об'єкту дослідження модно представити у наступному вигляді:

$$Y = f(X_i, V_j, Z_k), \quad (4.1)$$

де Y – значення вихідного параметру, який є критерієм оптимізації;

X_i – сукупність значень вхідних параметрів, які контролюються і управляються та в ході досліджень можуть цілеспрямовано змінюватися (конструктивні, технологічні та експлуатаційні фактори);

V_j – сукупність значень параметрів, що контролюються, але не управляються (в ході експериментальних досліджень вони не змінюються);

Z_k – сукупність параметрів, що не управляються і не контролюються (вони дають інформацію про об'єкт, їх неможливо вимірювати кількісно) [11].

З урахуванням вищезазначених параметрів покриття лопатки є багатоцільовою задачею оптимізації, яку можна сформулювати наступним чином.

$$\text{Мінімізація:} \quad [\sigma_{TC}(h), \frac{1}{\Delta T(h)}, h]^T, \quad (4.2)$$

Параметри:

$$h_l \leq h \leq h_u, \quad (4.3)$$

$$\sigma_{TC}(h) \leq \sigma_{TC}^{cr}, \quad (4.4)$$

$$T_{sub} \leq T_{sub}^{cr}, \quad (4.5)$$

де h – розрахункова змінна, яка позначає товщину покриття;

$\sigma_{TC}(h)$ – максимальне напруження фон Мізеса в межах лопатки;

$\Delta T(h)$ – різниця температур між поверхнею лопатки і поверхню підкладки.

У цій роботі h_l і h_u вважаються $100 \mu\text{ м}$ і $800 \mu\text{ м}$ відповідно. Відомо, що неоптимальна товщина покриття може викликати висока залишкова напруга під час розпилення та потенційно може мати вплив на зону

проходження газу. Таким чином, призначаємо верхню межу товщини покриття, h_u – до 45 мкм. Критична дозволена напруга в покритті, $\sigma_{кр}$ призначається як експериментально вимірний двоосьова міцність 174 МПа [25].

Температура суперсплава підкладки, $T_{кр}$, вважається не вищим ніж критичне значення, $T_{кр} = 1000$ °С.

Для вирішення проблему високої залишкової напруги, параметр β визначається для оцінки комплексної теплової та механічної характеристики покриття, як наведено нижче:

$$\beta(h) = \frac{\sigma_{ТС}(h)}{\Delta T(h)}, \quad (4.6)$$

Очевидно, що менше значення β означає кращу продуктивність наплення. Використовуючи єдиний скалярний параметр оцінки, цілі низький рівень напруги і висока теплоізоляція поєднуються разом.

Цільова функція в (4.2) визначена так, щоб мати досяжні параметри: низький рівень напруги, високу теплоізоляцію та низьку вартість виготовлення. Однак між цими цілями є конфлікти.

Наприклад, покращуються показники теплоізоляції зі збільшенням товщини покриття, але індукована тепла, стрес матеріалу і витрати на виготовлення також зростають. Немає оптимального рішення для мінімізації всіх функцій одночасно. Слід зазначити, що дана робота спрямована на розвиток процедури виготовлення литих катодів з нікелевого сплаву для нанесення наплення лопаток, замість фокусування на складному алгоритмі оптимізації.

4.2 Розробка алгоритму роботи оптимізаційної системи

Оптимізацію можна розділити на три основні процеси: попередній аналіз, проектування оптимізації та перевірка схеми.

На рисунку 4.1 наведений алгоритм процедури оптимізації розрахунку товщини теплозахисного покриття.

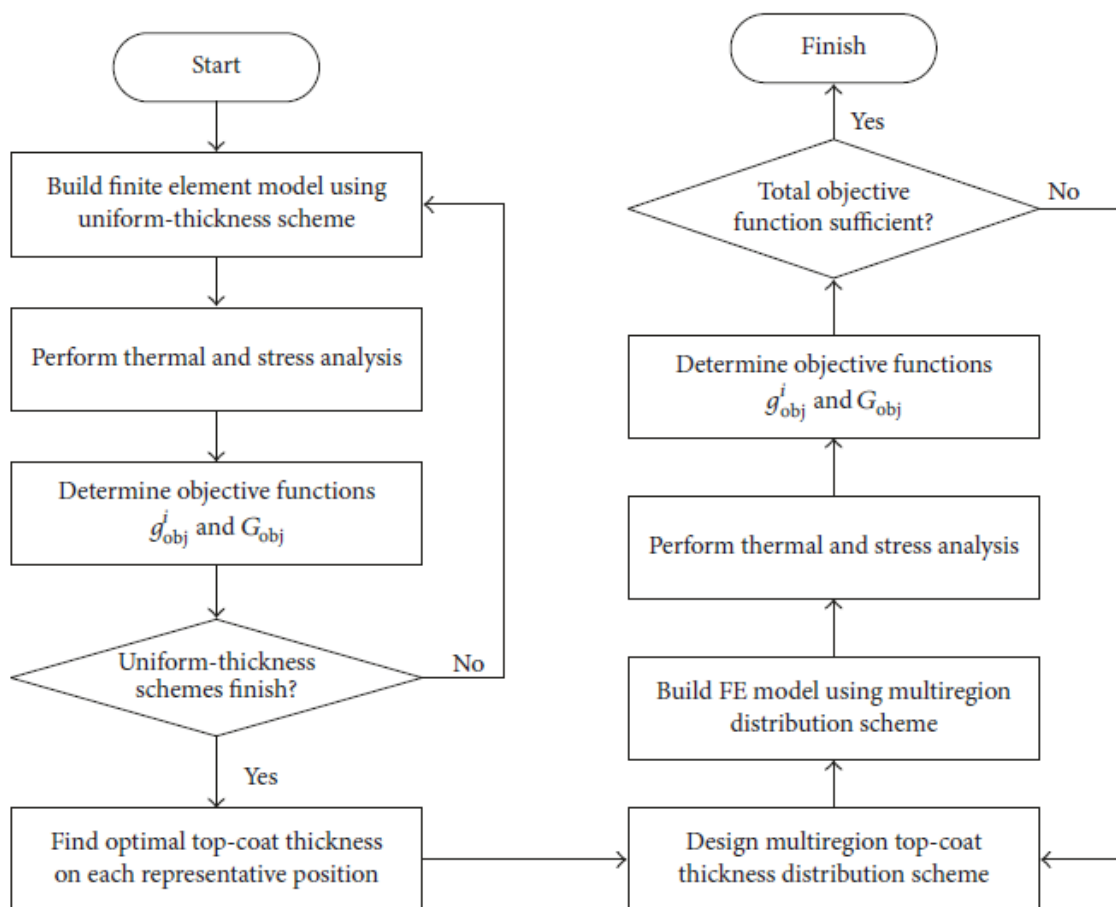


Рисунок 4.1 – Алгоритм процедури оптимізації розрахунку товщини теплозахисного покриття

Алгоритм процедури оптимізації може бути описаний в наступних кроках:

1. Побудування моделі для лопатки турбіни з використанням схеми рівномірної товщини, де покриття вважається рівномірним по всій області

покриття (рис 4.2).

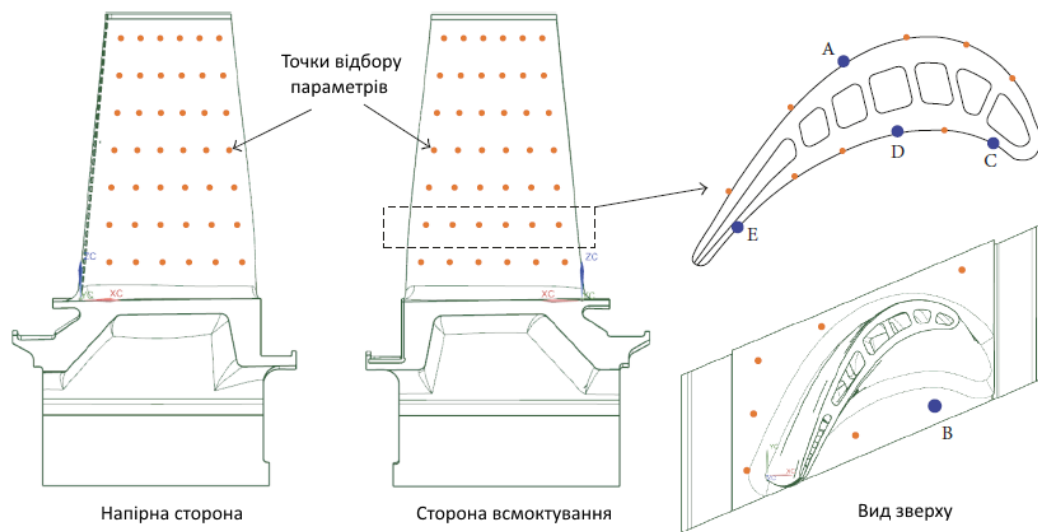


Рисунок 4.2 – Область відбору параметрів

2. Виконується тепловий аналіз і аналіз напруг, використовуючи послідовно сполучений метод, а також визначається оптимальна температура і напруження поля нанесення.

3. Вибираються типові позиції на лопатці та визначити їх цільові функції g_i об'єкту. Обчислюється повна цільова функція G_{obj} для поточної рівномірної товщини покриття.

4. Оцінюються, чи в усіх точках відбору параметра товщина рівномірна. Якщо ще ні, треба повернутися до пункту 1. В іншому випадку розрахувати оптимальну товщину покриття за допомогою різних методів.

5. Розробляється розподілена системи контролю товщини покриття.

6. Будується модель розподіленої системи контролю і виконується термічний аналіз і аналіз напруги.

7. Обчислюється повна цільова функція об'єкта $W_{об}$.

8. Проводиться порівняльний аналіз $W_{об}$ розподіленої системи з типовими схема розподілення рівномірної товщини. Якщо цільова передавальна функція об'єкта показує адекватність моделі, оптимізаційний проєкт вважається завершеним. В іншому випадку необхідно повернутися

до кроку 5.

4.3 Моделювання системи оптимізації властивостей сплавів в Simulink

Турбіна відповідає за вилучення енергії з газу високої температури та високого тиску, що утворюється в камері згоряння, і перетворення його в обертовий рух для створення тяги. Турбіна являє собою радіальний масив лопатей, які зазвичай виготовляються з нікелевих сплавів. Ці сплави стійкі до надзвичайно високих температур газів. При таких температурах матеріал значно розширюється, створюючи механічні напруги в стиках і значні деформації в кілька міліметрів. Щоб уникнути механічного пошкодження та тертя між кінчиком лопаті та корпусом турбіни, конструкція лопаті повинна враховувати напругу та деформації.

Основна мета запропонованої моделі полягає в оцінці температурних навантажень, які діють на лопатку авіадвигуна з напиленням захисного шару від литих катодів з нікелевого сплаву та обчислити теплову напругу та деформацію лопатки турбіни в її стабільному робочому стані.

Лезо лопатки має внутрішні канали охолодження. Прохолодне повітря, що проходить через канали, підтримує температуру лопаті в межах, допустимих для матеріалу, з якого вона виготовлена. Ця функція поширена в сучасних лопатках.

Модель включає триетапний робочий процес:

- структурний аналіз, враховуючи лише тиск навколишніх газів, ігноруючи теплові ефекти;
- обчислення теплової напруги, ігноруючи тиск;
- оцінка результатів з комбінованими параметрами тиску і теплової напруги.

Моделювання системи за допомогою програмного пакету MathCAD.

1. Навантаження під тиском.

Лопатка відчуває високий тиск навколишніх газів. Обчислимо

напругу, спричинену лише цим тиском.

Спочатку створена статична структурна модель.

```
smodel = createpde("structural","static-solid");
```

Імпортовано та побудовано геометрію, відображаючи позначки граней.

```
importGeometry(smodel,"Blade.stl");
```

```
figure
```

```
pdegplot(smodel,"FaceLabels","on","FaceAlpha",0.5)
```

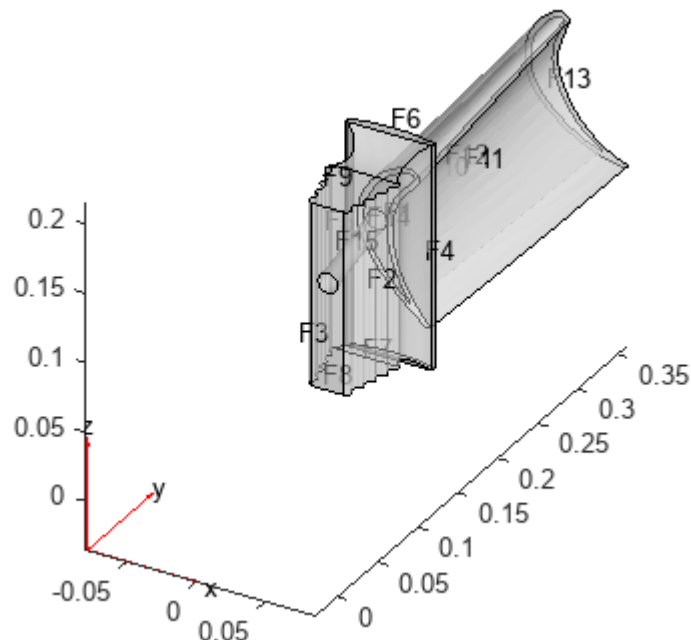


Рисунок 4.3 – Побудова геометрії лопатки

Створена сітка з максимальним розміром елемента 0,01.

```
msh = generateMesh(smodel,"Hmax",0.01);
```

Вказуємо модуль Юнга, коефіцієнт Пуассона та коефіцієнт теплового розширення для сплаву на основі нікелю (NIMONIC 90).

```
E = 227E9; % in Pa
```

```
STE = 12.7E-6; % in 1/K
```

```

nu = 0.27;
structuralProperties(smodel,"YoungsModulus",E, ...
    "PoissonsRatio",nu, ...
    "СТЕ",СТЕ);

```

Вказуємо, що грань кореня лопатки, яка контактує з іншим металом, є нерухомою.

```

structuralBC(smodel,"Face",3,"Constraint","fixed");

```

Вкажуємо навантаження тиску на напірній і всмоктувальній сторонах лопатки. Цей тиск виникає через газ під високим тиском, що оточує ці сторони леза.

```

p1 = 5e5; %in Pa
p2 = 4.5e5; %in Pa
structuralBoundaryLoad(smodel,"Face",11,"Pressure",p1); % Pressure
side
structuralBoundaryLoad(smodel,"Face",10,"Pressure",p2); % Suction
side

```

Розв'язання структурної задачі.

```

Rs = solve(smodel);

```

Побудова графіка напруги фон Мізеса та переміщення. Вкажіть масштабний коефіцієнт деформації 100, щоб краще візуалізувати деформацію.

```

Figure
pdeplot3D(smodel,"ColorMapData",Rs.VonMisesStress, ...
    "Deformation",Rs.Displacement, ...
    "DeformationScaleFactor",100)
view([116,25]);

```

На рисунку 4.4 наведений графік напруги фон Мізеса та переміщення.

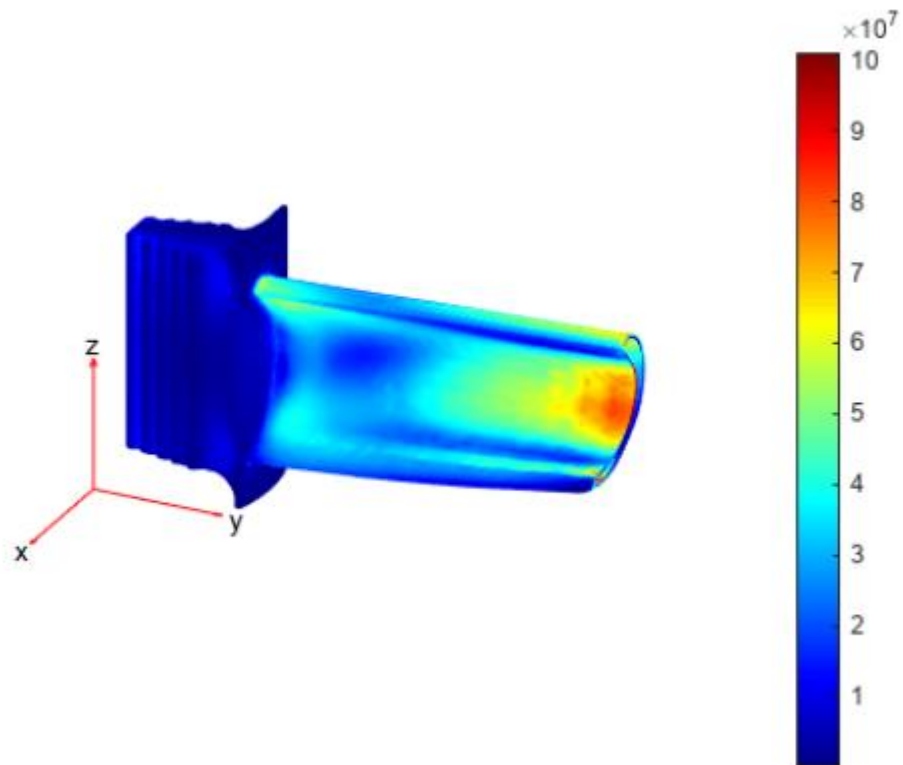


Рисунок 4.4 – Графік напруги фон Мізеса та переміщення

З графіка 4.4 видно, що максимальна напруга становить близько 100 МПа, що значно нижче межі пружності.

2. Термічний стрес.

Визначаємо розподіл температури та обчислюємо напругу та деформацію лише внаслідок теплового розширення. Ця частина прикладу ігнорує тиск.

Спочатку створюємо теплову модель для стаціонарного теплового аналізу.

```
tmodel = createpde("thermal", "steadystate");
```

Імпортуємо ту саму геометрію та використовуємо ту саму сітку, що й

для структурного аналізу (рис. 4.3).

```
importGeometry(tmodel,"Blade.stl");
tmodel.Mesh = msh;
```

Припускаючи, що лопатка виготовлено зі сплаву на основі нікелю (NIMONIC 90), вказуємо теплопровідність.

```
kapp = 11.5; % in W/m/K
thermalProperties(tmodel,"ThermalConductivity",kapp);
```

Конвективний теплообмін між навколишньою рідиною та гранями лопаті визначає граничні умови для цієї проблеми. Коефіцієнт конвекції більший там, де більша швидкість газу. Крім того, температура газу різна навколо різних граней. Температура повітря, що охолоджує внутрішню частину лопатку становить 150 °С, а температура на напірній і всмоктувальній сторонах становить 1000 °С.

```
% Interior cooling
thermalBC(tmodel,"Face",[15 12 14], ...
           "ConvectionCoefficient",30, ...
           "AmbientTemperature",150);
```

```
% Pressure side
thermalBC(tmodel,"Face",11, ...
           "ConvectionCoefficient",50, ...
           "AmbientTemperature",1000);
```

```
% Suction side
thermalBC(tmodel,"Face",10, ...
           "ConvectionCoefficient",40, ...
           "AmbientTemperature",1000);
```

```
% Tip
thermalBC(tmodel,"Face",13, ...
           "ConvectionCoefficient",20, ...
```

```

        "AmbientTemperature",1000);
% Base (exposed to hot gases)
thermalBC(tmodel,"Face",1, ...
        "ConvectionCoefficient",40, ...
        "AmbientTemperature",800);
% Root in contact with hot gases
thermalBC(tmodel,"Face",[6 9 8 2 7], ...
        "ConvectionCoefficient",15, ...
        "AmbientTemperature",400);

```

Граничною умовою для поверхонь кореня лопатки, що контактують з іншим металом, є тепловий контакт, який можна моделювати як конвекцію з дуже великим коефіцієнтом (близько $1000 \text{ Вт}/(\text{м})^2\text{К}$) для контакту метал-метал).

```

% Root in contact with metal
thermalBC(tmodel,"Face",[3 4 5], ...
        "ConvectionCoefficient",1000, ...
        "AmbientTemperature",300);

```

Розв'язання теплової моделі.

```
Rt = solve(tmodel);
```

Побудуємо графік розподілу температури (рис. 4.5). Температура між кінчиком і коренем коливається приблизно від $820 \text{ }^\circ\text{C}$ до $330 \text{ }^\circ\text{C}$. Температура зовнішнього газу $1000 \text{ }^\circ\text{C}$. Охолодження внутрішньої поверхні ефективно: воно значно знижує температуру.

Figure

```

pdeplot3D(tmodel,"ColorMapData",Rt.Temperature)
view([130,-20]);

```

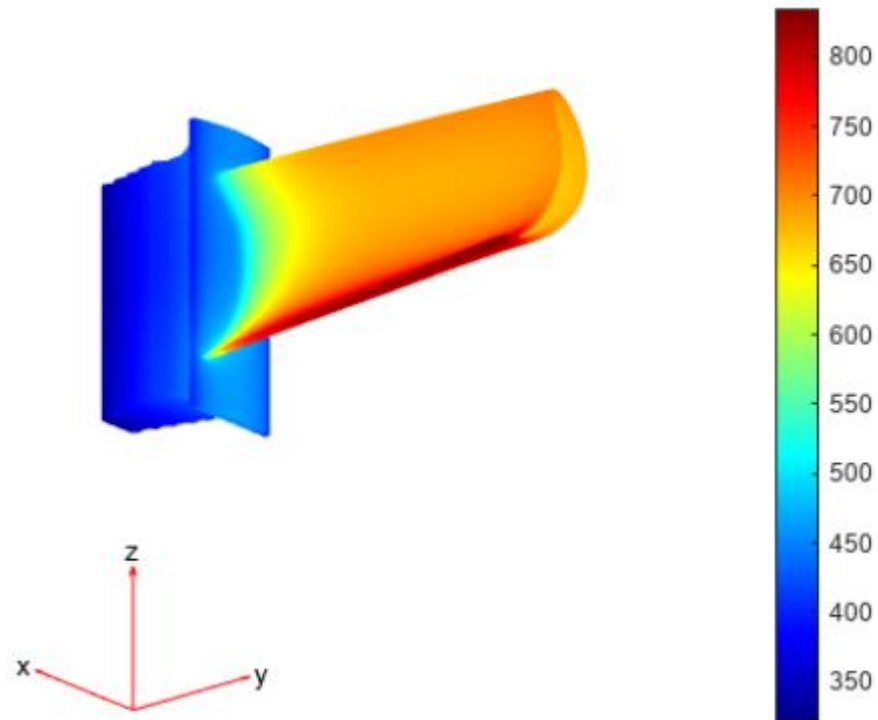


Рисунок 4.5 – Модель розподілу температури

3. Тепер створюємо статичну модель конструкції, щоб обчислити напругу та деформацію внаслідок теплового розширення.

```
tmodel = createpde("structural","static-solid");
```

Імпортуємо ту саму геометрію та використовуємо ту саму сітку та структурні властивості матеріалу, що й для структурного аналізу (рис. 4.3.)

```
importGeometry(tmodel,"Blade.stl");
```

```
tmodel.Mesh = msh;
```

```
structuralProperties(tmodel,"YoungsModulus",E, ...
```

```
    "PoissonsRatio",nu, ...
```

```
    "CTE",CTE);
```

Вкажемо еталонну температуру.

```
tmodel.ReferenceTemperature = 300; %in degrees C
```

```
structuralBodyLoad(tmodel,"Temperature",Rt);
```

Укажемо граничну умову.

```
structuralBC(tsmodel,"Face",3,"Constraint","fixed");
```

Розв'яжемо задачу про термічну напругу.

```
Rts = solve(tsmodel);
```

Побудуємо графік напруги фон Мізеса та переміщення (рис. 4.6). Вкажіть масштабний коефіцієнт деформації 100, щоб краще візуалізувати деформацію. Напруга концентрується в обмеженому корені, оскільки він не може вільно розширюватися, а також у місці з'єднання між лезом і коренем.

```
figure("units","normalized","outerposition",[0 0 1 1]);
```

```
pdeplot3D(tsmodel,"ColorMapData",Rts.VonMisesStress, ...
```

```
    "Deformation",Rts.Displacement, ...
```

```
    "DeformationScaleFactor",100)
```

```
clim([0, 200e6])
```

```
view([116,25]);
```

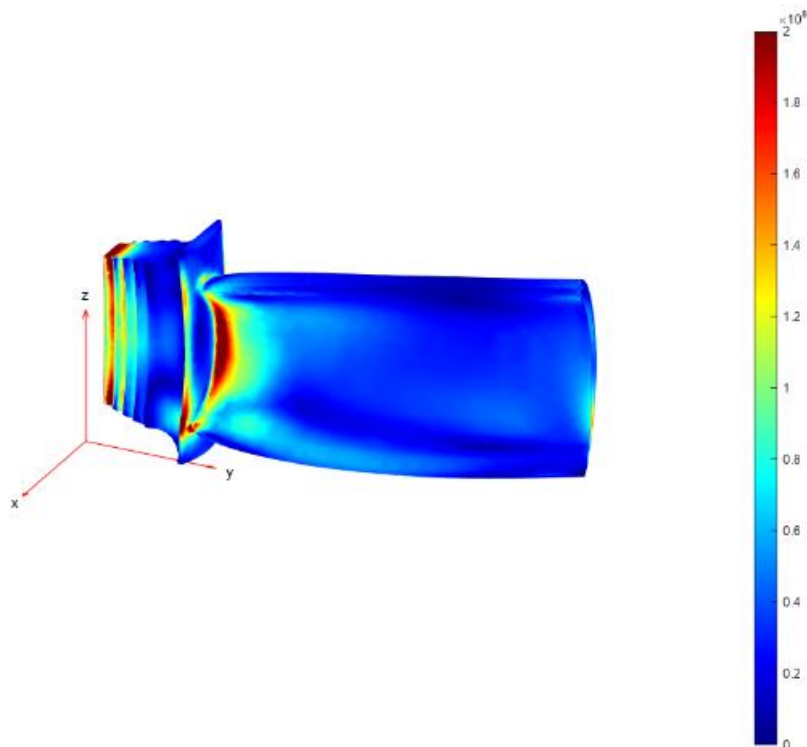


Рисунок 4.6 - Графік напруги фон Мізеса та переміщення

4. Оцінка зміщення на кінчику.

У конструкції кришки це зміщення необхідно враховувати, щоб уникнути тертя між кришкою та лезом.

```
max(Rts.Displacement.Magnitude)
```

```
ans = 0.0015
```

5. Комбіноване навантаження тиском і термічний стрес

Обчислимо напругу та деформації, спричинені поєднанням термічного впливу та впливу тиску.

Використовуємо ту саму модель, що й для аналізу термічної напруги. Додамо навантаження тиску на сторонах тиску та всмоктування леза. Цей тиск виникає через газ під високим тиском, що оточує ці сторони леза.

```
% Pressure side
```

```
structuralBoundaryLoad(tsmodel,"Face",11, ...  
                        "Pressure",p1);
```

```
% Suction side
```

```
structuralBoundaryLoad(tsmodel,"Face",10, ...  
                        "Pressure",p2);
```

Розв'яжемо модель.

```
Rc = solve(tsmodel);
```

Побудуємо графік напруги фон Мізеса та переміщення (рис. 4.7). Вказуємо масштабний коефіцієнт деформації 100, щоб краще візуалізувати деформацію.

```
figure("units","normalized","outerposition",[0 0 1 1]);  
pdeplot3D(tsmodel,"ColorMapData",Rc.VonMisesStress, ...  
          "Deformation",Rc.Displacement, ...  
          "DeformationScaleFactor",100)  
clim([0, 200e6])
```

```
view([116,25]);
```

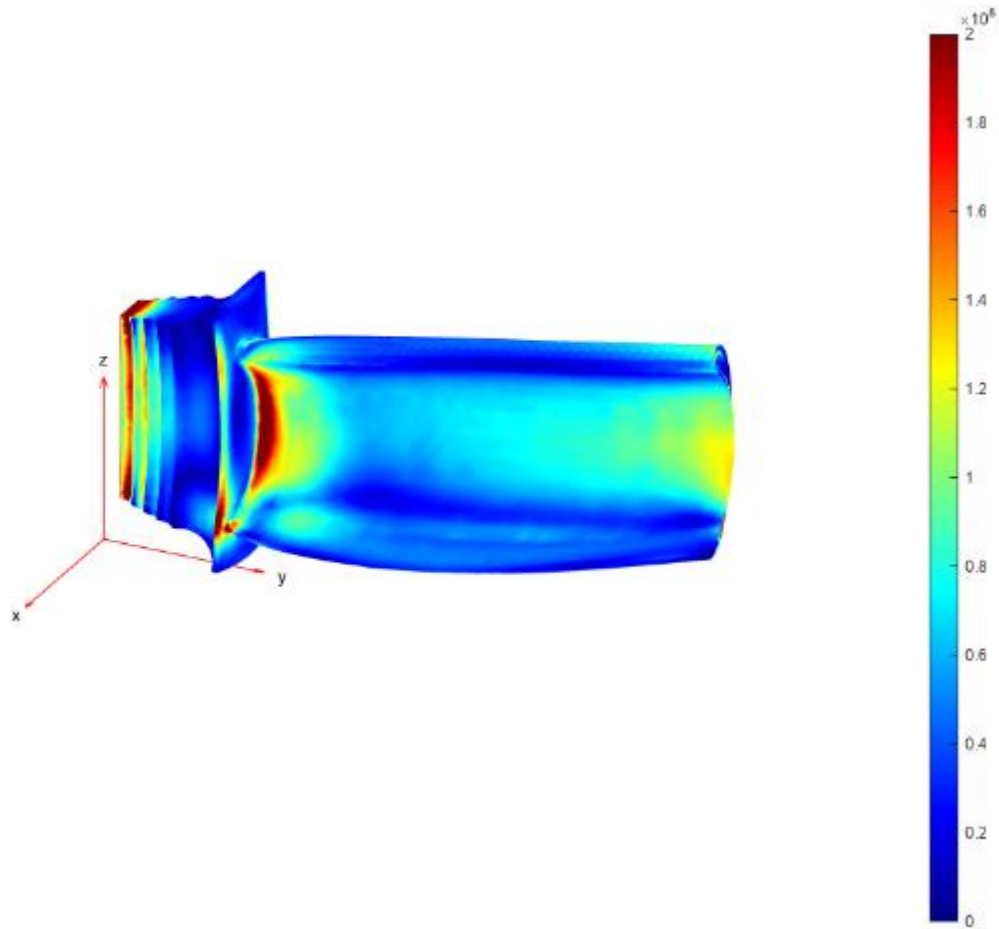


Рисунок 4.7 – Графік напруги фон Мізеса та переміщення

Проаналізуємо максимальне напруження та максимальне переміщення. Переміщення майже таке ж, як і для аналізу термічної напруги, тоді як максимальне напруження, 854 МПа, значно вище.

```
max(Rc.VonMisesStress)
```

```
ans = 9.4799e+08
```

```
Get
```

```
max(Rc.Displacement.Magnitude)
```

```
ans = 0.0015
```

За допомогою розробленої моделі, задачись різними параметрами напилення на лопатки (товщина напилення, рівномірність нанесення, сплав напилення, істотні характеристики методики нанесення напилення, тощо) можливо отримати будь-які графік напруги та переміщення лопатки.

РОЗДІЛ 5. РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ

При використанні схема рівномірної товщини, товщина ТК рівномірна по всій області покриття. Типове температурне поле 45 мкм схема рівномірної товщини . Висока температура область на підкладці, як правило, розташована біля кореня крило, особливо на платформі лопатки.

Параметри для моделювання:

Режими (min и max параметри):

Етап 1 (іонна очистка).

Вакуум $1 \times 10^{-5} \dots 1 \times 10^{-3}$ (мм.рт.ст.).

Струм на деталі 8...16 А.

Напруга на деталі 200...500В.

Струм дуги 300...600 А.

Напруження дуги 28...32 В.

Регулювання котушек підмагнічування (2 шт.) 1...1,5 А.

Етап 2 (нанесення покриття).

Вакуум $1 \times 10^{-5} \dots 1 \times 10^{-3}$ (мм.рт.ст.).

Струм на деталі 8...20 А.

Напруга на деталі 10...80 В.

Струм дуги 400...720 А.

Напруга дуги 26...36 В.

Регулювання котушек підмагнічування (2 шт.) 1...1,5 А.

Таблиця 5.1 – Оптимальний хімічний склад у випарюваному злитку

Сплав	Ni	Cr	Al	Y
СДП-2	Осн.	18 ... 22	11 ... 13	0,3 ... 1

Таблиця 5.2 – Оптимальний хімічний склад у покритті

Сплав	Ni	Cr	Al	Y
СДП-2	Осн.	18 ... 22	10 ... 12	0,2 ... 0,8

Мета моделювання: отримання покриття не менше 0,1 ітрію.

Кожні 1 А струму дуги збільшує або зменшує тривалість процесу нанесення на 1 хвилину.

Таблиця 5.3 – Залежність чаду ітрію від струму, при нанесенні покриття

№	Струм дуги, А	Вихідне значення змісту ітрію, в злитку % мас.								
		0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
1	400	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
2	440	0,175	0,275	0,375	0,475	0,575	0,675	0,775	0,875	0,975
3	480	0,15	0,25	0,35	0,45	0,55	0,65	0,75	0,85	0,95
4	520	0,125	0,225	0,325	0,425	0,525	0,625	0,725	0,825	0,925
5	560	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
6	600	0,075	0,175	0,275	0,375	0,475	0,575	0,675	0,775	0,875
7	640	0,05	0,15	0,25	0,35	0,45	0,55	0,65	0,75	0,85
8	680	0,025	0,125	0,225	0,325	0,425	0,525	0,625	0,725	0,825
9	720	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8

Таблиця 5.3 – Залежність чаду ітрію від діаметра катода, при нанесенні покриття

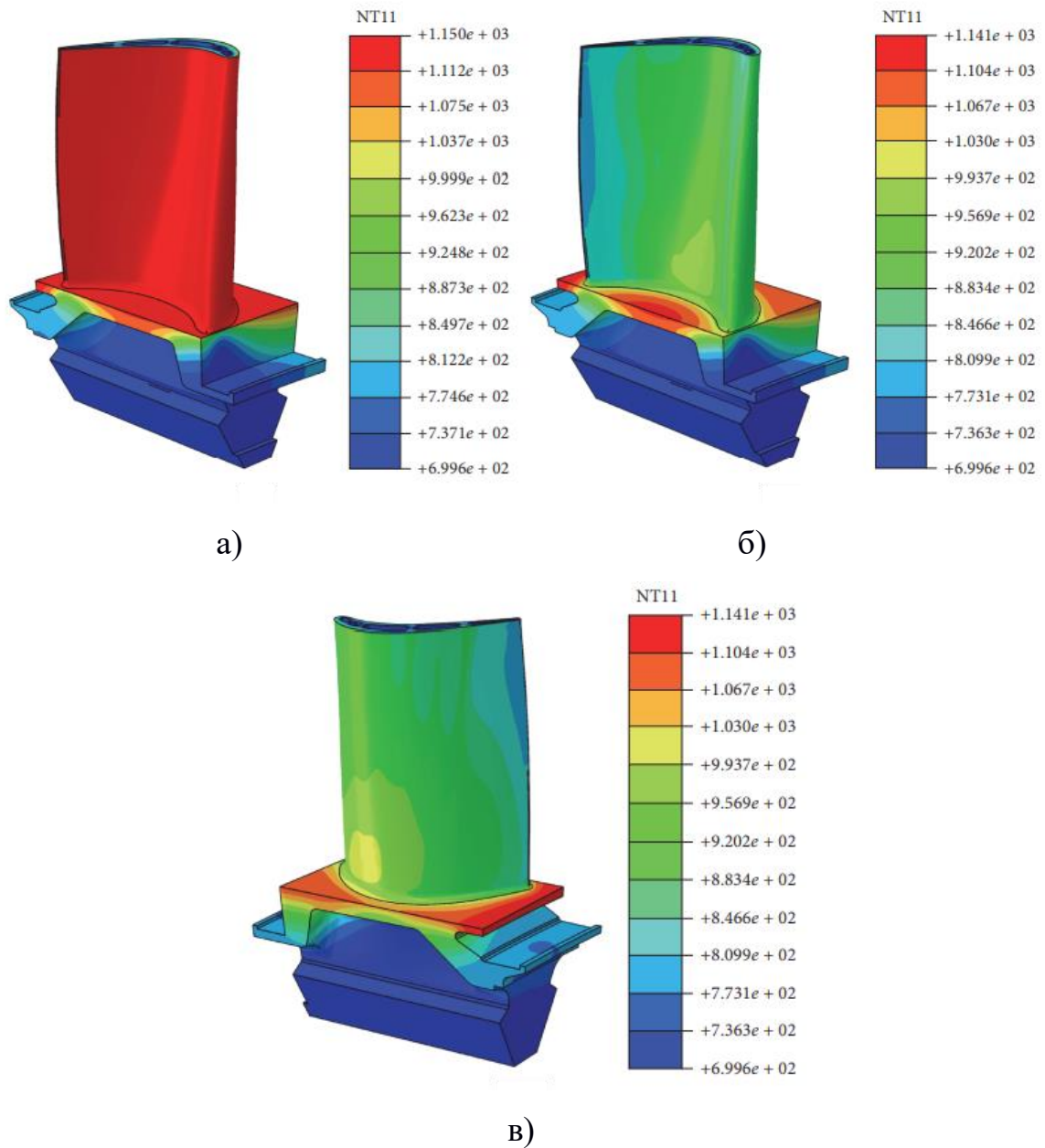
№	Діаметр катода, мм	Вихідне значення струму, А								
		400	440	480	520	560	600	640	680	720
1	180	400	440	480	520	560	600	640	680	720
2	174	430	470	510	550	590	630	670	710	750
3	168	460	500	540	580	620	660	700	740	780
4	162	490	530	570	610	650	690	730	770	810
5	156	520	560	600	640	680	720	760	800	840
6	150	550	590	630	670	710	750	790	830	870

Слід врахувати ще одну залежність таку як «Струм дуги від діаметра катода».

Розмір нового катода: діаметр зовнішній – 180 мм; діаметр внутрішній – 140,5 мм, довжина – 340 мм. Розміри спрацьованого катода: діаметр зовнішній – 150 мм; діаметр внутрішній – 140,5 мм, довжина – 340

мм. Таке коригування потрібне для стабільного горіння дуги.

Візуалізація результатів моделювання була виконана за допомогою пакетів Altair HyperMesh і ABAQUS. Температурні поля лопатки турбіни контрольного зразка наведені на рисунку 5.1.



а – загальна модель, б – сторона тиску підкладки, в – сторона всмоктування підкладки

Рисунок 5.1 – Температурні поля лопатки турбіни контрольного зразка

Графіки Парето для типових репрезентативних позицій А, С, D і Е (рис. 5.2) представляють сторону всмоктування, передній край, стороні тиску і задній кромці на профілі.

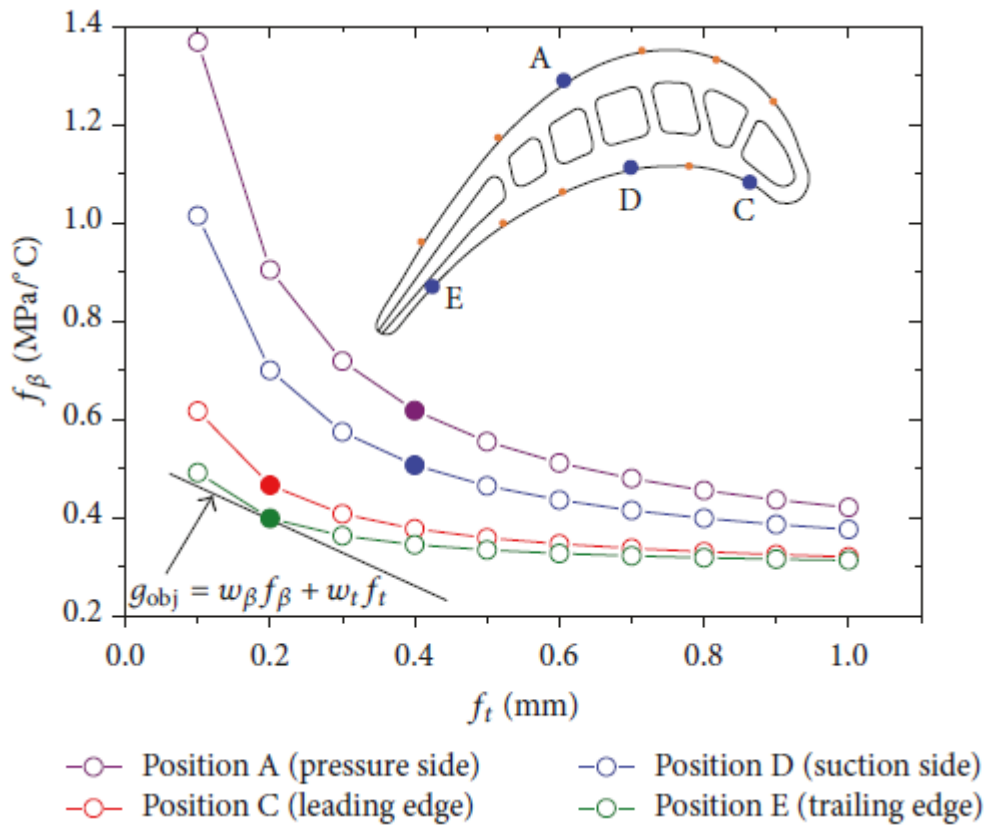
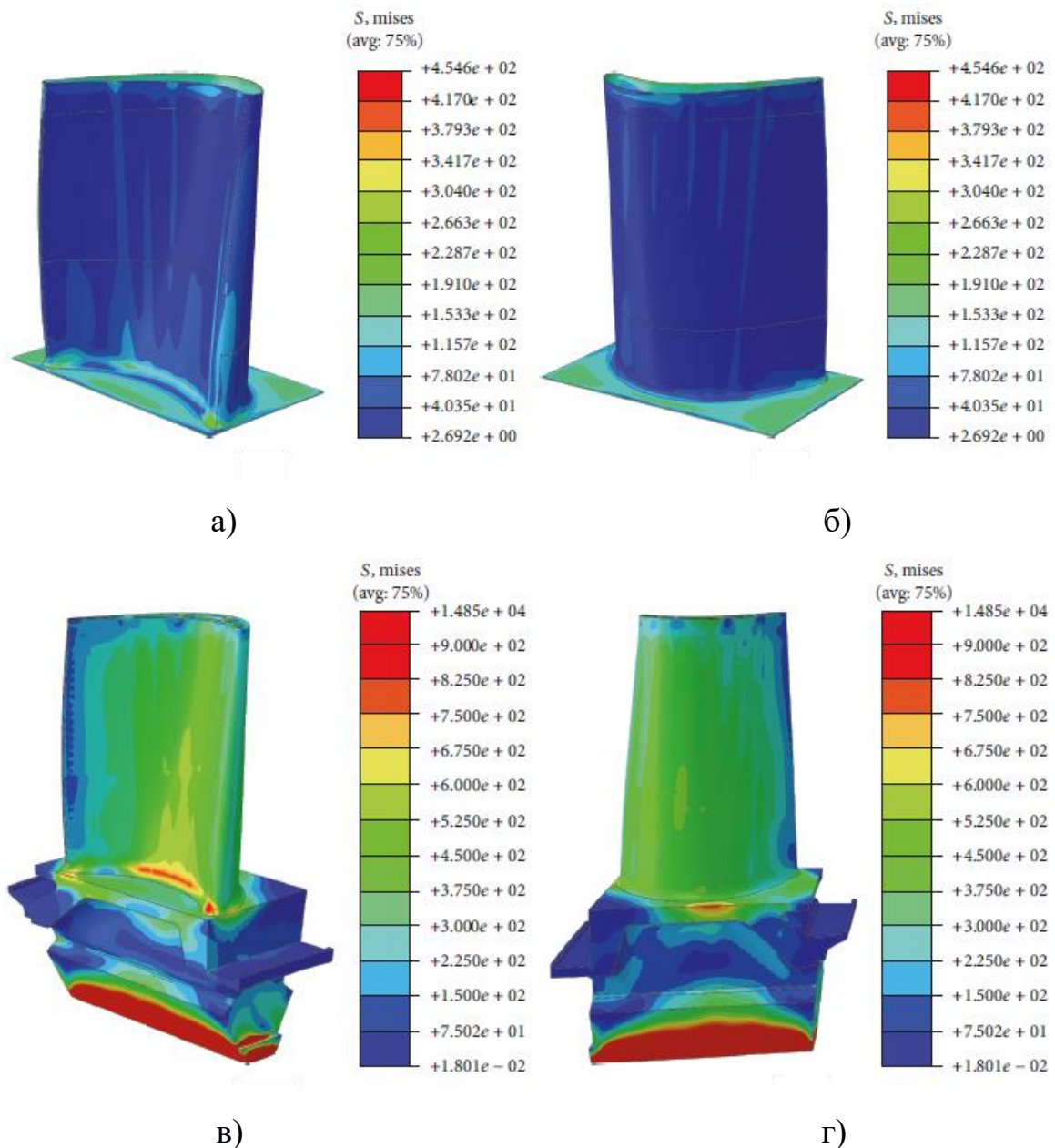


Рисунок 5.2 – Графіки Парето для репрезентативних положень А, С, D та Е на профілі (суцільні точки позначають рішення g_{obj})

Поля термічного напруження лопаті з використанням литих катодів з нікелевого сплаву наведені на рисунку 5.3.



а – сторона тиску верхнього покриття, б – сторона всмоктування верхнього покриття, в – тиск на стороні підкладки, г – сторона всмоктування підкладки

Рисунок 5.3 – Поля термічного напруження лопаті з використанням литих катодів з нікелевого сплаву

По рис. 5.3 видно, що в наслідок нанесення покриття з використанням литих катодів з нікелевого сплаву гранична умова, термічне напруження у нижній частині хвостовик леза досягає дуже високого рівня, що узгоджується з результатами інших досліджень.

РОЗДІЛ 6. ТЕХНІКО ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ДІЛЯНКИ ПО НАПИЛЕНЮ ЛОПАТОК

6.1 Економічне нормування технологічних операцій

1. Вхідний і вихідний контроль проводиться на спеціально обладнаному стенді для контролю. Для того щоб проконтролювати одну партію лопаток (24 штуки) необхідно 25 хвилин. Контроль проводиться три рази: вхідний, вихідний і безпосередньо перед напиленням.

2. Мийка лопатки. Мийка виробляється в спеціальному висувному шафі, промивка лопаток ведеться в трьох ваннах: ацетон, дистильована вода і бензин. На одну партію в 24 лопатки необхідно 40 хвилин.

3. Піскоструйна обдувка. Здійснюється в камері для обдування на одну партію необхідно 40 хвилин.

4. Напилення лопаток на установці МАП-2. Відбувається в кілька етапів: підготовка (монтаж садки), вакуумація, нанесення покриття, охолодження у вакуумній камері. На всі операції необхідно 320 хвилин.

Нормування операцій занесено в таблицю 6.1.

Таблиця 6.1 – Нормування операції

Назва операції	Норма часу, годин.
Вхідний і вихідний контроль	0,052
Мийка лопатки	0,027
Піскоструминна обдувка	0,027
Напилення лопатки в МАП-2	0,22
$T_{шт}$	0,326

6.2 Техніко-економічне обґрунтування ділянки

6.2.1 Виробнича програма та її матеріальне забезпечення

Основою для розрахунку ділянки з виробництва лопаток турбін середнього тиску є виробнича програма в штуках.

В даному дипломному проекті проводиться напілення на установці МАП -2 покриття СДП-2 річна програма = 50 000 шт. Розрахунок вартості виробничої програми проведений (таблиця 6.2).

Таблиця 6.2 – Виробнича програма виробів на рік

Найменування виробів	Норма часу на одиницю виробу нормо-годин	виробнича програма	
		одиниць	Нормо-годин
Лопатка ТСТ	0,32	50000	16300

6.2.2 Розрахунок кількості обладнання, площі ділянки

Розрахунок необхідної кількості обладнання по кожному типу обладнання ведеться за формулою (6.1)

$$G_0 = \frac{t \cdot N}{F_{до}}, \quad (6.1)$$

де G_0 – кількість обладнання за розрахунком, шт;

t – норма часу операції, нормо-год;

N – річна виробнича програма, шт;

$F_{до}$ – дійсний річний фонд часу роботи обладнання визначається за формулою (6.2).

$$F_{до} = F_{ном}(1 - K_в) \quad (6.2)$$

$F_{до}$ – дійсний річний фонд часу роботи обладнання;

$K_в$ – коефіцієнт втрат часу на ремонт і обслуговування устаткування

(0,07-0,1);

$F_{\text{ном}}$ – номінальний річний фонд роботи обладнання для двозмінній роботи становить 4160 годин згідно з формулою (6.2).

$$F_{\text{до}} = F_{\text{ном}}(1 - K_{\text{в}}) = 4160 (1-0,1) = 3744 \text{ години}$$

Відповідно до формули (6.1) розраховуємо необхідну кількість стендів для вхідного і вихідного контролю:

$$G_0 = \frac{tN}{F_{\text{до}}} = \frac{0,052 \cdot 50000}{3744} = 0,69 \text{ шт}$$

Прийняте кількість стендів для вхідного і вихідного контролю встановлюється шляхом округлення до цілої величини $G_{\text{оп}} = 1 \text{ шт}$. Коефіцієнт завантаження розраховуємо за формулою (6.3):

$$K_3 = \frac{G_0}{G_{\text{оп}}} = \frac{0,69}{1} = 0,69 \quad (6.3)$$

Відповідно до формули (6.1) розраховуємо кількість шаф витяжних для мийки:

$$G_0 = \frac{t * N}{F_{\text{до}}} = \frac{0,027 \cdot 50000}{3744} = 0,35 \text{ шт}$$

Прийняте кількість обладнання встановлюється шляхом округлення до цілої величини $G_0 = 1 \text{ шт}$. Розраховуємо коефіцієнт завантаження обладнання згідно з формулою (6.3):

$$K_3 = \frac{G_0}{G_{\text{оп}}} = \frac{0,35}{1} = 0,35$$

Відповідно до формули (6.1) розраховуємо кількість камер для обдування:

$$G_0 = \frac{t \cdot N}{F_{\text{до}}} = \frac{0,027 \cdot 50000}{3744} = 0,35 \text{ шт}$$

Прийнята кількість обладнання встановлюється шляхом округлення до цілої величини $G_{\text{оп}} = 1 \text{ шт}$.

Коефіцієнт завантаження обладнання згідно з формулою (6.3):

$$K_3 = \frac{G_0}{G_{\text{оп}}} = \frac{0,35}{1} = 0,35$$

Відповідно до формули (6.1) розраховуємо необхідну кількість установок для вакуумно плазмового напилення МАП-2:

$$G_0 = \frac{t \cdot N}{F_{\text{до}}} = \frac{0,022 \cdot 50000}{3744} = 2,91 \text{ шт}$$

Прийнята кількість установок для вакуумно-плазмового напилення МАП-2 встановлюється шляхом округлення до цілої величини $G_{\text{оп}} = 3 \text{ шт}$.

Розраховуємо коефіцієнт завантаження обладнання згідно з формулою (6.3):

$$K_3 = \frac{G_0}{G_{\text{оп}}} = \frac{2,91}{3} = 0,97$$

Розрахунок кількості обладнання, його потужності і коефіцієнт завантаженості занесені в таблицю 6.3

Таблиця 6.3 – Розрахунковий кількість устаткування

Найменування обладнання	Кількість обладнання		Коефіцієнт завантаження	Потужність, кВт	
	За розрахунком	Прийняте		Одиниці	Всього обладнання
Стенд для вхідного і вихідного контролю	0,69	1	0,69		
Висувною шафа для мийки	0,35	1	0,35		
Камера для обдування	0,35	1	0,35	5	5
Установка МАП-2	2,91	3	0,97	75 *	225
Разом	4.3	6	0.72	-	230

* - створення вакууму для 1 партії протягом 1 години.

Виробнича площа ділянки розраховується виходячи з кількості обладнання, робочих місць зі збільшенням на 20% на підставі даних таблиці 6.4.

Таким чином, площа ділянки становить $110 \cdot 1,2 = 132 \text{ м}^2$.

Загальна площа повинна включати наявність обов'язкових технологічних проходів, проїздів і складських місць.

З урахуванням вимог до планування складально-зварювальних ділянок машинобудування обрані уніфіковані типові секції 12 x 18 м. Таким чином, приймаємо площа ділянки дорівнює 216 м^2 .

Таблиця 6.4 – Розрахунок кількості площі для обладнання

Найменування устаткування	Кількість одиниць обладнання	Виробнича площа, м ²	
		На одиницю обладнання	Загальна
Стенд для вхідного і вихідного контролю	1	5	5
Висувною шафа для мийки	1	5	5
Камера для обдування	1	15	15
Установка МАП-2	3	30	90
Разом	6		110

6.2.3 Розрахунок кількості персоналу ділянки

Розрахунок чисельності персоналу на нормованих роботах розраховується кількість працівників на установці для наплення МАП-2 за формулою:

$$R_0 = \frac{\sum_{i=1}^m t \cdot N}{F_{др} \cdot K_{в.н}} = \frac{0,22 \cdot 50000}{1830 \cdot 1,05} = 5,76 \approx 6 \text{ чол.} \quad (6.5)$$

де R_0 – чисельність основних виробничих робітників, чол. ;

m – кількість видів робіт;

t_i – норма часу i -тій операції, нормо-годин;

$F_{др}$ – дійсний річний фонд часу роботи одного робітника;

$K_{в.н.}$ – коефіцієнт виконання норм виробітку ($K_{в.н.} = 1,05$).

Дійсний річний фонд часу роботи робочого визначається за формулою:

$$F_{др} = F_{ном} (1 - h) \quad (6.6)$$

де $F_{\text{ном}}$ – номінальний фонд робочого часу для двозмінній роботи 4160 год.

h – плановий коефіцієнт невиходів робітників на роботу в межах (0,12-0,15)

Відповідно до формули (6.6):

$$F_{\text{др}} = F_{\text{ном}}(1 - h) = 2080 \cdot (1 - 0.12) = 1830.4 \text{ годин}$$

Відповідно до формули (6.5) кількість працівників для столу контролю:

$$R_0 = \frac{\sum_{i=1}^m t \cdot N}{F_{\text{др}} \cdot K_{\text{в.н}}} = \frac{0.052 \cdot 50000}{1830 \cdot 1.05} = 1.35 \approx 2 \text{ чол.}$$

Відповідно до формули (6.5) кількість мийників:

$$R_0 = \frac{\sum_{i=1}^m t \cdot N}{F_{\text{др}} \cdot K_{\text{в.н}}} = \frac{0.027 \cdot 50000}{1830 \cdot 1.05} = 0.7 \approx 1 \text{ чол.}$$

Відповідно до формули (6.5) кількість чистильника деталей, виробів, метала піскоструминної обдування. Так як ділянка спеціальний то приймаємо на 2 осіб (по одному на зміну):

$$R_0 = \frac{\sum_{i=1}^m t \cdot N}{F_{\text{др}} \cdot K_{\text{в.н}}} = \frac{0.027 \cdot 50000}{1830 \cdot 1.05} = 0.7 \approx 1 \text{ чол.}$$

Так як ділянка спеціальний то приймаємо на 2 осіб (по одному на зміну).

Загальна чисельність персоналу наведена в таблиці 6.5.

Таблиця 6.5 – Загальна чисельність персоналу, чол.

Персонал	Кількість	У тому числі по розрядах						по змінах	
		1	2	3	4	5	6	1	2
Робочі									
Основні:									
Оператор напилення МАП-2	6						6	3	3
Слюсар з очищення	2		2					1	1
Слюсар з миття	2		2					1	1
Контролер	2				2			1	1
Всього:	12								
Допоміжні:									
Слюсар електрик ремонтник	2				2			1	1
Транспортний робочий	2		2					1	1
Всього:	4								
Керівники:									
Майстер	1							1	
Технолог	1							1	
Всього:	2							1	
Разом:	18								

6.2.4 Розрахунок матеріальних витрат

Вартість основних і допоміжних матеріалів розраховуються на підставі норм використання і цін. На ділянку з напилювання лопаток ТСД надходять такі основні і допоміжні матеріали: Катод витрачається, електрокорунд

Таблиця 6.6 – Розрахунок вартості основних допоміжних матеріалів

Найменування матеріалу, марка, розмір	норма витрат		Ціна на 4 садки (96лоп аток) матеріалу, тис грн.	Вартість на програмі тис. грн.	Вартість на програму за мінусом відходів, тис.грн.	
	на виріб кг	на програму, кг			за прејскурантом	з урахуванням транспортно-заготівельних витрат
Катод СДП-2	0,06	3000	40	20800	20800	21840
електрокорунд	0,2	10000	0,02	5	5	5,25
всього					20805	21845,25

Вартість основних пристосувань передбачає наступні розрахунки:

– вартість будівель визначається на основі розрахункової загальної площі ділянки, яка складає 216 м². При вартість одного квадратного метра 2000,00 грн; - 432000,00 грн;

– вартість споруд становить 5% від вартості будівель; - 21600,00 грн;

– вартість обладнання приведена в таблиці 6.7 з урахуванням транспортно-заготівельних витрат на монтаж в межах 10-15%;

– вартість цінних інструментів, обладнання, інвентарю 3-5% балансової вартості обладнання;

– вартість транспортних засобів - 3% балансової вартості обладнання.

Розрахунок вартості основних засобів, амортизаційних відрахувань і структури основних засобів наведено в таблиці 6.8.

Таблиця 6.7 – Розрахунок вартості обладнання

Найменування устаткування	Ціна за одиницю, грн.	Кількість одиниць	Балансова вартість, грн.
Стенд для вхідного і вихідного контролю	12500	1	13750
Установка для наплення МАП -2	182000	3	600600
Камера для обдування	14000	1	15400
Висувною шафа для мийки	8000	1	8800
Всього			638550

Таблиця 6.8 – Вартість основних засобів

Найменування основних засобів	Балансова вартість, грн.	Структура, %	Норма амортизації, %	Амортизаційні відрахування, грн.
будинки	432000	38,43	5	21600
споруди	21600	1,92	6,67	1440
устаткування	638550	56,8	20	127700
Цінні інструменти, прилади, транспортна візок	31925	2,8	40	12770
всього	1124075	100	-	163510

Норма амортизації встановлюється відповідно до документації і складає:

- для будівель – 5%;
- для споруд – 6,67%;
- для обладнання – 20%;
- для цінних інструментів – 40%.

6.2.5 Розрахунок фондів заробітної плати працівників

Сума заробітної плати, яка виплачується працівникам підприємства, створює фонд оплати праці. Фонд розраховується за прийнятими формами і системами оплати праці.

Оплата праці основних робітників здійснюється за відрядною формою оплати праці; допоміжних робітників за погодинною формою оплати. Керівники фахівці оплачуються по окладній системі.

Плановані доплати і премії приймаються в розмірі 50-60% від основної заробітної плати. Премії від прибутку становить для робітників 15% до основної заробітної плати, для керівників і фахівців - 40%.

Основний фонд заробітної плати основних робітників розраховується за формулою:

$$Z_{\text{осн}} = N \cdot \sum_{i=1}^b P_i \quad (6.7)$$

де b – кількість операцій технологічного процесу;

P_i – розцінка на i -ту операцію, грн.;

N – річна виробнича програма виробів, шт.

Розцінка на операцію розраховується за формулою:

$$P_i = C_i t_i, \quad (6.8)$$

$$P_i = 0.52 * 10.94 = 5.70$$

$$P_i = 0.027 * 8.6 = 0.23$$

$$P_i = 0.22 * 12.84$$

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

t_i – норма-час на i -ту операцію, норма-год.

Таблиця 6.9 – Розрахунок розцінок за операціями

Назва операції	Норма час, ч	Розряд	Годинна тарифна частина	Розцінка, грн.
Вхідний і вихідний контроль	0,052	4	10,94	0,80
Мийка	0,027	2	8,6	0,35
Піскоструминне обдування	0,027	2	8,6	0,35
Напилення на МАП-2	0,22	6	12,84	3,30
Всього				4,8

Відповідно до формули (6.7) основний фонд заробітної плати основних робітників дорівнює:

$$Z_{\text{осн}} = N \cdot \sum_{i=1}^b P_i = 50000 \cdot 4,8 = 240000 \text{ грн.}$$

Основний фонд заробітної плати допоміжних працівників, які перебувають на погодинній оплаті праці розраховується за формулою:

$$Z_{\text{осн}} = C_i F_{\text{др}} K_{\text{тар.ср}} R_{\text{доп}} \quad (6.9)$$

де C_i – годинна тарифна ставка i -того разряда;

$K_{\text{тар.ср}}$ – середній тарифний коефіцієнт;

$F_{\text{др}}$ – дійсний річний фонд часу робітників, ч;

$R_{\text{доп}}$ – число допоміжних працівників.

Відповідно до формули (6.9) тарифний фонд заробітної плати буде дорівнює:

$$Z_{\text{осн}} = C_i F_{\text{др}} K_{\text{тар.ср}} R_{\text{доп}} = 7,8 \cdot 1872 \cdot 1,35 \cdot 4 = 78849 \text{ грн.}$$

Складаємо зведену відомість по праці і заробітної плати всіх категорій робітників, чисельність працівників і їх середня заробітна плата наведені в таблиці 6.10.

Додаткова зарплата розраховується як 50% від основної заробітної плати.

Премії з прибутку як 30% від основної заробітної плати.

Відрахування на соцстрахування як 37% від фонду оплати праці.

6.3 Собівартість виробу

Собівартість виробу визначається усіма витратами ділянки за такими статтями прямих і непрямих витрат:

1. Основні і допоміжні матеріали (таблиця 6.5); 21845,25 тис. грн.
2. Закупівельні комплектуючі вироби і напівфабрикати; 7500 тис. грн.
3. Основна заробітна плата основних робітників, 240000 грн.
4. Допоміжна заробітна плата основних робітників
120000 грн. + 36000 грн. = 156000 грн.

Таблиця 6.10 – Фонд оплати праці

Категорії персоналу	Чисельність персоналу, чол	Фонд заробітної платні			Премія з прибутку, грн.	Середня з / п, грн	Фонд оплати праці, грн.	Соц-страх. грн.
		Основна з / п	Додаткова з / п	всього				
I. Основні виробничі робітники	12	240000	120000	360000	36000	2750	396000	146500
II. Допоміжні тільні робочі	4	78849	39424,5	118273	11830	2710	130103	48138
III. Керівники	2	52800	26400	79200	7920	3630	87120	32234,4
Всього	18	371649	185824,5	557473	55750	2838	613223	226892

5. Відрахування на соціальні заходи (таблиця 6.9); 146500 грн.

6. Паливо і енергія на технологічні цілі. Витрата енергії визначається за формулою:

$$C_{\text{эт}} = P \cdot F_{\text{др}} \cdot K_{\text{тар.ср}} \cdot R_{\text{доп}} \quad (6.10)$$

де P – потужність, що витрачається на 1 годину роботи; = 230 кВт. P

$t_{\text{шт}}$ – штучний час на створення вакууму на один виріб (на 24 лопатки - 1 година).

Ц – ціна за 1 кВт; $\text{Ц} = 0,9$ грн. / (кВт год).

N – програма випуску виробів; $N = 3000$ шт. / рік.

$$C_{\text{эт}} = 0,04 \cdot 230 \cdot 50000 \cdot 0,9 = 414000 \text{ грн.}$$

7. Витрати по утриманню та експлуатації обладнання, (за заводськими даними складають 400% від основної заробітної плати основних робочих) $240000 \cdot 4 = 960\ 000$ грн.

8. Загальновиробничі витрати.

9. Адміністративні витрати (за заводськими даними складають 150% від основної заробітної плати основних робочих) $240000 \cdot 1,5 = 360\ 000$ грн.

Собівартість одиниці продукції розраховується на підставі складання калькуляції собівартості продукції (таблиця 6.11).

Таблиця 6.11 – Калькуляція собівартості продукції

Статті витрат	Витрати	
	Всього на програм, тис. грн.	На одиницю, грн.
Основні і допоміжні матеріали	21845,25	436
Закупівельні комплектуючі та напівфабрикати	7500	150
Основна заробітна плата основних робітників	240	4,8
Додаткова заробітна плата основних робітників	156	3,2
Відрахування на соц.страх	146,5	2,9
Паливо і енергія на технологічні цілі	414	8,3
Витрати по утриманню та експлуатації обладнання -400%	960	19,2
Загальновиробничі витрати - 170%	410	8,2
Виробнича собівартість	31630	632,6
Адміністративні витрати 150%	360	7,2
повна собівартість	31990	640

Повна собівартість прийнята 640 грн. 31990 000 грн. - на програму.

6.4 Розрахунок економічного ефекту

Порівняльна економічна ефективність полягає у визначенні найбільш економічного варіанта вирішення господарського завдання. Показником порівняльної економічної ефективності є сума зведених витрат, сума ефекту за розрахунковий рік.

Показник зведених витрат:

$$З = C_i + E_n \cdot K_i \quad (6.11)$$

де C_i – повна собівартість за варіантом, грн;

E_H – нормативний коефіцієнт економічної ефективності капітальних вкладень; $E_H = 0,15$.

K_i – капітальні вкладення за проектом, грн.

Відповідно до формули:

$$Z_1 = 648 + 0,15 \cdot \left(\frac{1240500}{50000} \right) = 651,70 \text{ грн.}$$

$$Z_2 = 648 + 0,15 \cdot \left(\frac{1124075}{50000} \right) = 643,40 \text{ грн.}$$

Економічний ефект за розрахунковий рік визначається за формулою:

$$E = Z_1 + Z_2 \quad (6.12)$$

$$E = (651,70 - 643,40)50000 = 415000 \text{ грн.}$$

Економічний ефект досягається через поліпшення якості напилення, за рахунок, якого зменшується час напилення і упускається операція зачистки на яку потрібно основний робочий і спеціальне обладнання.

6.5 Аналіз показників і висновки

Фондовіддача розраховується за формулою:

$$\Phi_{\text{отд}} = \frac{31990 - 21845 - 7500}{1124} = 1,99 \text{ грн./грн.,}$$

Фондомісткість розраховується за формулою:

$$\Phi_{\text{эмк}} = \frac{\sum O\Phi}{\sum ПС}, \quad (6.13)$$

$$\Phi_{\text{эмк}} = \frac{1124}{31590 - 21845,25 - 7500} = 0,50 \text{ грн./грн.}$$

Продуктивність праці одного робітника визначається за формулою:

$$\text{ПП} = 3_2 \frac{C_n}{R}, \quad (6.14)$$

де C_n – повна собівартість товару в, грн;

R – чисельність людей.

$$\text{ПП} = \frac{31590 - 21845,25 - 7500}{18} = 124708,33 \frac{\text{грн.}}{\text{грн.}}$$

Показники економічної ефективності наведені в таблиці 6.12.

Таблиця 6.12 – Економічні показники

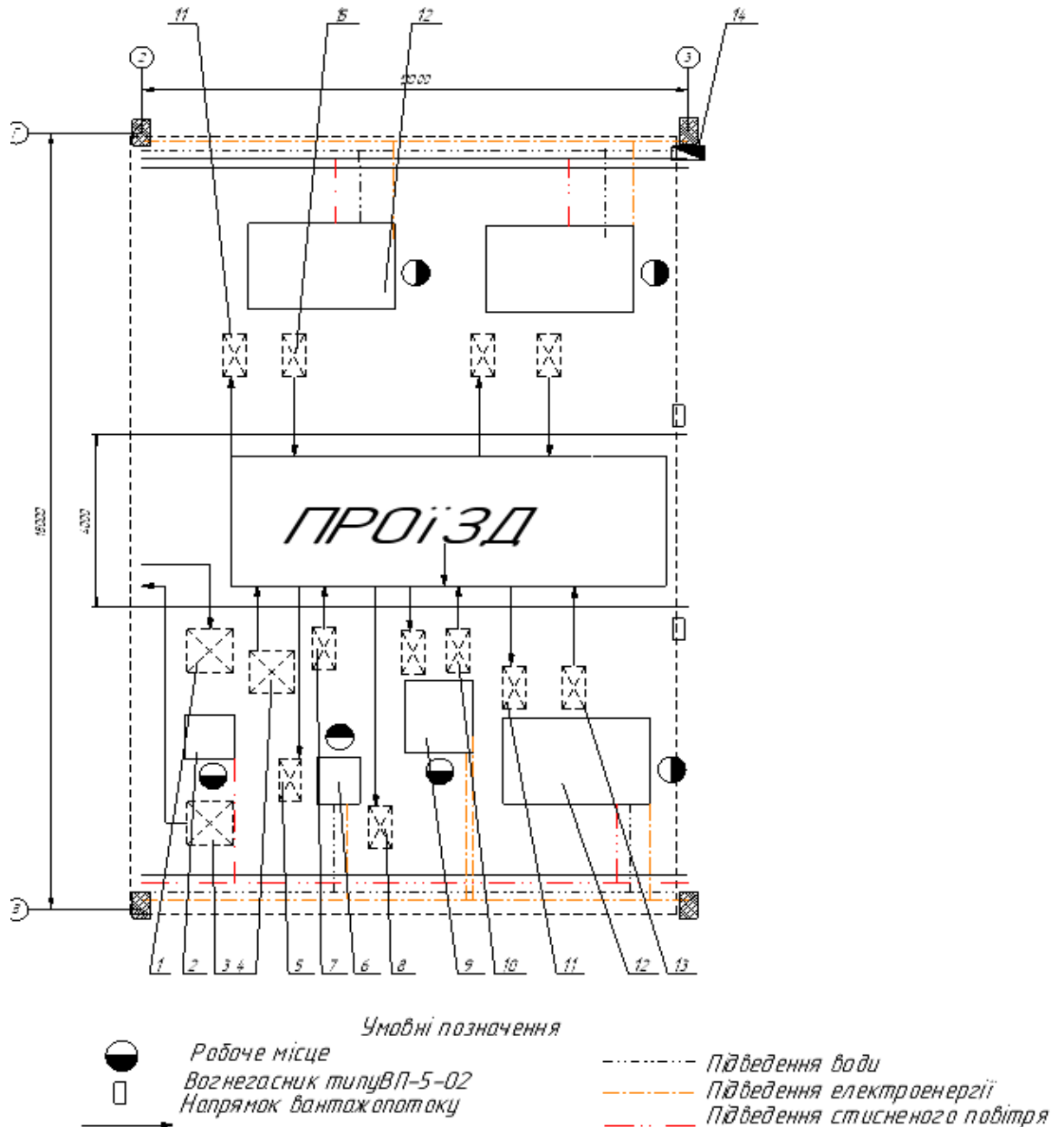
Найменування показника	Значення показника
1. Річний випуск продукції за кількістю, шт по трудомісткості, нормо-годин в грошовому вираженні тис. грн.	50000
	16300
	31990
2. Виробнича площа ділянки, м ²	216
3. Вартість основних фондів, тис. Грн.	1124
4. Кількість працівників, чол: - основних працівників - допоміжних працівників - керівників	18
	12
	4
	2
5. Фонд оплати праці, тис. Грн.	613,3
6. Середня заробітна плата працюючих грн.	2838
7. Продуктивність роботи працівника, тис грн. / чол.	124,7

8. Фондовіддача грн. / Грн.	1,99
9. Коефіцієнт завантаженості устаткування	0,71
10. Фондомісткість грн. / Грн.	0,50
11. Собівартість одиниці продукції грн.	640
12. Економічний ефект на рік, тис. Грн.	415

6.6 Планування ділянки

Розміщення цеху і всіх його виробничих і допоміжних відділень, адміністративно-конторських і побутових приміщень повинно по можливості повністю задовольняти всі вимоги. У розрахунок також необхідно брати специфіку виробництва.

Для проектування ділянки вибираємо загальноприйняту на підприємствах схему постановки з поздовжнім напрямком виробничого потоку (рисунок 6.1).



1 – складські місця для лопаток, що надійшли з цеху; 2 - стіл вхідного контролю; 3 - складські місця для лопаток, які не пройшли вхідний контроль; 4 - складські місця для лопаток, що пройшли вхідний контроль; 5 - складські місця для немитих лопаток; 6 - мийна машина; 7 - складські місця для помитих лопаток 8 - складські місця для неочищених лопаток; 9 - камера для обдування; 10 - складські місця для заструганих лопаток; 11 - складські місця для ненапиливих лопаток; 12 - установка для напилання МАП-2; 13 - складські місця для напиляним лопаток; 14 - пожежний щит

Рисунок 6.1 – Планування ділянки

РОЗДІЛ 7. ОХОРОНА ПРАЦІ І НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА. БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

7.1 Аналіз потенційних небезпек

Небезпеки, пов'язані з недостатньою професійною підготовкою персоналу або непроведення необхідних інструктажів з техніки безпеки, що може призвести до випадків травматизму чи професійних захворювань.

Можливість механічних травм, причинами яких можуть бути: порушення правил охорони праці.

Можливість ураження електричним струмом, основні причини можуть кваліфікуватися як організаційні і технічні. До організаційних відносяться: невиконання правил електробезпеки; До технічних відносять: відсутність захисного заземлення.

Небезпеки, пов'язані з раптовим руйнуванням судин для зберігання робочих газів під тиском через використання балонів термін придатності яких минув; необережне поводження з балонами; неправильного їх зберігання; порушення правил експлуатації балонів. Це може стати причиною серйозних руйнувань, важким механічним травмам або до летального результату.

Напруженість праці – характеристика трудового процесу, яка обумовлює навантаження на центральну нервову систему і пов'язана з монотонністю праці, емоційної перенавантаження.

Можливість отруєння захисними робочими газами в слідстві втрати герметичності трубопроводів, які подають робочі гази (аргон). Причинами можуть бути: механічне пошкодження трубопроводів, неправильне їх з'єднання або використання не відповідають гнучких шлангів.

Незадовільні параметри повітряного середовища через неефективну роботу систем опалення та повітрообміну, що може привести до загальних захворювань.

Небезпеки пов'язані з можливістю загоряння. Причини: порушення правил пожежної безпеки, витікання горючих робочих газів, коротке замикання.

Небезпеки, які пов'язані з неправильними діями персоналу в умовах надзвичайних ситуацій, або з незадовільною організацією рятувальних і відновлювальних робіт на виробництві.

7.2 Заходи щодо забезпечення безпеки

З метою забезпечення безпечного виконання робіт в дипломному проекті передбачено:

До роботи допускаються особи, які досягли 18-річного віку, мають певні знання за фахом, а також пройшли всі обов'язкові інструктажі згідно ДСТУ 3273-95 «Процеси виробничі. Загальні вимоги безпеки ». Обов'язковий медичний огляд всього персоналу для перевірки працездатності по ДНАОП 0.03-4.02-94 «Положення про медичний огляд ПРАЦІВНИКІВ питань комерційної торгівлі категорій».

З метою виключення механічних травм в проекті передбачено:

Проведення необхідних інструктажів при транспортуванні заготовок з фіксацією в спеціальному журналі і перевіркою знань, по НПАОП 0.00-1.30-01 «Правила безпечної роботи з інструментом та прилаштувати», забезпечення працівників ділянки спеціальним одягом згідно з ДСТУ 12.4.221:2004 «Одяг спеціальна захисна. Засоби індивідуального захисту ніг і рук», спец взуття по ДСТУ 3835-98 « Взуття спеціальне шкіряне для захисту від механічних впливів. Загальні технічні умови».

З метою запобігання факторів пов'язаних з можливістю ураження електричним струмом в проекті передбачено:

Організаційні заходи: проведення інструктажу і перевірки знань з електробезпеки по ДНАОП 1.1.10-1.01-2000 «Правила

безпеки експлуатації електроустановок».

Технічні заходи: перевірка захисного заземлення. Наявність оголених проводів, відкритих скруток згідно ПУЕ-2009 «Правила улаштування електроустановок» не допускається. Перевірка пристрою захисного відключення електроустановок по ДСТУ EN 61008-2-1:2014 «Пристрій захисного відключення. Класифікація. Загальні технічні вимоги».

З метою запобігання небезпек пов'язаних з раптовим руйнуванням судин для зберігання робочих газів під тиском, в проекті передбачено:

Організаційні заходи: проведення інструктажу про правила експлуатації і транспортування балонів з ДНАОП 0.00-1.07-94 «Правила побудова та безпечної експлуатації посудин, що працюють під тиском», НАОП 1.4.32-2.58-78 (ОСТ 4Г 0.091.241-87) «Легкозаймисті, Горючі, хімічно небезпечні та шкідливі речовини. Вимоги безпеки при зберіганні, транспортуванні та використанні». Перевірка балонів на придатність до використання, особливу увагу слід приділяти маркуванню балонів, на верхній частині повинно бути: номер балона, ємність, дата виготовлення, робочий і випробовується тиск і дата наступного випробування. Наповнені балони повинні зберігатися або в спеціальних приміщеннях окремо від основного ділянки або на відкритих майданчиках, але під спеціальними навісами, які захищають від дії прямих сонячних променів.

Всі заходи безпеки посилюються в холодну пору року так як гази стискаються, а сталь окрихчується. При використанні в цей період балонів, потрібно їх зберігати в теплому приміщенні для усереднення температури.

Технічні заходи: Переміщення балонів виконується за допомогою спеціальних візків з кріпленнями, з хомутами безпеки. Технічна схема виробництва передбачає подачу робочого газу від рампи до технічного обладнання по стаціонарних газопроводах, або від балона, який безпосередньо перебуває на ділянці через гнучкі шланги. Комутація виконується тільки обмідненим гайковим ключем. Температура балонів не повинна перевищувати 40 °С.

З метою запобігання можливості отруєння захисним робочим газом (аргон), внаслідок втрати герметичності трубопроводу, що подає робочий газ, в проекті передбачено:

Організаційні заходи: проведення інструктажу про використання засобів індивідуального захисту органів дихання згідно з ДСТУ EN 132:2004 «Засоби індивідуального захисту органів дихання. Класифікація та маркування».

Технічні заходи: наявність засобів індивідуального захисту органів дихання ДСТУ EN 140: 2004 «Засоби індивідуального захисту органів дихання. Півмаски і чверті маски», перевірка на герметичність газових рамп і шлангів по ГОСТ 12.0.003-74 * ССБТ« Небезпечні та шкідливі виробничі фактори. Класифікація».

Для виключення втрати герметичності в проекті передбачено:

- шланги повинні бути тільки армованими;
- з'єднання шлангів через спеціальні з'єднувачі і спеціальними хомутами;
- обов'язкова періодична перевірка трубопроводів на герметичність по стиках обпилюванням;
- використання засобів індивідуального захисту під час проведення робіт.

Також поверхню підлоги повинна бути рівною, без ям і поглиблень, так як аргон важчий за повітря і накопичується в приямках, що може призвести до летальних наслідків.

З метою мінімізації небезпек пов'язаних з напруженістю праці в проекті передбачено:

Організаційні заходи: проведення інструктажу по ГН 3.3.5-8.6.6.1-2002 «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу». Для мінімізації негативного впливу передбачається: перерви в роботі 5 хв / 1 година, оптимальний розподіл

праці і відпочинку.

7.3 Заходи щодо забезпечення виробничої санітарії та гігієни праці

Для забезпечення оптимального рівня параметрів повітряного середовища, виробничого середовища зазначених в ГОСТ 12.01.005-88 ССБТ «Загальні санітарно-гігієнічні вимоги до повітря робочої зони» (таблиця 7.1) У проекті передбачено в теплу пору року використовувати природну вентиляцію або механічну, в холодний період використовувати систему водяного опалення СНиП 2.04.05-91 «Опалення, вентиляція і кондиціонування».

Таблиця 7.1 – Оптимальні параметри повітряного середовища

Період року	Температура, °С	Відносна вологість, %	Швидкість руху, повітря м / с
Холодний	18-22	40-60	0,1-0,3
Теплий	20-23	40-60	0,1-0,4

Для організації достатнього освітлення робочої зони в проекті передбачено:

– перевірку освітленості робочої зони і справність освітлювальних ламп по ГОСТ 12.2.007.13-2000 ССБТ «Лампи електричні. Вимоги безпеки», передбачено влаштування системи загального штучного рівномірного освітлення в поєднанні з природним, і має бути не менше 300 люкс ДБН. В. 2.5-28-2006 Збірник 28. «Природньо и штучне освітлення»;

– вибір типу ламп і необхідної їх кількості для рівномірного освітлення поверхонь.

7.4 Заходи з пожежної безпеки

Горінням називається складний фізико-хімічний процес взаємодії горючої речовини і окислювача, який супроводжується виділенням тепла і випромінюванням світла.

Горюча речовина і окислювач, при певних умовах, утворюють горючу (вибухонебезпечну) середу. Залежно від агрегатного стану та ступеня подрібненої речовини, горюча середовище може утворюватися твердими речовинами, легкозаймистими. Але горючими рідинами, горючим пилом та горючими газами, при наявності окислювача. Процес горіння може призвести до пожежі.

Пожежа - неконтрольоване горіння поза спеціальним вогнищем, який супроводжується в часі і просторі.

Відповідно до ДСТУ 8828:2019 «Пожежна безпека. Загальні вимоги» передбачені кошти пожежогасіння. При гасінні палаючого титану і деяких інших сплавів категорично забороняється заливати їх водою, застосовувати пісок, вуглекислоту, азот, хладон, порошки типу ПСБ і П1А.

В цехах, де виробляється напилення кордону проходів, проїздів, робочих місць і складських приміщень передбачено позначати добре видимими знаками (білої незмивною фарбою). ДСТУ ISO 6309:2007 «Кольори сигнальні і знаки безпеки».

Вибір типу та визначення необхідної кількості вогнегасників виконано відповідно до залежності від протипожежної здатності вогнегасників, обмежувальної площі дії, класу пожежі в приміщенні, що підлягає.

Для ліквідації пожежі в початковій стадії їх розвитку силами персоналу об'єктів застосовуються первинні засоби пожежогасіння. До них відносяться: вогнегасники, пожежний щит до складу якого входить: кошма, ящик з піском, бочка з водою, пожежні відра - 2шт, совкові лопати - 2 шт, ломи – 1 шт, сокира – 1 шт. Також застосовуються системи автоматичного

пожежогасіння.

Первинні засоби пожежогасіння, в залежності від категорії приміщень, можуть розташовуватися як окремо, так і в складі пожежних щитів.

7.5 Заходи щодо забезпечення безпеки в надзвичайних ситуаціях

Найбільшу небезпеку для життєдіяльності виробничого персоналу представляють аварії технічних систем. Причинами аварій можуть бути стихійні лиха, порушення режимів технологічних процесів (недотримання технологічної дисципліни) або правил експлуатації виробничого, енергетичного, транспортного та ін. Обладнання, а також правил техніки безпеки.

З особливостей небезпечних аварій слідує: захисні заходи і, перш за все, прогнозування, виявлення і періодичний контроль за змінами обстановки, оповіщення персоналу підприємства повинні проводитися з надзвичайно високою оперативністю. Локалізація джерела надходження СДОР в навколишнє середовище має вирішальну роль в попередженні масового ураження людей. Швидке здійснення цієї задачі може направити аварійну ситуацію в контрольоване русло, зменшити викид СДОР і істотно знизити збитки.

Захист від СДОР являє собою комплекс заходів, що здійснюються з метою виключення або максимального послаблення поразки персоналу і збереження його працездатності.

Комплекс заходів по захисту від СДОР включає:

- інженерно-технічні заходи по зберіганню і використанню СДОР;
- підготовку сил і засобів для ліквідації хімічно небезпечних аварій;
- навчання їх порядку і правилам поведінки в умовах виникнення аварій;
- оповіщення про безпосередню загрозу поразки СДОР;

- тимчасову евакуацію з небезпечних районів;
- хімічну розвідку району аварії;
- пошук і надання медичної допомоги постраждалим;
- локалізацію та ліквідацію наслідків аварії.

Заздалегідь розроблені схеми оповіщення повинні визначати порядок оповіщення персоналу об'єктів, як в робочий, так і в неробочий час.

Для оповіщення персоналу працюючої зміни об'єкту, на якому сталася аварія, використовуються електро-сирени, радіотрансляційна мережа і внутрішній телефонний зв'язок.

Ліквідація наслідків локальної аварії здійснюється силами і засобами підприємства, на якому сталася аварія.

Керівництво ліквідації наслідків локальної аварії на підприємстві здійснює штаб проведення аварійних робіт на чолі з головним інженером підприємства.

Комплекс заходів по ліквідації наслідків аварій включає:

- прогнозування можливих наслідків аварій;
- виявлення і оцінку наслідків аварій;
- здійснення рятувальних та інших невідкладних робіт;
- ліквідацію хімічного зараження;
- проведення спеціальної обробки техніки і санітарної обробки людей;
- надання медичної допомоги ураженим.

Ліквідація хімічного зараження проводиться шляхом дегазації (нейтралізації) обладнання, будівель, споруд і місцевості в районі аварії, заражених СДОР, і здійснюється з метою зниження ступеня їхнього зараження та виключення ураження людей.

7.6 Висновки по розділу 7

У розділі розглянуті основні заходи щодо «Охороні праці», а саме:

1. З метою виключення механічних травм проведення необхідних інструктажів.

2. Для виключення уражень електричним струмом передбачено перевірки пристрою захисного відключення електроустановок.

3. З метою запобігання небезпек пов'язаних з раптовим руйнуванням судин для зберігання робочих газів під тиском, передбачено інструктаж по ДНАОП 0.00-1.07-94 «Правила побудова та безпечної експлуатації посудин, що працюють під тиском»; планова перевірка маркування балонів.

4. Для виключення ураження органів зору необхідно проведення інструктажів і атестацій.

5. З метою запобігання можливості отруєння захисним робочим газом (аргон), внаслідок втрати герметичності трубопроводу, що подає робочий газ, в проекті передбачено інструктаж по ДСТУ EN 132:2004 «Засоби індивідуального захисту органів дихання. Класифікація та маркування» та перевірка на наявність засобів індивідуального захисту органів дихання ДСТУ EN 140: 2004 «Засоби індивідуального захисту ОРГАНІВ дихання. Півмаски і маски».

ВИСНОВКИ

За результатами дослідження можуть бути зроблені наступні висновки:

1. Аналіз технічної літератури та сучасного стану питання показав, що роботи присвячені удосконаленню процесів отримання катодів для нанесення жаростійких покриттів з новою геометрією та складом, шляхом підвищення комплексу якісних та технологічних характеристик зливків, є актуальними та потребують подальшого розвитку.

2. Проведений комплексний аналіз матеріально-технічної бази для вирішення цілей та задач, поставлених у кваліфікаційній роботі. На підставі сучасних методів досліджень та випробувань обрані металургійні методи виготовлення катодів для застосування на установках КІБ.

Все це дозволило отримати залежності зміни якісних показників досліджуваних сплавів і встановити взаємозв'язок між ними.

3. Отримані результати впливу металургійних процесів ГМ, ЕПП, ВІВ, ВДП виготовлення катодів на їх якісні та технологічні властивості.

6. Отримана закономірність впливу вихідних типів структури сплавів катодів на шорсткість іонно-плазмового покриття.

7. Встановлені закономірності впливу геометричних характеристик катодів та хімічного складу на технологію нанесення градієнтного покриття. Реалізовано нанесення градієнтного покриття на лопатки турбіни з підвищенням товщини слою на вхідній кромці до ~ 95 мкм, а в середній частині профілю лопатки та вихідній кромці ~ 43 мкм. Використання такого градієнтного нанесення зі збільшеною товщиною забезпечує підвищення ресурсу робочої лопатки турбіни мінімум у два рази.

8. Проведене дослідження впливу мікролегуючих елементів Y, Hf, La на підвищення жаростійкості сплаву. Встановлено, що комплексне модифікування Y+Hf+La при температурі 1050 °C дозволяє збільшити жаростійкість на 2%.

9. Розроблено дослідно-промислову технологію механічної обробки поверхневого шару градієнтного покриття віброполіруванням із забезпеченням рівномірності знімання покриття, що дозволяє значно підвищити шорсткість з Ra 3,2 до Ra 0,4.

Для збільшення ремонтпридатності лопаток розроблена та запатентована технологія зняття жаротривкого покриття методом електrolітно-плазмової обробки.

10. Розраховані техніко-економічні показники проєкту та підтверджена його економічна доцільність.

11. Розглянуто основні шкідливі та небезпечні фактори виробництва та визначено шляхи захисту людини від дії небезпечних впливів.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В. Светлов И.Л., Демонис И.М. Литейные жаропрочные сплавы для перспективных авиационных ГТД. *Технология легких сплавов*. 2007. №2. С. 6-16.
2. Ефанов В.С., Прокопенко А.Н., Жеманюк П.Д. Эрозионная стойкость лопаток компрессора вертолетных ГТД с различными типами покрытий. *VIII Международные молодежные научно-технические чтения им. А.Ф. Можайского* : тезисы докладов (Запорожье, 19-20 мая 2015г.). Запорожье: АО «МОТОР СИЧ», 2015. С. 20-22.
3. Павленко Д.В. Исследование способов управления гранулометрическим составом металлических порошков при их получении методом газодинамического распыления сплавов. *Косм. наука технол.* 2002. №8. С.132-135.
4. Гарибов Г.С., Гриц Н.М., Добаткин В.И. Металлургия гранул жаропрочных никелевых сплавов. *Технология легких сплавов*. 2015. №2. С. 34–9.
5. Терновой Ю.Ф. Получение микрогранул сферической формы без сателлитов при диспергировании металлических расплавов инертным газом. *Металургія*. Випуск 2 (40). 2018. С. 28-32
6. Терновой Ю. Ф., Пашетнева Н. Н., Воденников С. А. Полуфабрикаты и изделия из распыленных металлических порошков. Запорожье: Изд-во ЗГИА, 2010. 184 с.
7. R.M. German «Powder Metallurgy and Particulate Materials Processing», США, 2005. – 540 с.
8. Yefanov V.S., Klochykhyn V.V., Skrebtsov A.A., Petryk I.A., Pedash O.O. Investigation of the Influence of Technology of Production of Cathodes on the Quality of Condensation Heat-Resistant Coatings. *Materials Science*. 2020. №55 (4), P. 609 – 615.
9. Лупінос С. М. Сучасні тенденції розвитку гранульної металургії /

С. М. Лупінос, Д. В. Прутцьков, Д. О. Листопад, В. О. Панова, Р. І. Безпалов, Р. М. Воляр *Металургія*. 2017. Вип. 2. - С. 33-37.

10. Казачков Е.А., Чепурной А.Д. Электронно-лучевой переплав. Раздел курса «Специальные процессы электроплавки». Мариуполь : ПГТУ, 1993. 38 с.

11. Патон Б. Е., Тригуб Н. П., Анохин С. В. Электронно-лучевая плавка тугоплавких и высокорекреационных металлов. Киев : Наук.думка, 2008. 312 с.

12. Готвянський Ю. Я., Рокожиця Н. М. Електронно-променеви переплав: можливості і перспективи розвитку (огляд). *Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра*: збірник праць співробітників і студентів кафедри «Фізико-хімічні основи технології металів». Київ: ІВЦ «Видавництво «Політехніка»», 2009. С. 54-58.

13. Электронно-лучевая плавка в литейном производстве / Под ред. С. В. Ладохина. Киев: Изд-во «Сталь», 2007. 626 с.

14. Березос В.О. Розробка обладнання та технології отримання порожнистих зливків великого діаметру з титанових сплавів методом електронно-променевої плавки : дис... канд. техн. наук: 05.16.07 / НАН України; Інститут електрозварювання ім. Є.О.Патона. Київ, 2006. 128 с.

15. Тихоновский А.Л., Тур А.А. Рафинирование металлов и сплавов методом электронно-лучевой плавки. Киев : Наукова думка, 1984. 272с.

16. Мовчан Б.А., Тихоновский А. Л., Куринов Ю. А. Электронно-лучевая плавка и рафинирование металлов и сплавов. Київ : Наукова думка, 1973. 237 с.

17. Патон Б. Е., Тригуб Н. П., Колзитин Д. А. Электронно-лучевая плавка. Київ : Наук. думка, 1997. 268 с

18. Мовчан Б.А., Тихоновский А.Л., Курапов Ю.А. Электронно-лучевая плавка и рафинирование металлов и сплавов. Киев: Наук. Думка, 1973. 238 с.

19. Патон Б. Е., Тригуб Н. П., Анохин С. В. Электронно-лучевая

плавка тугоплавких и высокорекреационных металлов. Київ : Наук. думка, 2008. 312 с.

20. Вольф О.О. Дослідження впливу електронно-променевого перепау на хімічний склад та механічні властивості титанових сплавів. *Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра* : збірник праць співробітників і студентів кафедри «Фізико-хімічні основи технології металів». Київ: ІВЦ „Видавництво «Політехніка»”, 2010. С. 52-56.

21. Костяков В.Н. Плазменно-индукционная плавка. Киев: Наукова Думка, 1991.-207 с.

22. Саенко В. Я. Институту електросварки – 75! Состояние и перспективы развития специальной электрометаллургии. *Современная электрометаллургия*. 2009. № 3 (96). С. 3-8.

23. Гасик М. И., Пройдак Ю. С. Применение электрошлакового и вакуумно-дугового перепау для повышения качества металла цельнокатаных железнодорожных колес. *Современная электрометаллургия*. 2019. № 1. С. 35-45

24. Фирстов С. А., Горная И. Д., Подрезов Ю. Н., Бондарь А. А., Шереметьев А. В. Свойства сплавов на основе алюминидов титана γ -TiAl/ α_2 -Ti₃Al при комплексном легировании. *Современная электрометаллургия*. 2018. № 3 (132). С. 32-38.

25. Darolia R. NiAl Alloys for high temperature structural applications . *J. Met.* 1991. V.43, N3. P. 44-49.

26. Спосіб захисту алітуванням металевих деталей турбомашин, які мають канали і порожнини: пат. 77525 Україна. №2002108052, заяв. 09.10.2002, опубл.15.12.2006, Бюл. No 12, 2006 р

27. Аршук М. В. Хижняк В. Г., Карпець М. В. Дифузійне хромоалітування сталі 12Х18Н10Т з попередньо нанесеним шаром нітриду титану. *Металознавство та обробка металів*. 2011. № 4. С. 20-24.

28. Локтев Д., Ямашкин Е. Методы и оборудование для нанесения износостойких покрытий. *Наноиндустрия*. 2007. №4. С. 18-24.

29. Ефанов В.С., Овчинников А.В., Джуган А.А., Ткаченко С.Н., Ждан В.С. Усовершенствование технологии выплавки слитков из никелевого сплава методом вакуумно-дугового переплава. *Металловедение и термическая обработка металлов*. Днепр, 2019. №3(86). С. 45-51.

30. Yefanov V., Ovchynnykov O., Dzhuhan O., Petrik I. Developing the modification of nickel cathodes for applying the ion-plasma coatings on the parts of aircraft engines. *Eastern-european journal of enterprise technologies*. 2020. №4, P. 6-13.

31. Авраменко В. С., Авраменко А. С. Проектування інформаційних систем: навч. посіб. Черкаси : Черкаський національний університет ім. Б. Хмельницького, 2017. 434 с.

32. Автоматизовані системи управління технологічними процесами: довідник / за заг. ред. Б. Б. Тимофеева ; уклад. Н. Г. Скрипаненко. Київ : Техника, 2003. 351 с.

33. Анзимиров Л. В. SCADA TRACE MODE – нові технології для сучасних АСУТП : навч. посіб. Київ : Автоматизація в промисловості, 2007. 113 с.

34. Вимоги до систем автоматизації. URL: <https://mydocx.ru/2-120435.html> (дата звернення: 13.12.2022).

35. Кустов К. І., Шершевер М. А. Автоматичне регулювання і регулятори. Київ, Металургія, 2007. 180 с.

36. Манько О. О. Методичні вказівки та завдання до виконання контрольної роботи з дисципліни «Основи проектування систем автоматизації» за напрямом підготовки 6.050202 «Автоматизація та комп'ютерно – інтегровані технології» для студентів заочної форми навчання. Рівне, 2012. 40 с.

37. Манько О. О., Кутя В. М. Методичні вказівки до виконання розрахунково-графічної роботи з дисципліни «Основи проектування систем автоматизації» для студентів, які навчаються за напрямом

підготовки 6.050202 «Автоматизація та комп'ютерно – інтегровані технології». Рівне, 2010. 31 с.

38. Метрологія, технологічні вимірювання та прилади: Метод.вказівки до вик. курс. проекту для студ. спец. 7.092501 «Автоматизоване управління технологічними процесами» та 7.092502 «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси та виробництва» ден. та заоч. форм навчання : уклад.: К. С. Архангельська, О. Й. Рішан. Київ : НУХТ, 2005. 223 с.

39. Методичні вказівки до практичних занять з кредитного модуля «Електричні системи керування» навчальної дисципліни «Технічні засоби автоматизації – 2» для студентів напрямку підготовки «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» по спеціалізації «Автоматизація хімікотехнологічних процесів і виробництв» : укладач В. М. Ковалевський, Київ : НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2017. 60 с.

40. Мікропроцесорні та програмні засоби автоматизації: методичні вказівки до курсового проекту для студентів спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» : уклад. А. М. Ніколаєнко. Запоріжжя: ЗДІА, 2016. 34 с.

41. Основи проектування систем автоматизації з елементами САПР: метод. вказівки до практичних занять для студ. напряму 0925 «Автоматизація і комп'ютерно-інтегровані технології» ден. та заоч. форм навч. уклад.: В. Г. Трегуб. Київ : НУХТ, 2008. 67 с.

42. Проектування систем керування: конспект лекцій для студентів спеціальності «Автоматизоване управління технологічними процесами» : уклад. М. З. Кваско, Я. Ю. Жураковський, А. І. Жученко, В. В. Миленький. Київ : НТУУ «КПІ», 2015. 279 с.

43. Промислові мікропроцесорні мережі. URL: <http://um.co.ua/8/8-11/8-110801.html> (дата звернення: 15.11.2023).

44. Рішан О. Й. Метрологія, технологічні вимірювання та прилади: Курс лекцій для студентів спеціальностей: 7.092501 «Автоматизоване

управління технологічними процесами» та 7.092502 «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва» ден. та заочн. форм. навчан. Київ : НУХТ, 2007. 162 с.

45. Сідлецький В. М., Трегуб В. Г. Проектування систем автоматизації : методичні рекомендації до виконання курсового проекту для студентів напрямку 6.050202 «Автоматизація та комп'ютерно – інтегровані технології» денної та заочної форм навчання : Київ, 2013. 46 с.

46. Трегуб В. Г. Проектування, монтаж та експлуатація систем автоматизації: навч. посібник. Київ : НМК ВО, 2015. 80 с.