

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний університет «Запорізька політехніка»

Інженерно-фізичний факультет

(повне найменування факультету)

Фізичне матеріалознавство

(повне найменування кафедри )

**Пояснювальна записка**

до дипломного проєкту (роботи)

магістр

(ступінь вищої освіти)

на тему Дослідження процесу формування металевого композитного матеріалу з метою розробки технології виробництва соплових подовжувачів

Виконав(ла): студент(ка) 2 курсу, групи ІФ213м

Спеціальності 132 Матеріалознавство

(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

Прикладне матеріалознавство

ДОБРОВОЛЬСЬКИЙ А.О

(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

Керівник ВІНІЧЕНКО В.С

(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

Рецензент \_\_\_\_\_

(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
**Національний університет «Запорізька політехніка»**

Факультет Інженерно-фізичний факультет

Кафедра Фізичне матеріалознавство

Ступінь вищої освіти магістр

Спеціальність 132 Матеріалознавство  
(код і найменування)

Освітня програма (спеціалізація) Прикладне матеріалознавство  
(назва освітньої програми (спеціалізації))

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри \_\_\_\_\_

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ року

**З А В Д А Н Н Я**  
**НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)**

ДОБРОВОЛЬСЬКИЙ Андрій Олександрович

(ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) Дослідження процесу формування металевого композитного матеріалу з метою розробки технології виробництва соплових подовжувачів  
керівник проєкту (роботи) доцент, к.т.н ВІНІЧЕНКО Валерій Степанович

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ року № \_\_\_\_\_

2. Строк подання студентом проєкту (роботи) 19.12.2024

3. Вихідні дані до проєкту (роботи) умови експлуатації соплових подовжувачів, вимоги до механічних властивостей

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)  
Літературний огляд, матеріали та методика досліджень, експериментальна частина, охорона праці, економіко-організаційна частина

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, кількість слайдів, плакатів)



## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до магістерської роботи: 86 с., 16 рис., 15 табл., 29 джерел

МЕТАЛЕВИЙ КОМПОЗИЦІЙНИЙ МАТЕРІАЛ, СОПЛОВІ ПОДОВЖУВАЧІ, МАТРИЦЯ ПЛАНУВАННЯ, МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ, СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ, ТЕХНОЛОГІЧНІ ПАРАМЕТРИ, ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ, ОХОРОНА ПРАЦІ

Об'єктом дослідження є металевий композиційний матеріал на основі жаростійких сплавів для виготовлення соплових подовжувачів.

Метою роботи є дослідження процесу формування металевого композиційного матеріалу та встановлення закономірностей впливу технологічних параметрів на його структуру і властивості для розробки соплових подовжувачів з підвищеними експлуатаційними характеристиками.

У роботі детально розглядаються конструктивні особливості соплових подовжувачів, специфіка формування структури металевих композиційних матеріалів, а також вплив технологічних параметрів на їх експлуатаційні характеристики. Проведено дослідження впливу різних режимів термічної обробки на структуру та властивості матеріалу, визначено оптимальні параметри технологічного процесу. Додатково розроблено рекомендації щодо промислового впровадження технології виготовлення соплових подовжувачів з розробленого композиційного матеріалу.

## ЗМІСТ

	С.
Вступ.....	6
1 Огляд сучасного стану досліджень високотемпературних композитів .....	8
1.1 Основні характеристики соплових подовжувачів та умови їх експлуатації .....	8
1.2 Види композиційних матеріалів, які використовуються для соплових подовжувачів .....	13
1.3 Ефективність використання вуглецевих волокон для зміцнення металевих матриць.....	22
2 Матеріали та методика досліджень.....	28
2.1 Хімічний склад сплавів, що досліджуються.....	28
2.2 Методика планування експерименту .....	29
2.3 Дослідження мікроструктури .....	30
3 Експериментальна частина .....	32
4 Економіко-організаційна частина.....	46
4.1 Актуальність теми з позиції маркетингу .....	46
4.2 Послідовний аналіз .....	47
4.3 Розрахунок економічного ефекту при впровадженні результатів НДР....	59
5 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.....	63
5.1 Аналіз потенційних небезпек.....	63
5.2 Заходи забезпечення безпеки.....	64
5.3 Заходи з виробничої санітарії .....	68
5.4 Заходи з пожежної безпеки .....	69
5.5 Заходи безпеки в умовах надзвичайних ситуацій.....	71
Висновки .....	76
Перелік джерел посилань .....	77

## ВСТУП

Розвиток сучасної ракетно-космічної техніки тісно пов'язаний із створенням нових матеріалів, здатних працювати в екстремальних умовах. Особливо гостро стоїть питання розробки матеріалів для соплових подовжувачів ракетних двигунів, які піддаються значним термічним, механічним та хімічним навантаженням. Актуальність теми дослідження обумовлена необхідністю створення металевих композиційних матеріалів (МКМ) з покращеними експлуатаційними характеристиками для виготовлення соплових подовжувачів, що дозволить підвищити ефективність та надійність ракетних двигунів.

Мета роботи полягає у дослідженні процесу формування металевих композиційного матеріалу та встановленні закономірностей впливу технологічних параметрів на його структуру та властивості для розробки соплових подовжувачів з підвищеними експлуатаційними характеристиками.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі: провести аналіз існуючих матеріалів та технологій виготовлення соплових подовжувачів; дослідити вплив складу та технологічних параметрів на формування структури МКМ; встановити залежності між структурою та властивостями отриманого матеріалу; розробити технологічні рекомендації щодо виготовлення соплових подовжувачів із розробленого МКМ.

Об'єктом дослідження є процес формування металевих композиційного матеріалу для соплових подовжувачів. Предметом дослідження виступають закономірності впливу технологічних параметрів на структуру та властивості металевих композиційного матеріалу.

Наукова новизна роботи полягає у встановленні нових закономірностей формування структури МКМ, визначенні оптимальних технологічних режимів отримання матеріалу та розробці нового складу композиційного матеріалу з підвищеними експлуатаційними характеристиками.

Практичне значення отриманих результатів полягає в розробці технологічних рекомендацій щодо виготовлення соплових подовжувачів, запропонуванні нового складу МКМ, що забезпечує підвищену жаростійкість та міцність. Результати досліджень можуть бути використані при проектуванні та виготовленні деталей ракетних двигунів, що дозволить підвищити їх експлуатаційні характеристики та надійність роботи в екстремальних умовах.

# 1 ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ ДОСЛІДЖЕНЬ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ КОМПОЗИТІВ

## 1.1 Основні характеристики соплових подовжувачів та умови їх експлуатації

Подовжувачі сопла ракетних двигунів – це критично важливі конструктивні елементи, що кріпляться до основного сопла для збільшення його довжини та підвищення ефективності роботи двигуна. Їх основне призначення – оптимізація процесу розширення газового потоку для досягнення максимальної тяги в умовах змінного атмосферного тиску.

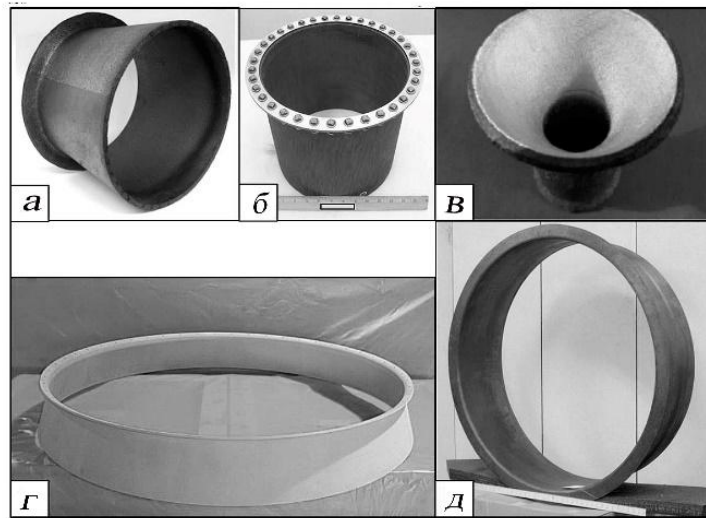
Області застосування:

- Ракети-носії космічного призначення
- Верхні ступені ракет
- Міжпланетні космічні апарати
- Двигуни орбітального маневрування
- Апарати для посадки на інші планети.

Конструктивні рішення, проілюстровані на рисунку 1.1, а-д [1], демонструють різноманітні варіанти виконання подовжувачів сопла. Їх інтеграція в конструкцію ракетного двигуна забезпечує два ключових переваги: оптимізацію питомого імпульсу тяги (що особливо ефективно проявляється в умовах космічного простору) та зменшення масових характеристик рушійної установки [2].

Представлені конструктивні рішення подовжувачів сопла демонструють різноманітні підходи провідних аерокосмічних компаній до вирішення задачі оптимізації характеристик ракетних двигунів. Спільна розробка компаній S-CAT та Ultramet - 2D-гібрид C-ZrC/C-C на основі ПАН з діаметром вихідної площини 279.4 мм являє собою інноваційне рішення, що поєднує переваги карбиду цирконію та вуглець-вуглецевих композитів. Використання поліакрилонітрильних волокон як основи забезпечує оптимальний баланс між

міцністю та масою конструкції, а 2D армування гарантує рівномірний розподіл навантажень.



а - C-ZrC/C-C гібрид на основі ПАН (C-CAT/Ultramet), діаметр вихідної площини 11";

б - 2D евольвентний насадок (Orbital ATK), діаметр вихідної площини 11";

в - інтегральна 2D евольвентна камера згоряння/сопло з іридієвим покриттям (Orbital ATK), діаметр вихідної площини 3";

г - 2D насадок (C-CAT) з високотемпературним та пакетно-цементованим покриттям, діаметр фланця 44";

д - 2D насадок (C-CAT), діаметр 42

Рисунок 1.1 - Подовжувачі сопла ракетних двигунів [3]

Orbital ATK представила два значущих рішення. Перше - радіальний 2D евольвентний насадок з аналогічним діаметром вихідної площини 279.4 мм, що відрізняється оптимізованою геометрією профілю для максимально ефективного розширення газового потоку. Друге - компактна інтегральна 2D евольвентна камера згоряння/сопло діаметром 76.2 мм з іридієвим покриттям, що демонструє можливість створення ефективних малогабаритних конструкцій з високою термічною стійкістю.

Компанія C-SAT розробила два масштабних проекти. Перший - це насадок діаметром 1117.6 мм з інноваційним покриттям, що наноситься методом високотемпературного розплаву та додатково захищається шаром, отриманим пакетною цементацією. Другий проект - це потужний насадок діаметром 1066.8 мм, оптимізований для роботи з великими потоками та обладнаний спеціальною системою охолодження [4].

Всі представлені конструкції об'єднують передові технологічні рішення: використання композиційних матеріалів, оптимізована геометрія, багат шарові захисні покриття та ефективні системи термозахисту. Особлива увага приділяється забезпеченню надійності та можливості багаторазового використання. Кожне рішення оптимізоване для конкретних умов експлуатації, що дозволяє досягти максимальної ефективності в різних застосуваннях - від малих маневрових двигунів до потужних ракетних систем.

Технологічні особливості виготовлення включають прецизійне формування профілів, нанесення спеціальних покриттів та створення складних композитних структур. Значна увага приділяється системам кріплення та з'єднання з основною конструкцією двигуна. Використання сучасних матеріалів та технологій дозволяє досягти оптимального співвідношення маси до ефективності при збереженні високої стійкості до термічних та механічних навантажень.

Представлені розробки демонструють тенденцію до створення все більш ефективних та надійних конструкцій, здатних працювати в екстремальних умовах космічного простору. Кожне з цих технічних рішень є результатом багаторічних досліджень та випробувань, що підтверджує їх практичну цінність для сучасної ракетно-космічної техніки [6].

Принцип роботи подовжувачів сопла базується на оптимізації процесу розширення продуктів згоряння. При підйомі ракети атмосферний тиск зменшується, що вимагає більшого ступеня розширення газового потоку для ефективної роботи двигуна. Подовжувач забезпечує додаткову площу розширення, дозволяючи отримати більшу тягу на великих висотах.

Конструктивні особливості сучасних подовжувачів включають складні системи охолодження, що можуть бути як активними (з циркуляцією охолоджувача), так і пасивними (радіаційного типу). Активне охолодження застосовується переважно в потужних двигунах перших ступенів, тоді як радіаційне охолодження характерне для верхніх ступенів та космічних апаратів.

Матеріалознавчий аспект є критично важливим при проектуванні подовжувачів. Сучасні конструкції використовують високотемпературні сплави, композиційні матеріали та керамічні покриття. Вибір матеріалу визначається робочими температурами, які можуть досягати 3300°C, механічними навантаженнями та необхідним ресурсом роботи.

Технологічні аспекти виготовлення подовжувачів постійно вдосконалюються. Впроваджуються адитивні технології, що дозволяють створювати складні геометричні форми з оптимізованими характеристиками. Розвиваються методи неруйнівного контролю якості та системи автоматизованого проектування.

Сучасні тенденції розвитку включають:

- Створення адаптивних конструкцій
- Впровадження нових композиційних матеріалів
- Оптимізацію геометрії за допомогою комп'ютерного моделювання
- Розробку інтелектуальних систем діагностики
- Вдосконалення технологій виготовлення

Експлуатація подовжувачів вимагає строгого дотримання технічних регламентів, включаючи періодичні огляди, контроль стану поверхонь та систем охолодження. Особлива увага приділяється захисту від корозії та механічних пошкоджень при транспортуванні та зберіганні.

Перспективи розвитку пов'язані з створенням більш ефективних конструкцій, здатних працювати при вищих температурах та навантаженнях. Досліджуються можливості використання нових матеріалів, включаючи металоматричні композити та керамічні матеріали нового покоління.

Температурні режими та теплові навантаження становлять першочергову проблему при експлуатації подовжувачів сопла. Робочі температури, що варіюються від 1200°C до 3300°C, вимагають застосування складних систем термозахисту. Активне охолодження, яке використовується в потужних двигунах, забезпечується циркуляцією холодоагенту через спеціальні канали в конструкції. Пасивні системи охолодження, включаючи радіаційне охолодження, застосовуються в умовах космічного простору. Теплозахисні покриття на основі керамічних та металокерамічних матеріалів забезпечують додатковий термічний захист.

Конструкційні матеріали для подовжувачів сопла повинні відповідати жорстким вимогам щодо жароміцності та стійкості до термічних навантажень. Сучасні конструкції використовують жароміцні нікелеві сплави типу Інконель та Хастелой, які зберігають міцність при високих температурах. Композиційні матеріали, зокрема вуглець-вуглецеві та керамоматричні композити, забезпечують оптимальне співвідношення міцності та маси. Тугоплавкі метали (вольфрам, молібден, ніобій) застосовуються в найбільш теплонапружених зонах. Градієнтні та багат шарові структури дозволяють оптимізувати розподіл температур по товщині конструкції [7].

Газодинамічні характеристики потоку в подовжувачі сопла характеризуються надзвуковими швидкостями з числом Маха 2.5-4.5. Тиск продуктів згоряння досягає 40-250 атм, а швидкість витікання газів становить 2000-4500 м/с. Такі умови створюють значні навантаження на конструкцію та викликають інтенсивну хімічну ерозію поверхні компонентами палива.

Механічні навантаження включають широкий спектр впливів: вібрації в діапазоні 20-2000 Гц, акустичні навантаження до 170 дБ, динамічні удари при старті та зупинці двигуна. Аеродинамічні навантаження при польоті та термомеханічна втома матеріалів також суттєво впливають на довговічність конструкції.

Сучасні системи діагностики та контролю включають комплекс датчиків для моніторингу стану подовжувача. Термопари та тензометричні датчики

забезпечують контроль температур та деформацій. Методи неруйнівного контролю, такі як акустична емісія, відеоендоскопія та ультразвукова дефектоскопія, дозволяють виявляти дефекти на ранніх стадіях.

Ресурсні характеристики подовжувачів значно варіюються залежно від призначення. Одноразові системи працюють 100-500 секунд, тоді як багаторазові розраховані на 10-50 циклів роботи з загальним ресурсом 1000-5000 секунд. Термін зберігання становить 5-15 років при дотриманні відповідних умов [8].

Особливості експлуатації вимагають ретельного дотримання технічних регламентів. Захист від атмосферних впливів, контроль вологості та корозії, періодичні технічні огляди є обов'язковими елементами обслуговування. Розроблені спеціальні методи очистки та відновлення поверхонь, а також правила транспортування та монтажу.

## 1.2 Види композиційних матеріалів, які використовуються для соплових подовжувачів

Вуглець-вуглецеві композиційні матеріали є провідними матеріалами для виготовлення компонентів теплових двигунів завдяки їх винятковій міцності та термостійкості, що робить їх особливо цінними для аерокосмічної галузі. Зокрема, їх успішно застосовують при виробництві подовжувачів сопел для потужних рідинних ракетних двигунів. Однак головним недоліком є їх схильність до окислення при температурах понад 350°C, причому інтенсивність окислення стрімко зростає з підвищенням температури. Для забезпечення тривалої експлуатації ці матеріали потребують захисного покриття поверхні. Сучасні дослідження спрямовані на вивчення структурних, механічних і теплових характеристик УВКМ, а також на розробку захисних

покриттів для протидії факторам середовища - УФ-випромінюванню, окисленню та ерозії.

Для підвищення окислювальної стійкості вуглецевих волокон застосовують різні типи захисних покриттів: металеві, оксидні, нітридні, карбідні та композитні. Керамічні покриття вважаються найперспективнішими через їх легкість і кращу змочуваність, що зменшує міжфазну дифузію.

Основні методи нанесення керамічних покриттів включають:

Осадження з парової фази (дає якісні однорідні покриття, але має високу вартість і низьку швидкість процесу).

Плазмова обробка (покрщує адгезію при нижчих температурах).

Золь-гель метод (більш економічний, потребує нижчих температур обробки і створює менші внутрішні напруження).

Останній метод привертає найбільшу увагу дослідників завдяки своїм практичним перевагам у порівнянні з іншими технологіями нанесення покриттів [9].

Актуальні дослідження демонструють різні підходи до вдосконалення властивостей вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів. Зокрема, було розроблено модифікований золь-гель метод нанесення комбінованого покриття  $\text{SiO}_2/\text{SiC}$  на вуглецеві волокна. Хоча це покриття значно підвищило стійкість до окислення, механічні властивості матеріалу при температурах до  $1000^\circ\text{C}$  залишились майже незмінними порівняно з непокритими волокнами.

Для вирішення проблеми низької міцності при міжшаровому зсуві було запропоновано метод електрофоретичного осадження вуглецевих нанотрубок на вуглецеву тканину. Дослідження показали, що оптимальний вміст ВНТ становить 0,54%, при якому міцність на міжшаровий зсув досягає 13,6 МПа, що у 2,27 рази перевищує початкові показники. Це покращення пояснюється двома факторами:

- підвищенням когезії матриці;

- формуванням багат шарових мікроструктур, які перешкоджають поширенню тріщин.

Однак залишається актуальною проблема високої енергоємності виробництва деталей з вуглець-вуглецевих композитів, що обмежує можливості їх масового виробництва. Наукова спільнота продовжує пошук шляхів зниження енергетичних витрат при виготовленні таких матеріалів та виробів з них.

Керамічні матеріали є перспективними для застосування в теплових двигунах завдяки здатності тривалий час зберігати механічні характеристики при температурах до 3000°C та меншій густині порівняно з металами. Такі властивості дозволяють знизити масу конструкцій, підвищити вхідну температуру робочого газу та скоротити витрати на охолодження.

Проте основним обмеженням для широкого впровадження керамічних матеріалів залишається їх крихкість та недостатня міцність, що ускладнює виготовлення тонкостінних деталей. Для реалізації потенціалу керамічних матеріалів у сучасному машинобудуванні та досягнення принципово нового рівня температурних характеристик необхідно підвищити їх міцність та в'язкість руйнування [10].

Існує декілька підходів до вирішення цієї проблеми: введення пластичної фази для збільшення енергії руйнування, подрібнення зерна, створення внутрішніх напружень стиску на шляху поширення тріщини, та армування волокнами. Особливо перспективним вважається останній метод, який реалізується через створення керамічних композиційних матеріалів (ККМ).

Керамічні композитні матеріали (ККМ) були створені для подолання природної крихкості традиційної кераміки (карбід-кремнієвої, оксид-алюмінієвої, нітрид-кремнієвої та інших). Сучасні дослідження зосереджені на армуванні цих матеріалів різними волокнами, зокрема металевими. Особливо ефективними виявилися вольфрамові сплави, які значно підвищують стійкість до теплових ударів, хоча й помірно впливають на міцність при розтягуванні.

ККМ поділяють на оксидні та безоксидні. Особливий інтерес представляють безоксидні ККМ, засновані на тугоплавких сполуках (боридах, карбідах, нітридах, силіцидах). Їх головна перевага - збереження механічних властивостей при температурах до 0,5-0,8 від температури плавлення, що значно перевершує можливості металевих матеріалів [11].

Армування технічної кераміки волокнами призвело до створення матеріалів з підвищеною стійкістю до розтріскування та термоударів, що особливо важливо для аерокосмічної галузі. Такі композити успішно застосовуються у критичних компонентах ракетних двигунів, зокрема у випускних соплах, де матеріали піддаються екстремальним тепловим навантаженням та хімічно агресивному середовищу.

Композити систем C/SiC і SiC/SiC вирізняються високою твердістю та низькою ерозією. При окисленні вони формують захисний шар кварцового скла, хоча їх застосування обмежене температурами 1200-1400°C через ризик активного окислення матриці карбіду кремнію до газоподібного монооксиду кремнію.

Сучасні дослідження спрямовані на розробку безоксидних ККМ для нового покоління газових турбін з робочими температурами до 1700°C, включаючи виготовлення сопел турбін методом спрямованої кристалізації.

Дослідження боридних евтектик на основі гексабориду лантану показали їх перспективність для виготовлення термоемісійних катодів. Зокрема, спрямовано армовані композити системи  $\text{LaB}_6\text{-MeIVB}_2$  демонструють значне покращення механічних властивостей. Встановлено, що щільність струму термоемісії евтектичного композиту  $\text{LaB}_6\text{-ZrB}_2$  зростає зі збільшенням швидкості кристалізації, досягаючи максимуму 36,24 А/см<sup>2</sup> при температурі 1873 К при швидкості 100 мм/год. Важливим фактором також є підвищення швидкості дифузії атомів лантану на межі розділу  $\text{LaB}_6/\text{MeB}_2$  [12].

Для виробництва таких матеріалів розроблено різні методи, включаючи іскро-плазмове спікання та технології порошкової металургії. Останній метод дозволив створити металокерамічний композит на основі титану з

евтектичними включеннями  $V_4C-TiB_2$ , який успішно застосовується в авіаційній техніці.

Значний прорив у покращенні структури СЗЕС досягнуто завдяки застосуванню механічних коливань під час кристалізації. Цей метод забезпечує:

- Інтенсивніше перемішування розплаву.
- Більш рівномірний розподіл компонентів.
- Формування особливої морфології волокон зі звивистою поверхнею.

Дослідження показали, що накладання механічних коливань призводить до:

- Більш однорідного розподілу розмірів включень.
- Рівномірнішої густини кристалів.
- Пригнічення формування колоній при помірних параметрах кристалізації.

Особливо важливим результатом є досягнення більш рівномірного розподілу диборидних включень по поперечному перетину завдяки додатковому перемішуванню розплаву. Це призвело до значного підвищення міцності на стиснення композитів - майже вдвічі, до 1530 МПа.

Ці вдосконалення пояснюються мінімізацією впливу концентраційного переохолодження, вирівнюванням концентраційного профілю та формуванням плоского фронту кристалізації, що забезпечує сумісний ріст евтектичних фаз [13].

Дослідження легування композиту  $V_4C-TiB_2$  кремнієм методом зонної плавки продемонструвало значне покращення характеристик матеріалу через подрібнення структури, що призвело до подвоєння міцності на згин - до 460 МПа при кімнатній температурі та 487 МПа при  $1600^\circ C$ .

Спрямовано закристалізовані евтектичні сплави (СЗЕС) становлять значний інтерес завдяки їх багатоконпонентному складу, що забезпечує синергетичний ефект властивостей, винятковим механічним характеристикам при високих температурах та хімічній стійкості. Для вдосконалення їх

структури застосовують різні методи, включаючи введення додаткових фаз (як у системі  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-YAG-YSZ}$  з міцністю на згин 4,7 ГПа), створення квазіпотрійних безоксидних систем ( $\text{B}_4\text{C-TiB}_2\text{-SiC}$ ,  $\text{Mo-Mo}_3\text{Si-Mo}_5\text{SiB}_2$ ) та використання евтектичних порошків з підвищеними мікромеханічними характеристиками [14].

Особливо ефективним виявився метод відцентрового розпилення, який забезпечує високу швидкість охолодження до  $105^\circ\text{C}/\text{сек}$ , однорідність сферичних частинок та можливість обробки тугоплавких матеріалів із додатковим рафінуючим ефектом плазмової дуги. Дослідження впливу атмосфери спікання виявили, що використання азоту замість аргону підвищує міцність композитів ( $\text{B}_4\text{C-TiB}_2$ )- $\text{B}_4\text{C}$  на 16% завдяки утворенню зміцнюючих нітридних фаз, зменшенню розміру зерен карбїду бору та формуванню двійникових структур, що перешкоджають поширенню тріщин.

Проте важливою проблемою залишаються внутрішні залишкові напруження, що виникають через різницю коефіцієнтів теплового розширення фаз та відсутність пластичної деформації в кераміці при охолодженні. Ці напруження, особливо розтягувальні, можуть значно знижувати механічні властивості композиту та сприяти утворенню тріщин, що потребує подальших досліджень для вирішення цієї проблеми.

Дослідження показали ефективність термічної обробки для зниження внутрішніх напружень у спрямовано закристалізованих евтектичних сплавах. Зокрема, нагрівання сплаву  $\text{B}_4\text{C-TiB}_2$  до  $1400^\circ\text{C}$  у вакуумі дозволило значно знизити рівень внутрішніх напружень та наблизити стан матричної фази до рівноважного [15].

Додаткові дослідження підтвердили позитивний вплив відпалу на властивості матеріалів. Особливо показовими були результати для сплаву  $\text{LaB}_6\text{-TiB}_2$ , де відпал при температурах  $1000\text{-}1600^\circ\text{C}$  призвів до пропорційного підвищення механічних властивостей відносно зменшення залишкових напружень в обох фазах - матричній та армувальній.

Застосування цих методів термічної обробки відкриває перспективи для оптимізації механічних характеристик матеріалів до рівня, необхідного для виготовлення деталей теплових двигунів, що працюють при високих температурах.

Оксидні керамічні композитні матеріали (ККМ) характеризуються структурою, в якій і волокна, і матриця складаються з оксидних сполук. Серед матричних матеріалів найчастіше використовуються керамічні матеріали на основі оксидів алюмінію, берилію, церію та цирконію. Завдяки високій стійкості до окислення, ці матеріали особливо ефективні для застосування в окислювальних середовищах, що робить їх ідеальними для виготовлення компонентів гарячих секцій теплових двигунів, як показано на рисунку 1.2 [16].

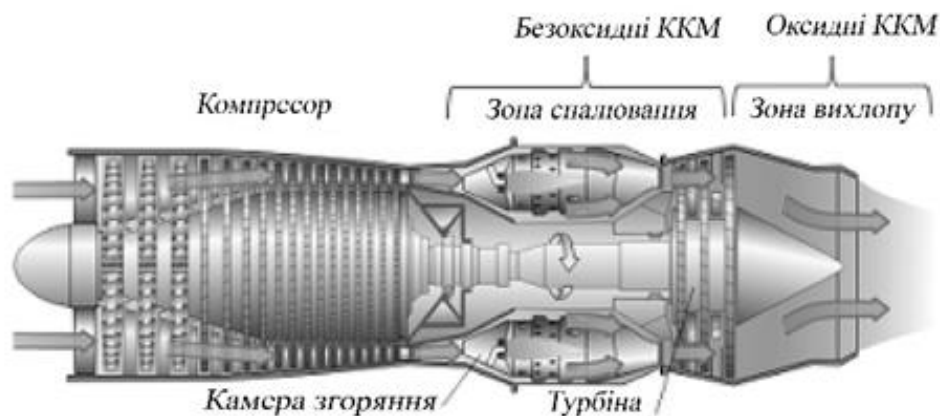
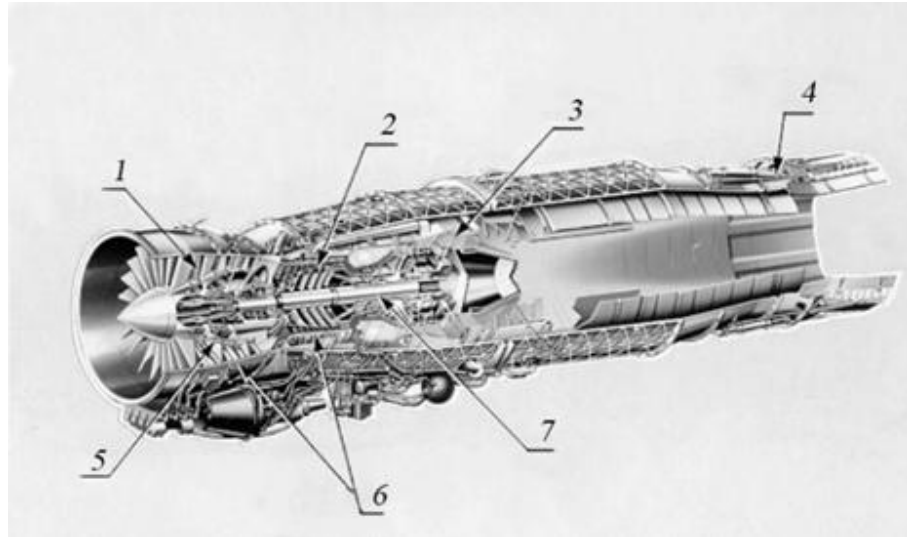


Рисунок 1.2 - Частини двигуна, що виготовляються із ККМ

Композиційні матеріали з металевою матрицею (ММК) зайняли важливе місце серед сучасних високотемпературних матеріалів. Традиційно вони створюються на основі сплавів нікелю, титану та алюмінію з армуванням волокнами. Останнім часом як матричні матеріали також застосовують сплави на основі більш тугоплавких металів - ніобію, молібдену та вольфраму. Потенційні області застосування металоматричних композитів у конструкціях проілюстровано на рисунку 1.3.

Армування металевих композиційних матеріалів здійснюється переважно безперервними волокнами різних типів. До них належать вуглецеві та борні волокна, а також волокна з неорганічних сполук:  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiC}$ ,  $\text{B}_4\text{C}$ ,  $\text{BN}$ ,  $\text{TiB}_2$ ,  $\text{SiO}_2$  [17].



1 - Лопатки компресора, 2 – компресорні кільця, 3 – турбінні кільця,  
4 – стійки приводу, 5 – компресорні ущільнювачі,  
6 – корпус компресора, 7 – вал

Рисунок 1.3 - Потенційні місця застосування металоматричного композиту в двигуні EJ200

В якості армуючих елементів також використовується тонкий металевий дріт, виготовлений методом волочіння зі сталі, вольфраму, титану, молібдену та берилію. Менш поширеним є застосування спеціально вирощених ниткоподібних кристалів різноманітних матеріалів.

Хоча оксидні волокна перспективні для композитів, їх виробництво ускладнене повільною внутрішньою кристалізацією в каналах матриці. Додатковою проблемою є складність контролю міцності з'єднання між оксидним волокном і нікелевою матрицею.

Для оптимізації взаємодії волокон з матрицею застосовують захисні покриття. Наприклад, волокно SCS-2 має вуглецевий шар товщиною 1 мкм. Однак це не є універсальним рішенням - дослідження композиту зі сплаву ЖС-32 з волокнами  $Al_2O_3-Al_5Y_3O_{12}$  показало, що надмірне збільшення об'ємної частки волокон знижує міцність межі поділу та загальну жароміцність [18].

Вольфрамові сплави як волокна привабливі високою міцністю та пружністю при різних температурах, але схильні до розшарування. Цю проблему вирішують використанням нанорозмірних порошоків (менше 200 нм) та оптимізацією режимів спікання.

Перспективним є композит з шаруватою ніобій-титановою матрицею та вольфрамовим армуванням, створений двоетапним контактним зварюванням: спочатка «м'які» режими для заповнення проміжків, потім «жорсткі» для формування зон проплавлення навколо волокон.

Особливий інтерес представляють дисперсно-зміцнені нікелеві сплави, де матриця ( $\gamma$ -твердий розчин з 20% хрому або 15% молібдену) несе основне навантаження, а дисперсні частинки (10-500 нм) перешкоджають руху дислокацій. Їх перевага - ізотропність властивостей. Введення тонкодисперсних  $ThO_2$  або  $ZrO_2$  підвищує робочу температуру деталей двигуна з 1000°C до 1200°C.

Металеві композиційні матеріали ефективні як захисні покриття для високотемпературних деталей авіадвигунів. Особливо перспективним є композит з диборидом титану-хрому ( $TiCrB_2$ ), який, незважаючи на крихкість, має високу жаро- та зносостійкість при низькій густині (4,5 г/см<sup>3</sup>). В поєднанні з хромонікелево-алюмінієвою матрицею (NiAlCr) створюється ефективне покриття, де оптимальне співвідношення -  $TiCrB_2 + 50\% NiAlCr$ . Збільшена частка металевої фази покращує фізико-механічні характеристики.

Важливим напрямком є розробка вольфрамових матеріалів для термоядерних реакторів. Традиційний вольфрам має обмеження через крихкість при помірних температурах та схильність до окрихчення при

нейтронному опроміненні. Ці недоліки долаються створенням композиту, армованого вольфрамовими волокнами (Wf/W). Випробування показали підвищену ударну в'язкість завдяки пластичній деформації волокон, що вирішує проблему розтріскування при циклічних теплових навантаженнях.

Новітні розробки включають створення Wf/W з пористою матрицею методами порошкової металургії. Такий підхід зменшує взаємодію на межі волокно-матриця, спрощує виробництво та забезпечує псевдопластичну поведінку матеріалу з підвищеною в'язкістю руйнування порівняно з чистим вольфрамом [19].

### 1.3 Ефективність використання вуглецевих волокон для зміцнення металевих матриць

Розвиток нанотехнологій відкрив нові можливості у створенні інноваційних металоматричних нанокompозитів. Особливу увагу привертають вуглецеві наноматеріали - графен та вуглецеві нанотрубки (ВНТ), які завдяки унікальному поєднанню високого модуля пружності, механічної міцності та відмінної електро- й теплопровідності стали перспективними армувальними компонентами композитних матеріалів.

Успішне впровадження ВНТ у полімерних композитах спонукало до їх застосування в металевих матрицях. Металоматричні композити з ВНТ демонструють покращену термостабільність, підвищену міцність і жорсткість, а також чудові електричні та теплові характеристики порівняно з полімерними аналогами.

Графен, маючи надзвичайні механічні властивості (міцність на розрив до 1060 ГПа, модуль Юнга близько 1100 ГПа при густині 1,06 г/см<sup>3</sup>), розглядається як ідеальний зміцнювач для металоматричних композитів.

Численні дослідження підтверджують його ефективність через різні механізми зміцнення: зеренний, дислокаційний та механізм Орована [20].

Порівняльні дослідження одновимірних ВНТ та двовимірних графенових нанолістів як армувальних елементів показали їх переваги над керамічним армуванням, особливо щодо теплопровідності та коефіцієнта теплового розширення. Вуглецеві волокна демонструють високу міцність на розрив (3,10-4,07 ГПа) при відносно низькому модулі (231-248 ГПа), який можна підвищити до 480 ГПа шляхом графітизації, хоча це дещо знижує міцність. Такі композити особливо придатні для космічних застосувань, де потрібна стійкість до вакууму, іонізуючого випромінювання та плазми [21].

Проте існують технологічні виклики: складність рівномірного розподілу ВНТ у металевій матриці через їх схильність до агломерації, проблеми змочування розплавленими металами через різницю в поверхневому натягу, утворення небажаних міжфазних сполук та ризик гальванічної корозії. Додатково, висока вартість виробництва обмежує широке комерційне впровадження таких композитів порівняно з полімерними аналогами.

Незважаючи на ці виклики, дослідження в галузі металоматричних нанокompозитів продовжують активно розвиватися, відкриваючи нові можливості для створення матеріалів з покращеними експлуатаційними характеристиками для високотехнологічних застосувань [22].

Розробка конструкційних матеріалів часто стикається з проблемою балансування між високою міцністю та достатньою в'язкістю. Яскравим прикладом є композит Nb/Nb<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>, який розглядається як перспективна заміна нікелевих суперсплавів у авіаційних двигунах. Цей матеріал має вражаючі характеристики: робочу температуру близько 1400°C, високу жорсткість, низьку густину та відмінну стійкість до окислення. Проте його практичне застосування обмежується низькою в'язкістю при кімнатній температурі.

Традиційні методи підвищення в'язкості, такі як легування, часто призводять до небажаного зниження міцності. Однак сучасні дослідження пропонують інноваційні рішення. Зокрема, модифікація композиту графеном

показала обнадійливі результати. При такому підході відбувається трансформація границь середньої невідповідності в мультиграниці низької невідповідності Nb-Nb<sub>4</sub>C<sub>3</sub>-Nb<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> через утворення нанорозмірних фаз Nb<sub>4</sub>C<sub>3</sub>. Це дозволяє досягти оптимального балансу між міцністю та в'язкістю [23].

Перспективним виявився також метод армування вуглецевими волокнами з використанням іскрового плазмового спікання. Дослідження показали, що оптимальна температура спікання становить 1500°C, при якій досягається висока густина матеріалу (99%), рівномірний розподіл неушкоджених волокон та формування міцного з'єднання між волокнами і матрицею завдяки утворенню фази Nb<sub>4</sub>C<sub>3</sub>. При вищих температурах (1550°C) спостерігається деградація механічних властивостей через пошкодження вуглецевих волокон внаслідок надмірної реакції на межі поділу.

Ці дослідження демонструють, що досягнення оптимального балансу механічних властивостей у композиті Nb/Nb<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> можливе через контрольоване формування міжфазних границь та використання передових методів виготовлення, що відкриває нові перспективи для застосування цих матеріалів у авіаційній промисловості.

Графенове модифікування композиту Nb/Nb<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> відкриває нові перспективи у розробці високотемпературних конструкційних матеріалів для авіаційних двигунів. Дослідження показали, що використання іскрового плазмового спікання дозволяє отримати композит з винятковими характеристиками міцності та в'язкості руйнування при кімнатній температурі. При підвищенні температури виготовлення від 1450°C до 1550°C спостерігається трансформація мікроструктури від шаруватої до рівномірно розподіленої рівноважної.

Високі механічні властивості досягаються завдяки ефективній передачі навантаження на графен, що підсилюється утворенням міжфазної нанорозмірної фази Nb<sub>4</sub>C<sub>3</sub>. Механізми зміцнення включають можливість висмикування графену при руйнуванні, а також відхилення та перекриття тріщин графеновими включеннями.

Важливим аспектом є трансформація міжфазної границі Nb–Nb<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> із середньою невідповідністю в мультиграницю Nb–Nb<sub>4</sub>C<sub>3</sub>–Nb<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> з низькою невідповідністю. Це досягається завдяки введенню графену та формуванню нанорозмірної фази Nb<sub>4</sub>C<sub>3</sub> на границі розділу. Низька невідповідність границь Nb<sub>4</sub>C<sub>3</sub>–Nb і Nb<sub>4</sub>C<sub>3</sub>–Nb<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> сприяє формуванню міцного міжфазного зв'язку, що покращує передачу навантаження [24].

Дослідження впливу різних об'ємних часток графену (0-1,0%) на властивості композиту показали оптимальне значення 0,75%, при якому досягається максимальна міцність на стиск 2692 МПа та деформація 9,87%, що на 41% та 32% відповідно перевищує показники неармованого композиту. Мікроструктурний аналіз виявив формування стрижнеподібної фази Nb<sub>4</sub>C<sub>3</sub>, яка створює ефект закріплення між графеном та матрицею, підвищуючи міжфазну міцність [25].

Важливо відзначити, що хоча зі збільшенням вмісту графену об'ємна частка фази Nb<sub>4</sub>C<sub>3</sub> зростає, її морфологія та розміри залишаються стабільними. Це свідчить про контрольований характер міжфазної взаємодії, що є спеціал для оптимізації механічних властивостей композиту.

Результати досліджень підтверджують ефективність графенового модифікування як стратегії подолання компромісу між міцністю та в'язкістю в композитах Nb/Nb<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>. Отримані матеріали демонструють унікальне поєднання механічних характеристик, що робить їх перспективними для застосування в авіаційній промисловості та інших високотехнологічних галузях, де потрібні матеріали з високими експлуатаційними властивостями при підвищених температурах.

При дослідженні впливу концентрації графену на властивості композиту Gr/Nb–Si виявлено, що збільшення його вмісту до 1,0 об.% призводить до погіршення міцнісних характеристик матеріалу. Це явище пов'язане з тенденцією графену до агломерації, де окремі шари утримуються разом слабкими силами Ван-дер-Ваальса. Оскільки ці міжмолекулярні сили значно слабші за ковалентні зв'язки між атомами вуглецю в структурі графену, при

навантаженні відбувається руйнування між агломерованими листами при відносно низьких напруженнях, що негативно впливає на загальну міцність композиту.

Дослідження в'язкості руйнування показали кореляцію з міцнісними характеристиками матеріалу. Оптимальні результати спостерігаються при концентрації графену 0,75 об.%, де в'язкість руйнування досягає  $38,25 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$ , що демонструє значне покращення - на 67% порівняно з неармованим композитом Nb/Nb<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> ( $22,88 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$ ) та на 32% порівняно з композитом, що містить 0,25 об.% графену ( $28,88 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$ ). Ці дані підтверджують ефективність модифікування композитів Gr/Nb-Si графеном для підвищення їх механічних характеристик при оптимальній концентрації армувального компонента.

Сучасні дослідження в галузі металоматричних композитів (МКМ) з вуглецевими нанотрубками (ВНТ) охоплюють широкий спектр технологічних аспектів - від методів синтезу до практичного застосування. Особлива увага приділяється розробці ефективних методів диспергування ВНТ у металевих матрицях, що залишається ключовим викликом для промислового впровадження цих матеріалів [26].

Значний прогрес досягнуто у розвитку методів характеристики наноструктурних композитів, включаючи in-situ дослідження механізмів деформації. Електронна мікроскопія дозволила поглибити розуміння міжфазних взаємодій та механічної поведінки композитів. Розробляються композити з подвійним армуванням для оптимізації властивостей та підвищення ефективності ВНТ. Систематизація методів обробки та їх впливу на властивості матеріалів створює основу для подальших досліджень та комерціалізації ВНТ-МКМ [27].

Інтенсивна пластична деформація зарекомендувала себе як перспективний метод створення наноструктурних та ультрадрібнозернистих композитів різних типів: метал-метал, металоматричних та аморфних композитів. Дослідження композитів мідь-ВНТ, отриманих методом кручення

під високим тиском, показали підвищену термічну стабільність ультрадрібнозернистої структури порівняно з чистою міддю. Додавання ВНТ ефективно перешкоджає рекристалізації та підвищує твердість в широкому температурному діапазоні (300-1000 К), хоча може призводити до підвищення пористості при термообробці.

З часу відкриття ВНТ їх унікальні механічні властивості зробили їх привабливими армувальними компонентами для композитних матеріалів. Удосконалення методів виробництва як самих ВНТ, так і матричних матеріалів сприяє створенню високоефективних композитів з оптимізованими характеристиками. Незважаючи на широкий потенціал застосування, композити з ВНТ все ще залишаються спеціалізованими матеріалами з обмеженим використанням у специфічних галузях, що відкриває простір для подальших досліджень та розробок [28].

## 2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

### 2.1 Хімічний склад сплавів, що досліджуються

Для створення композиційних матеріалів, що експлуатуються при температурах до 1300°C протягом короткочасних періодів, особливий інтерес представляє нікелевий сплав ЭК64. У порівнянні з раніше використовуваним сплавом ВЖ98, він демонструє підвищену жароміцність при меншому вмісті вольфраму. Проте, спроби застосування технологічних режимів, що були успішними для композитів на основі ВЖ98, не дали задовільних результатів при формуванні бездефектної структури композиту з матрицею ЭК64. Це зумовило необхідність додаткових досліджень процесу формування композиційного матеріалу на основі сплаву ЭК64. Хімічний склад сплавів наведений у таблиці 2.1

Таблиця 2.1 – Хімічний склад сплавів КМ

Сплав	Ni	Cr	Co	W	Mo	Al	Ti	Nb	C	B	Ce
ЭК64	основа	9.0-	9.5-	4.5-	1.2-	4.2-	1.4-	4.0-	0.03-	0.01-	0.01-
		10.5	10.5	5.5	1.8	4.8	1.8	4.6	0.07	0.02	0.03
ВЖ98	основа	14.5-	9.5-	7.5-	3.2-	3.9-	2.5-	-	0.06-	0.005-	-
		16.5	11.5	8.5	3.8	4.5	2.9		0.10	0.015	

Сплав ЭК64 відрізняється від ВЖ98 меншим вмістом вольфраму та хрому, що забезпечує економічну ефективність при збереженні високих механічних характеристик. Важливою особливістю ЭК64 є наявність ніобію (4.0-4.6%), який відсутній у ВЖ98 – цей елемент сприяє формуванню зміцнюючих фаз та підвищує жароміцність матеріалу. Додавання церію в ЭК64 покращує технологічні властивості, зокрема пластичність та зварюваність. Натомість, ВЖ98 характеризується підвищеним вмістом молібдену та титану, що забезпечує додаткове твердорозчинне зміцнення.

Легування сплаву ЭК64 має ряд особливостей. Знижений вміст хрому (9.0-10.5%) створює оптимальний баланс між корозійною стійкістю та структурною стабільністю. Кобальт у кількості 9.5-10.5% підвищує температуру плавлення та стабілізує  $\gamma$ -фазу. Специфічна комбінація алюмінію і титану формує оптимальну морфологію зміцнювальної  $\gamma'$ -фази. Бор покращує пластичність та технологічність сплаву, а церій сприяє подрібненню зерна та покращує властивості міжзеренних границь.

При використанні в композиційних матеріалах сплав ЭК64 демонструє ряд переваг. Він забезпечує вищу термічну стабільність структури та краще співвідношення міцність/вартість. Сплав характеризується покращеною технологічністю при виготовленні композитів та вищою пластичністю, що особливо важливо при формуванні композиційного матеріалу. Завдяки оптимізованому хімічному складу досягається потенційно краща взаємодія з армуючими компонентами, що є критичним фактором для отримання якісних композиційних матеріалів.

## 2.2 Методика планування експерименту

Для проведення дробового факторного експерименту  $2^{5-2}$  використовується дробова репліка, яка дозволяє скоротити кількість дослідів до 8 замість 32 при повному факторному експерименті. Застосовуються генеруючі співвідношення  $x_4 = x_1x_2x_3$  та  $x_5 = x_1x_2$ , з визначальним контрастом  $I = x_1x_2x_4 = x_1x_2x_5$ .

Експеримент починається з побудови матриці планування для трьох незалежних факторів ( $x_1, x_2, x_3$ ), де рівні четвертого ( $x_4$ ) та п'ятого ( $x_5$ ) факторів розраховуються за генеруючими співвідношеннями. Фактори кодуються на двох рівнях: верхньому (+1) та нижньому (-1). Досліди проводяться у

випадковій послідовності з  $m$  повторами для оцінки відтворюваності, при цьому реєструється відгук  $y$  для кожного досліду.

Статистична обробка результатів включає перевірку однорідності дисперсій за критерієм Кохрена та розрахунок коефіцієнтів регресії:  $b_0 = \Sigma y_i / N$  для вільного члена,  $b_i = \Sigma x_i y_i / N$  для лінійних ефектів та  $b_{ij} = \Sigma x_i x_j y_i / N$  для ефектів взаємодії. Значимість коефіцієнтів оцінюється шляхом розрахунку дисперсії відтворюваності та визначення довірчого інтервалу, з яким порівнюються абсолютні значення коефіцієнтів.

Адекватність отриманої моделі перевіряється за критерієм Фішера через розрахунок дисперсії адекватності. Рівняння регресії будується з використанням лише значимих коефіцієнтів у вигляді  $y = b_0 + \Sigma b_i x_i + \Sigma b_{ij} x_i x_j$ . Після цього проводиться аналіз впливу факторів, визначаються оптимальні умови та формулюються практичні рекомендації.

Результати експерименту документуються у вигляді протоколу, що включає графічне представлення результатів та висновки. Така методика забезпечує отримання адекватної математичної моделі процесу при значному скороченні необхідної кількості експериментів, що робить її ефективним інструментом для дослідження багатфакторних процесів.

### 2.3 Дослідження мікроструктури

Металографічний аналіз розпочинається з ретельної пробопідготовки зразків, яка включає послідовне шліфування поверхні на абразивному папері різної зернистості, починаючи від грубої і переходячи до більш тонкої. Далі проводиться механічне полірування на сукні з використанням алмазних паст різної дисперсності, завершуючи фінішним поліруванням із застосуванням оксиду хрому або оксиду алюмінію для досягнення дзеркальної поверхні. Фінальним етапом пробопідготовки є хімічне травлення для виявлення

мікроструктури, при цьому склад травника підбирається індивідуально залежно від досліджуваного матеріалу.

Безпосереднє дослідження мікроструктури проводиться на оптичному мікроскопі при збільшеннях від  $\times 100$  до  $\times 1000$  з обов'язковим фотографуванням характерних ділянок. Аналізуються основні структурні складові: розмір та форма зерен, наявність та розподіл фаз, присутність включень та дефектів, особливості границь зерен. Для більш детального вивчення тонкої структури та морфології фаз використовується скануючий електронний мікроскоп, який також дозволяє провести мікрорентгеноспектральний аналіз для визначення хімічного складу окремих структурних складових.

Важливою частиною дослідження є кількісний аналіз структури, який включає визначення об'ємної частки структурних складових, вимірювання розмірів зерен та включень з подальшою статистичною обробкою отриманих даних та побудовою гістограм розподілу структурних елементів за розмірами. Всі результати документуються у вигляді фотоатласу мікроструктур для кожного досліду з детальним описом виявлених структурних особливостей, що дозволяє провести порівняльний аналіз структур зразків різних дослідів та встановити кореляцію між параметрами експерименту та особливостями мікроструктури. На основі отриманих даних визначається вплив параметрів експерименту на формування структури, виявляються оптимальні умови для отримання бажаної мікроструктури та формулюються висновки щодо корегування технологічних параметрів.

### 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

На основі проведеного аналізу літературних джерел встановлено, що вибір температурно-часових параметрів процесу отримання композиційних матеріалів повинен базуватися на врахуванні двох протилежних вимог: забезпечення надійного з'єднання волокон з матрицею для максимального використання їх зміцнювального потенціалу та запобігання деградації властивостей волокон внаслідок інтенсивного розвитку дифузійних процесів на міжфазних границях. Це технологічне протиріччя створює складну оптимізаційну задачу, оскільки покращення одних характеристик неминуче призводить до погіршення інших.

Наприклад, для підвищення адгезійної міцності між волокнами та матрицею і формування оптимальної структури композиту необхідно збільшувати температуру та тривалість процесів формування і термічної обробки. Однак такі технологічні параметри одночасно активізують дифузійні процеси на міжфазних границях, що призводить до деградації механічних властивостей волокон та зниження загальної міцності композиту. Зниження ж температурно-часових параметрів, хоча і сприяє збереженню початкових властивостей волокон, але не забезпечує достатньої міцності з'єднання компонентів та формування бажаної структури матеріалу.

В рамках даного дослідження оцінка оптимальності технологічних режимів проводилась за комплексом критеріїв. Першим критерієм було порівняння експериментально визначених значень міцності композиційного матеріалу з теоретично розрахованими показниками, що дозволяло оцінити ступінь реалізації потенційних властивостей композиту. Другим критерієм виступав детальний аналіз структурного стану матеріалу, включаючи дослідження мікроструктури, розподілу волокон, наявності дефектів та характеру міжфазних границь. Третім важливим критерієм була оцінка

міцності адгезійного зв'язку між волокнами та матрицею, яка визначала ефективність передачі навантаження від матриці до волокон.

Для підвищення достовірності оцінки оптимальності режимів додатково враховувались такі фактори як стабільність отримуваних властивостей при виготовленні різних партій матеріалу, економічна ефективність обраних режимів та їх технологічність в умовах промислового виробництва. Особлива увага приділялась відтворюваності результатів та впливу технологічних параметрів на довготривалу експлуатаційну надійність композиційного матеріалу.

Важливим аспектом оптимізації також є врахування специфіки конкретної системи волокно-матриця, оскільки різні комбінації матеріалів можуть мати різну чутливість до температурно-часових параметрів обробки. Це вимагає індивідуального підходу до вибору режимів для кожного типу композиційного матеріалу з урахуванням фізико-хімічних властивостей компонентів, характеру їх взаємодії та вимог до кінцевого продукту.

Запропонований комплексний підхід до оптимізації технологічних параметрів, що враховує взаємний вплив різних факторів та їх вплив на структуру і властивості композиційного матеріалу, дозволяє знайти оптимальне співвідношення між суперечливими вимогами та забезпечити високу якість кінцевого продукту при збереженні економічної доцільності його виробництва. Такий підхід також створює основу для розробки науково обґрунтованих технологічних рекомендацій щодо виробництва композиційних матеріалів з прогнозованим комплексом властивостей.

В якості матричного матеріалу для композитів, що експлуатуються при температурах до 1300°C протягом короткотривалих періодів, перспективним є використання нікелевого сплаву ЭК64. Цей сплав демонструє вищі показники жароміцності при зменшеному вмісті вольфраму порівняно з раніше застосованим сплавом ВЖ98 (характеристики сплавів наведено в таблиці 2.1).

Проте спроби використати технологічні режими, які були успішно апробовані при виготовленні композиційних матеріалів на основі матриці зі сплаву ВЖ98, виявились неефективними для отримання бездефектної структури композиту з матрицею зі сплаву ЭК64. Це зумовило необхідність проведення комплексного дослідження процесу формування композиційного матеріалу на основі матриці зі сплаву ЭК64.

Для систематичного вивчення процесу формування композиційного матеріалу системи ЭК64 – ВР273ВП було визначено ключові технологічні параметри та встановлено їх рівні й інтервали варіювання, які представлені в таблиці 3.1. Це дозволило застосувати науковий підхід до оптимізації технологічного процесу та визначення раціональних режимів отримання композиційного матеріалу з необхідними структурними характеристиками.

Таблиця 3.1 – Обрані рівні й інтервали варіювання факторів

Фактори	Інтервал варіювання	Рівні факторів		
		середній	верхній	нижній
$X_1$ – тривалість імпульсу зварювального струму, з	0,08	0,16	0,24	0,08
$X_2$ – тривалість паузи, з	0,04	0,26	0,30	0,22
$X_3$ – зусилля стиску роликів, кН	1,15	5,65	6,80	4,5
$X_4$ – величина модуляції, частки від тривалості імпульсу	0,27	0,52	0,79	0,19
$X_5$ – крок зварних швів, мм	1,00	4,00	5,00	3,00

На основі прийнятих припущень, для побудови математичної моделі було використано дробовий факторний експеримент типу 25-2. Такий план експерименту дозволив визначити коефіцієнти полінома, оцінити їх

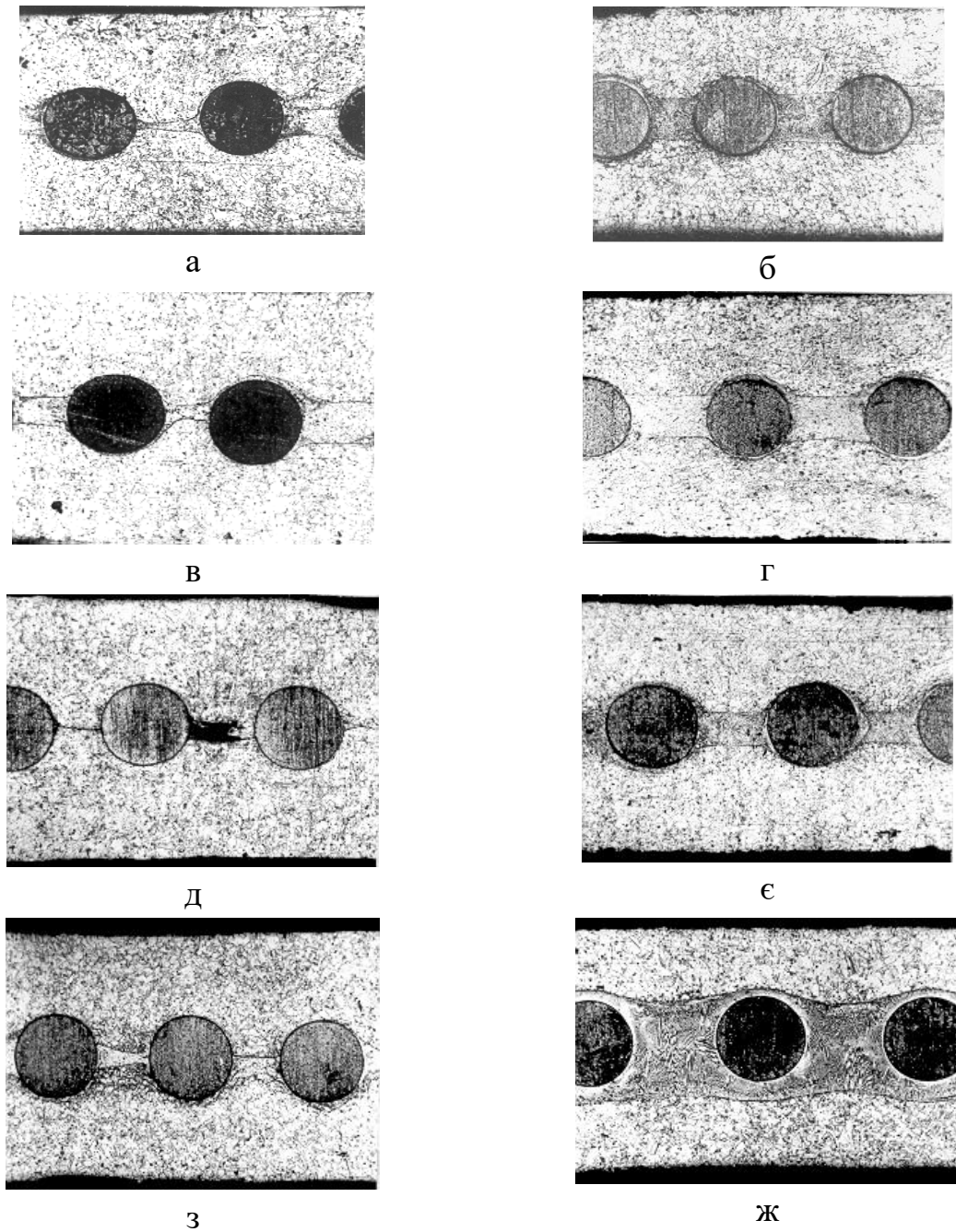
значущість та перевірити адекватність моделі при зменшеній кількості дослідів. Матриця планування експерименту наведена в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Матриця планування і результати першого експерименту

№ досліду	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	Висота про- плавленої зони h×100, мм
1	+	+	-	-	-	13.10
2	-	+	-	+	-	17.38
3	+	-	-	+	+	8.76
4	-	-	-	-	+	22.08
5	+	+	+	+	+	4.77
6	-	+	+	-	+	22.31
7	+	-	+	-	-	9.31
8	-	-	+	+	-	17.08

Аналіз мікроструктури зразків, виготовлених відповідно до умов експериментальної матриці, представлений на рисунку 3.2, виявив відсутність зони проплавлення на межі суміжних швів у зразках дослідів 5 та 7. Це змусило скоригувати методику вимірювання відгуку системи: замість початково запланованого вимірювання висоти проплавленої зони на стику швів, вимірювання проводились у центральній частині шва, де зона проплавлення спостерігалась у всіх досліджуваних зразках. При цьому було зроблено припущення, що характер зміни висоти проплавленої зони в центральній частині шва корелює зі зміною її висоти в зоні стику суміжних швів.

Отримані результати вимірювань були використані для побудови математичної моделі процесу та визначення оптимальних режимів формування композиту.



а – дослід 1; б – дослід 2; в – дослід 3; г – дослід 4; д – дослід 5; е –  
дослід 6; з – дослід 7; ж – дослід 8

Рисунок 3.2 - Мікроструктура зразків композиційного матеріалу ЭК64  
– ВР273ВП, ( $\times 70$ ).

Математична обробка експериментальних даних дозволила отримати  
рівняння регресії:

$$h = 14,1 - 5,61X_1 + 0,29X_2 - 0,73X_3 - 2,60X_4 - 0,12X_5 \quad (3.1)$$

Статистичний аналіз отриманого рівняння (3.1) виявив, що довірчий інтервал ( $b_i = 0,563$ ) перевищує значення коефіцієнтів при факторах  $X_2$  та  $X_5$  (див. таблицю 3.3), що свідчить про статистичну незначущість цих коефіцієнтів у рівнянні регресії.

Таблиця 3.3 – Результати перевірки адекватності рівняння (3.1)

Значення критерія Кохрена		Дисперсія відновлюваності $S_y^2$	Дисперсія $i$ -го коефіцієнта, $S_2(b_i)$	Довірчий інтервал, $\Delta b_i$	Дисперсія адекватності, $S_{ад}^2$	Значення критерія Фішера	
Розрахункове, $G_p$	Табличне, $G_T$					Розрахункове, $F_p$	Табличне, $F_T$
0,155	0,246	8,230	0,281	0,563	16,470	2,000	3,300

Отже, зазначені фактори не значимі, і рівняння регресії можна переписати у вигляді:

$$h = 14,1 - 5,61X_1 - 0,73X_3 - 2,60X_4. \quad (3.2)$$

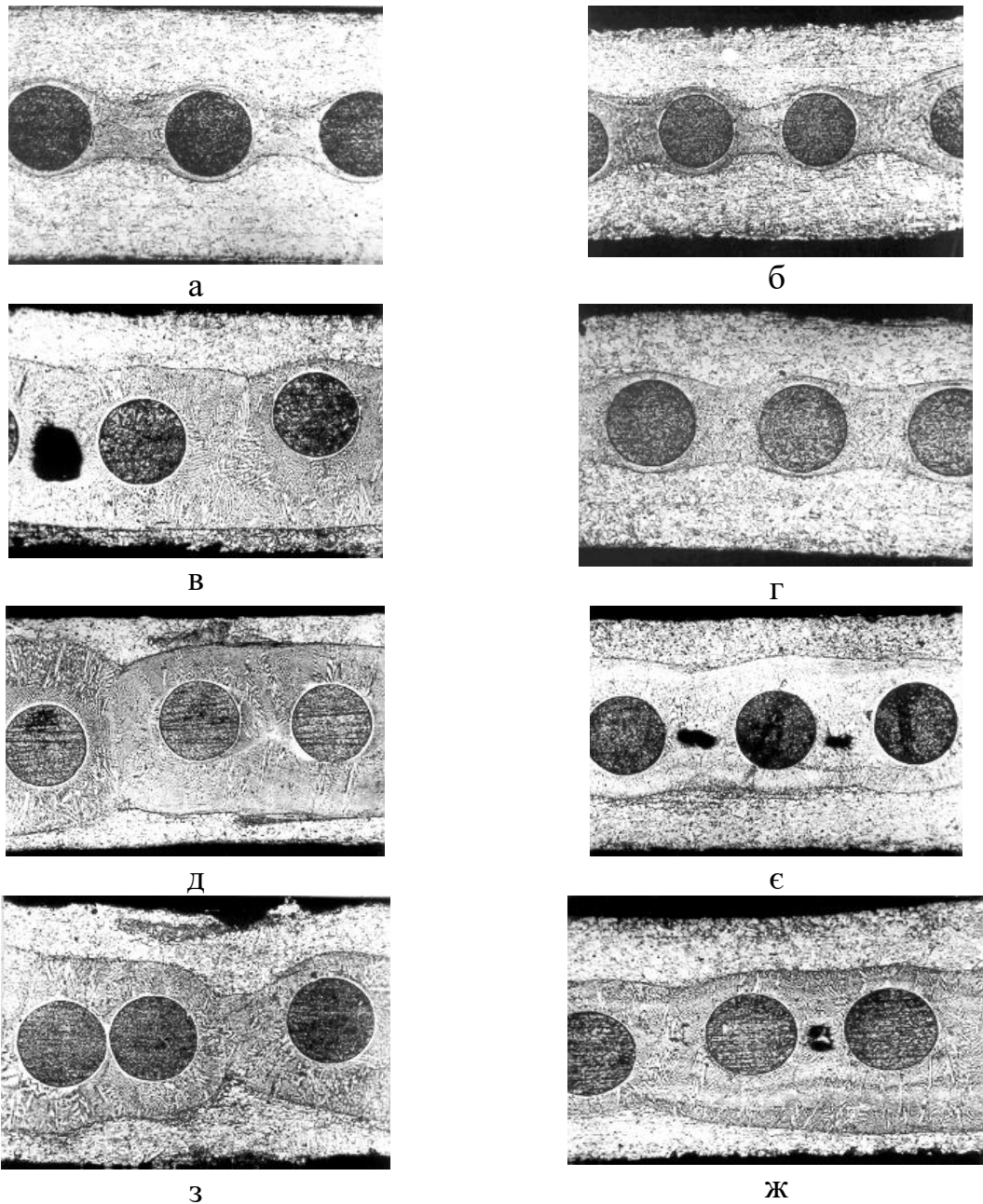
На основі статистичного аналізу встановлено, що розроблена модель є адекватною при довірчій імовірності  $P = 0,95$ , оскільки  $F_p < F_T$  (таблиця 3.3). Модель достовірно відображає вплив тривалості імпульсу ( $X_1$ ), зусилля стиску роликів ( $X_3$ ) та ступеня модуляції ( $X_4$ ) на висоту проплавленої зони. При цьому фактори тривалості паузи ( $X_2$ ) та кроку зварних швів ( $X_5$ ) виявились статистично незначущими в досліджених межах, що могло бути спричинено занадто вузькими інтервалами їх варіювання.

Аналіз рівняння (3.2) показав, що для збільшення висоти проплавленої зони необхідно зменшити значення всіх значущих факторів ( $X_1$ ,  $X_3$ ,  $X_4$ ), причому рух у цьому напрямку проходить через точку четвертого дослід. Замість традиційного руху по градієнту було прийнято рішення про проведення другого факторного експерименту. Це рішення обґрунтовується недостатньо оптимальним вибором параметра оптимізації та тим, що витрати на новий план експерименту порівнянні з витратами на досліди крутого сходження, але дають можливість отримати більший обсяг інформації. При плануванні другого експерименту центр плану встановили відповідно до умов четвертого дослід першого експерименту, виключили фактор  $X_4$  через його негативний вплив та розширили інтервали варіювання для факторів  $X_2$  і  $X_5$ . Відповідно до нових умов (таблиця 3.4) було реалізовано напіврепліку  $2^{4-1}$  (таблиця 3.5).

Таблиця 3.4 – Інтервали і рівні варіювання факторів другого експерименту

Фактори	Інтервали варіювання	Рівні факторів		
		середній	верхній	нижній
$X_1$ – тривалість імпульсу зварювального струму, с	0,02	0,08	0,10	0,06
$X_2$ – тривалість паузи, с	0,08	0,22	0,30	0,14
$X_3$ – сила стиснення роликів, кН	1,00	4,50	5,50	3,50
$X_4$ – крок зварних швів, мм	1,50	4,00	5,50	2,50

Дослідження мікроструктури зразків, виготовлених відповідно до умов кожного експерименту, представлено на рисунку 3.3.



а – дослід 1; б – дослід 2; в – дослід 3; г – дослід 4; д – дослід 5; е – дослід 6; з – дослід 7; ж – дослід 8

Рисунок 3.2 - Мікроструктура зразків другого експерименту 24-1 у зоні стиків сусідніх швів

Аналіз мікроструктури показав, що у всіх досліджуваних зразках на межі суміжних швів присутня зона проплавлення, яка охоплює армувальні волокна. Це дозволило провести вимірювання висоти проплавленої зони

безпосередньо в місцях стику сусідніх швів, результати яких наведено в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Матриця планування ( $2^{4-1}$ ) і результати другого експерименту

№ досліджу	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	Висота проплавленної зони на стику сусідніх швів, h × 100, мм
1	-	-	+	+	15,16
2	+	-	+	-	7,83
3	-	+	+	-	25,17
4	+	+	+	+	12,16
5	-	-	-	-	27,00
6	+	-	-	+	13,67
7	-	+	-	+	30,83
8	+	+	-	-	23,33

Після обробки результатів вимірів параметра оптимізації було отримано наступне рівняння регресії:

$$h = 19,39 - 5,65X_1 + 3,48X_2 - 4,31X_3 - 1,44X_4. \quad (3.3)$$

Статистична перевірка рівняння регресії (3.3), результати якої представлені в таблиці 3.6, підтвердила його адекватність для опису процесу формування композиційного матеріалу ЭК64 – ВР273ВП.

Теоретично, регулюючи параметри процесу відповідно до знаків та величин коефіцієнтів рівняння (3.3), можна досягти збільшення висоти проплавленої зони на ділянках перекриття сусідніх швів. Проте, враховуючи що більшість зразків другого експерименту характеризувалися наявністю суцільної проплавленої зони навколо волокон (рисунок 3.3), було вирішено проводити зварювання заготовок за режимами, що відповідають центральним значенням параметрів.

Таблиця 3.6 – Результати перевірки рівняння регресії (3.3)

Значення критерія Кохрена		Дисперсія відновлюваності, $S_y^2$	Дисперсія $i$ -го коефіцієнта, $S_2(b_i)$	Довірчий інтервал, $\Delta b_i$	Дисперсія адекватності, $S_{ад}^2$	Значення критерія Фішера	
Розрахункове, $G_p$	Табличне, $G_T$					Розрахункове, $F_p$	Табличне, $F_T$
0.271	0.359	16.620	0.346	1.190	4.0307	0.259	9.000

За результатами досліджень було вирішено використовувати режими зварювання, що відповідають центру плану, а розроблену модель застосувати для встановлення допустимих меж відхилення технологічних параметрів. Для виготовлення композиційного матеріалу на основі сплаву ЭК64, армованого одним шаром волокон ВР273ВП, були визначені наступні оптимальні технологічні параметри з відповідними допусками:

тривалість імпульсу зварювального струму:  $0,08 \pm 0,003$  с

тривалість паузи:  $0,22 \pm 0,005$  с

зусилля стиску електродів:  $4,5 \pm 0,3$  кН

крок зварних швів:  $4,0 \pm 0,25$  мм

Для підтвердження ефективності встановлених параметрів були виготовлені контрольні зразки. Аналіз їх мікроструктури (рисунок 3.4) показав, що в зоні перекриття сусідніх швів формується суцільна лита зона,

яка повністю охоплює армувальні волокна. Це підтверджує, що визначений режим формування композиційного матеріалу забезпечує отримання якісної бездефектної структури з необхідними характеристиками.

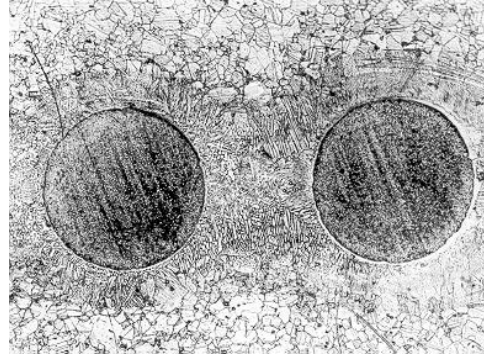


Рисунок 3.4 - Мікроструктура композиційного зразка з матрицею зі сплаву ЭК64 звареного по встановленому режимі, ( $\times 200$ )

У результаті проведеного дослідження, що включало два етапи факторного експерименту, було:

Визначено значущі фактори, що впливають на формування композиційного матеріалу

Розроблено адекватну математичну модель процесу

Встановлено оптимальні технологічні параметри з допустимими межами відхилень

Експериментально підтверджено ефективність обраних режимів

Отримані результати дозволяють забезпечити стабільне виготовлення композиційного матеріалу ЭК64 – ВР273ВП з бездефектною структурою, де зона проплавлення повністю охоплює армувальні волокна на стиках суміжних швів. Визначені допуски на технологічні параметри гарантують відтворюваність процесу та якість кінцевого продукту в промислових умовах.

Розроблена методика та отримані результати можуть бути використані як основа для подальшої оптимізації технології виготовлення подібних композиційних матеріалів та для розширення номенклатури матеріалів, що обробляються за даною технологією.

В рамках дослідження проводились випробування на розтяг зразків композиту, в яких волокна були розташовані перпендикулярно до осі навантаження. Таке розміщення волокон було обрано для можливості порівняння міцності самої матриці та міцності зчеплення волокон з матрицею. При випробуваннях характер руйнування зразків був індикатором співвідношення міцності компонентів - якщо зразок руйнувався через відшарування матриці від волокон, це свідчило про нижчу міцність з'єднання порівняно з міцністю матричного матеріалу. Натомість руйнування безпосередньо по матриці вказувало на вищу міцність з'єднання компонентів. Такий результат можливий завдяки частковому розчиненню волокон у матриці під час формування композиту, що призводить до зміцнення приграничного шару за механізмом твердого розчину.

Для контролю структури та товщини шару матриці, що безпосередньо контактує з волокнами, використовували регулювання амплітуди імпульсу зварювання. Максимально допустиму амплітуду визначали шляхом її поступового підвищення до моменту появи виплесків на поверхні композиту, після чого знижували до рівня, що гарантував відсутність дефектів. При формуванні наступних зразків послідовно зменшували амплітуду зварювального імпульсу, отримуючи таким чином серію зразків з різною характерною мікроструктурою. Отримані дані щодо випробувань зразків композиту на розтяг представлені в таблиці 3.7. Для порівняльного аналізу в таблиці 3.8 подано показники міцності матричного матеріалу - листів сплаву товщиною 0,4 мм.

Такий порівняльний аналіз дозволяє оцінити ефективність армування та вплив технологічних параметрів виготовлення на кінцеві властивості композиційного матеріалу. Зіставлення даних з обох таблиць дає можливість кількісно визначити ступінь зміцнення матричного матеріалу в результаті армування та оптимізувати параметри технологічного процесу для досягнення найкращого поєднання властивостей компонентів у готовому композиті.

Таблиця 3.6 – Взаємозв'язок між структурними характеристиками зони з'єднання матриці з армувальними волокнами та механічними властивостями композиту, зокрема границею міцності ( $\sigma_B$ ) і відносним подовженням ( $\delta_5$ )

№ дослідів	Температура випробування 20°C		Температура випробування 1300°C	
	$\sigma_B$ , МПа	$\delta_5$ , %	$\sigma_B$ , МПа	$\delta_5$ , %
1	360	1,0	11,2	1,1
2	388	1,2	15,2	1,1
3	394	1,3	17,4	1,4
4	402	1,6	23,1	2,1
5	450	2,8	35,6	6,5
6	406	2,2	31,5	4,6

При аналізі характеру руйнування виявлено, що в зразках дослідів 1-4 руйнування відбувалось вздовж межі поділу волокно-матриця, тоді як у зразках дослідів 5-6 злам проходив через шар матриці, який зазнав плавлення під час виготовлення композиту.

Таблиця 3.7 – Короткочасна міцність матричного сплаву

Марка сплаву	Температура випробування 20°C		Температура випробування 1300°C	
	$\sigma_B$ , МПа	$\delta_5$ , %	$\sigma_B$ , МПа	$\delta_5$ , %
ХН65ВБ	456	3,8	37,6	7,5

Дослідження експериментальних даних, наведених у таблицях 3.6 і 3.7 показує, що збільшення амплітуди зварювального імпульсу від мінімуму до рівня, застосованого у п'ятому досліді, призводить до планомірного зростання показників міцності та подовження матеріалу як при кімнатній температурі (20°C), так і при підвищеній (1300°C). Подальше збільшення амплітуди призводить до зниження цих характеристик.

Це явище можна пояснити тим, що поступове підвищення амплітуди зварювального імпульсу спричиняє збільшення товщини розплавленого шару навколо волокон під час формування, що сприяє ефективнішому видаленню оксидних плівок з поверхонь компонентів. Це забезпечує безпосередній контакт атомів волокон і матриці, викликаючи часткове взаємне розчинення компонентів та посилення міцності їх з'єднання.

Зниження механічних властивостей у шостому досліді можна пояснити значною часткою (близько 80%) литої структури в матриці, яка має нижчі характеристики порівняно з пластично деформованою структурою.

Варто зазначити, що зразки композиту з найвищими механічними властивостями (п'ятий дослід) дещо поступаються властивостям чистої матриці, що є логічним, оскільки структура матричного сплаву не містить литих включень, на відміну від композиту.

На основі проведених досліджень можна зробити висновок, що оптимальна структура композиту даної системи складається з трьох компонентів: армувальних волокон, розплавленого при формуванні шару матриці, що повністю охоплює волокна, та основного об'єму матриці з початковою структурою сплаву.

## 4 ЕКОНОМІКО-ОРГАНІЗАЦІЙНА ЧАСТИНА

### 4.1 Актуальність теми з позиції маркетингу

Актуальність дослідження формування металевого композиційного матеріалу для виробництва соплових подовжувачів з позиції маркетингу обумовлена декількома важливими факторами сучасного ринку та технологічного розвитку. Ракетно-космічна галузь демонструє стабільне зростання попиту на високоякісні соплові подовжувачі, що здатні працювати в екстремальних умовах, зберігаючи при цьому свої експлуатаційні характеристики.

Розробка нових металевих композиційних матеріалів відкриває можливості для створення виробів з покращеними властивостями при потенційному зниженні собівартості виробництва. Це особливо важливо в умовах жорсткої конкуренції на міжнародному ринку та постійного прагнення до оптимізації витрат. Використання композиційних матеріалів дозволяє досягти унікального поєднання характеристик, таких як висока міцність при зниженій вазі конструкції, що є критично важливим для космічної галузі.

З економічної точки зору, впровадження нових технологій формування металевих композиційних матеріалів може забезпечити значне зменшення виробничих витрат за рахунок оптимізації використання дорогих компонентів та подовження терміну служби готових виробів. Крім того, розроблена технологія має потенціал для масштабування та адаптації в інших галузях промисловості, що розширює її комерційні перспективи.

Важливим аспектом є також експортний потенціал розробки. Створення конкурентоспроможної технології виробництва соплових подовжувачів з використанням передових композиційних матеріалів відкриває можливості для виходу на міжнародні ринки та сприяє процесу імпортозаміщення. Це особливо актуально в умовах глобальної тенденції до локалізації виробництва критично важливих компонентів.

Отже, дослідження формування металевих композиційних матеріалів для соплових подовжувачів є перспективним напрямком як з технологічної, так і з маркетингової точки зору, що має значний потенціал для комерціалізації та впровадження у виробництво.

## 4.2 Послідовний аналіз

Аналіз напрямків застосування та вигод для споживачів, представлений у таблиці 4.1, дає комплексне уявлення про можливості використання розроблених металевих композиційних матеріалів для виготовлення соплових подовжувачів. Цей аналіз дозволяє визначити ключові галузі, де вироби з покращеними характеристиками можуть бути найбільш ефективними, а також ідентифікувати переваги, які отримують споживачі, обираючи продукцію з оптимізованими експлуатаційними параметрами.

Результати дослідження демонструють, що застосування таких композиційних матеріалів забезпечує значне підвищення термостійкості, міцності та довговічності соплових подовжувачів, що особливо актуально для ракетно-космічної галузі, де потрібні надійні матеріали, здатні витримувати екстремальні умови експлуатації. Для споживачів це означає підвищення надійності ракетних двигунів, збільшення терміну служби компонентів та зниження ризиків відмов під час експлуатації.

Додатково аналіз підтверджує економічну вигоду від використання оптимізованих процесів формування металевих композиційних матеріалів, які дозволяють отримувати соплові подовжувачі з високими експлуатаційними характеристиками за конкурентоспроможною ціною, що також є суттєвим аргументом на користь впровадження таких технологій у виробництво космічної техніки.

Таблиця 4.1 – Опис ідеї

Вміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для споживачів (користувачів)
Розробка технології виробництва соплових подовжувачів з металевих композиційного матеріалу з покращеними експлуатаційними характеристиками	1. Ракетно-космічна галузь (виробництво ракетних двигунів) 2. Військово-промисловий комплекс 3. Аерокосмічна промисловість	Покращення надійності роботи. Зниження експлуатаційних витрат. Економічна ефективність.

Аналіз характеристик потенційного ринку, представлений у таблиці 4.2, забезпечує глибоке розуміння особливостей і перспектив для технологій виробництва соплових подовжувачів з металевих композиційних матеріалів. Такий аналіз дозволяє ідентифікувати ключові параметри ринку, включаючи обсяги попиту на продукцію з покращеними характеристиками, динаміку зростання космічної галузі, провідних виробників і конкурентне середовище.

Ринок соплових подовжувачів з композиційних матеріалів демонструє стабільне зростання, обумовлене збільшенням кількості космічних запусків та розвитком приватних космічних компаній. У цьому контексті високо термостійкі соплові подовжувачі користуються високим попитом завдяки здатності витримувати екстремальні температури та механічні навантаження. Основними споживачами є підприємства ракетно-космічної галузі, виробники ракетних двигунів та компанії аерокосмічного сектору, які прагнуть

підвищити надійність та ефективність своєї продукції, одночасно оптимізуючи витрати на виробництво та експлуатацію.

Таблиця 4.2 – Попередня характеристика потенційного ринку

Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
Головні конкуренти	SpaceX (США), Blue Origin (США), Aerojet Rocketdyne (США), НВО "Енергомаш" (РФ), Yuzhnoye Design Bureau (Україна), ArianeGroup (ЄС), Mitsubishi Heavy Industries (Японія)
Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростаючий попит, обумовлений збільшенням кількості космічних запусків та розвитком приватної космонавтики. Очікується подальше розширення ринку через зростання комерційного космічного сектору
Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Високі витрати на дослідження та розробку, необхідність сертифікації продукції.
Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Дотримання стандартів ISO, ASTM для металургійної продукції, необхідність отримання сертифікатів якості в Україні та за кордоном.

Аналіз потенційних груп клієнтів, їхніх характеристик і формування переліку вимог до продукції, як показано в таблиці 4.3, є важливим етапом у розробці стратегії продажів і маркетингової політики для просування соплових подовжувачів з металевих композиційних матеріалів. Такий підхід дозволяє чітко ідентифікувати потреби різних сегментів космічної галузі,

зрозуміти їх специфічні вимоги та забезпечити відповідність продукту цим високотехнологічним запитам.

Таблиця 4.3 – Попередня характеристика потенційних клієнтів

Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів (користувачів)
<p>Потреба у високонадійних соплових подовжувачах з покращеними експлуатаційним и характеристикам и, здатних витримувати екстремальні температури та механічні навантаження при зменшеній масі конструкції</p>	<p>Державні космічні агентства (NASA, ESA, ISRO) Приватні космічні компанії (SpaceX, Blue Origin) Виробники ракетних двигунів Оборонні підприємства та військово-промисловий комплекс</p>	<p>Державні космічні агентства: пріоритет надійності та безпеки, готовність до довгострокових контрактів Виробники ракетних двигунів: специфічні технічні вимоги, стабільність характеристик Оборонні підприємства: високі вимоги до надійності та секретності.</p>	<p>Висока термостійкість та жароміцність Оптимальне співвідношення маси та міцності Відповідність міжнародним стандартам якості Надійність в екстремальних умовах експлуатації Тривалий термін служби Конкурентоспроможна ціна</p>

SWOT-аналіз проекту з розробки соплових подовжувачів з металевого композиційного матеріалу дозволяє оцінити сильні сторони (інноваційність технології, високі характеристики матеріалу) та слабкі місця (вартість розробки, складність випробувань). Такий аналіз допомагає команді максимально використати можливості зростаючого космічного ринку та підготуватися до потенційних викликів галузі, забезпечуючи конкурентоспроможність проекту.

Таблиця 4.4 – SWOT- аналіз

Сильні сторони:	Слабкі сторони:
Унікальна технологія виробництва композиційних матеріалів. Висока жароміцність та термостійкість продукції. Зменшена маса при збереженні міцнісних характеристик. Підвищена довговічність соплових подовжувачів. Наявність наукового потенціалу та експертизи в галузі	Висока вартість розробки та тестування. Потреба у дорогому спеціалізованому обладнанні. Тривалий цикл розробки та сертифікації. Обмежені виробничі потужності на початковому етапі.
Можливості:	Загрози:
Зростання ринку комерційних космічних запусків. Збільшення попиту на ефективні ракетні двигуни. Можливість отримання грантів та державного фінансування. Потенціал міжнародної співпраці в космічній галузі	Жорстка конкуренція з боку великих аерокосмічних компаній. Геополітичні ризики та обмеження на експорт технологій. Можливі зміни в регуляторних вимогах космічної галузі. Економічна нестабільність та коливання курсів валют

Перший етап формування ринкової стратегії для соплових подовжувачів з металевого композиційного матеріалу полягає у визначенні та описі

основних груп потенційних замовників. Цей аналіз є критичним для розуміння специфічних вимог кожного сегменту аерокосмічного ринку та адаптації нашої технологічної пропозиції до їхніх потреб.

Таблиця 4.5 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
Державні космічні агентства	Висока при підтвердженні надійності та відповідності стандартам	15-20 комплектів/рік	Помірна через обмежену кількість постачальників	Складна через високі вимоги до сертифікації
Приватні космічні компанії	Висока при демонстрації економічної ефективності	30-40 комплектів/рік	Висока в сегменті комерційних запусків	Середня, залежить від репутації та досвіду
Виробники ракетних двигунів	Середня, потребує тривалих випробувань	25-30 комплектів/рік	Помірна через специфічність продукту	Складна через технологічні бар'єри
Оборонні підприємства	Висока при відповідності військовим стандартам	10-15 комплектів/рік	Низька через специфічні вимоги	Дуже складна через режимні обмеження

На основі проведеного аналізу зацікавлених сторін було розроблено Карту стейкхолдерів для проекту з виробництва соплових подовжувачів з металевого композиційного матеріалу. Карта складається з трьох концентричних зон, що відображають рівень впливу та взаємодії учасників.

У центральній зоні розміщені ключові стейкхолдери: розробники композиційних матеріалів, технологи виробництва та інвестори. Ці учасники мають найбільший вплив на успіх проекту та безпосередньо взаємодіють з командою розробників.

Зовнішні зони включають постачальників сировини, потенційних замовників (космічні агентства та приватні компанії), сертифікаційні органи та конкурентів. Таке структурування допомагає ефективно планувати комунікації та управляти ризиками при реалізації проекту.

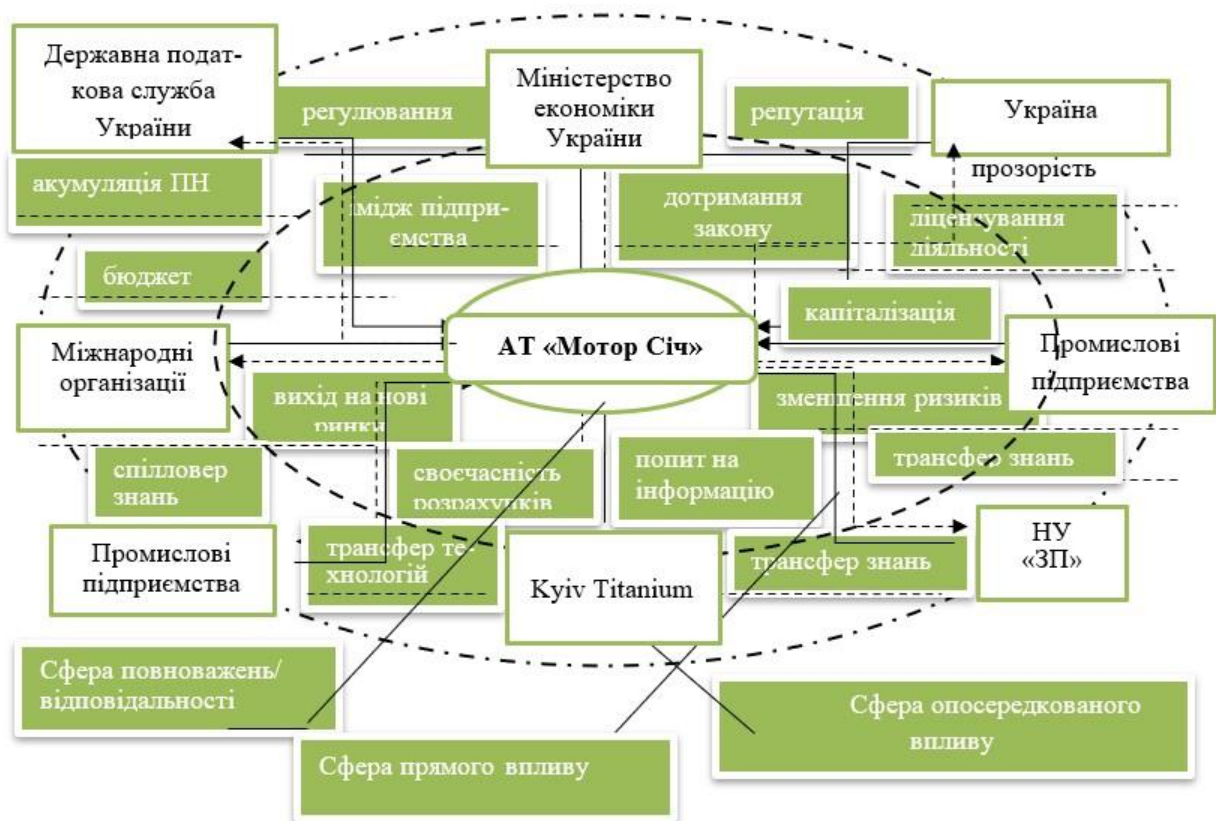


Рисунок 4.1 – Карта стейкхолдерів

Для проекту з розробки соплових подовжувачів було розраховано витрати на оплату праці з урахуванням специфіки роботи кожного спеціаліста. Плановий фонд включає базову заробітну плату, соціальні виплати та страхування для всіх учасників проекту - від інженерів-конструкторів до технологів виробництва.

Такий детальний розподіл трудових ресурсів та пов'язаних витрат забезпечує:

- оптимальне використання робочого часу команди;
- точне фінансове планування проекту;
- ефективний контроль бюджету на кожному етапі розробки.

Таблиця 4.6 – Склад, чисельність та фонд заробітної плати

Посада	Кількість осіб	Посадовий оклад, грн	Преміальний	Сума премій, грн	Місячна заробітна плага	Річний фонд оплати праці, грн	ЄСВ, грн
Науковий керівник	1	22000	20	4400	26400	316800	69696
Старший науковий співробітник	2	18000	20	3600	21600	518400	114048
Молодший науковий співробітник	2	15000	20	3000	18000	432000	95040
Лаборант	2	12000	20	2400	14400	345600	76032
Разом	7	67000	-	13400	80400	1612800	354816

Було визначено необхідні матеріальні витрати для проведення науково-дослідної роботи. Розрахунок включає кошти на закупівлю всіх необхідних

матеріалів, які використовуватимуться як для проведення досліджень, так і для створення експериментальних зразків. Детальний перелік та вартість матеріалів наведено в таблиці 4.7.

Таблиця 4.7 – Розрахунок матеріальних витрат

Матеріальні витрати	Виробнича програма	Обсяг сировини	Ціна за одиницю, грн	Сума, грн
Канцелярські товари	-	-	-	2400
- Папір А4	—	5 пачок	160	800
- Ручки	—	25 шт	20	500
- Олівці	—	20 шт	15	300
- Папки-реєстратори	—	8 шт	100	800
Лабораторні матеріали	-	-	-	31100
- Зразки КМ	—	150 шт	95	14250
- Реактиви для травлення	—	15 л	950	14250
- Змінні лінзи для мікроскопа	—	2 шт	3500	7000
Допоміжні матеріали	-	-	-	2300
- Тара для зразків	—	20 шт	65	1300
- Захисні рукавички	—	200 пар	5	1000
Разом				35800

В ході аналізу було визначено витрати на комунальні та інші послуги, необхідні для проведення досліджень. Калькуляція включає оплату

електроенергії, води та інших комунальних послуг, які використовуються під час виконання науково-дослідної роботи. Детальна розбивка витрат представлена в таблиці 4.8.

Таблиця 4.8 – Розрахунок вартості спожитих послуг

Вид послуг	Виробнича програма, одиниць	Обсяг послуг	Тарифи	Сума, грн
Електропостачання	–	750 кВт×год	4.85 грн/кВт×год	3637.50
Водопостачання	–	8 м <sup>3</sup>	32.5 грн/м <sup>3</sup>	260.00
Теплопостачання	–	2.5 Гкал	4200 грн/Гкал	10500.00
Охоронна система	–	2 міс	1800 грн/міс	3600.00
Разом				18897.50

Амортизація відображає поступове знецінення основних засобів та необоротних активів за час їх експлуатації. Це економічний механізм, що враховує природне зношення обладнання, його технологічне старіння та зменшення функціональної цінності з часом. Впровадження амортизаційних розрахунків має подвійну мету: з одного боку, це дозволяє точно оцінювати реальну вартість наявних активів, а з іншого - створює фінансовий резерв через оптимізацію оподаткування та накопичення коштів для майбутньої модернізації виробничої бази підприємства.

Важливо розуміти, що амортизація є не лише бухгалтерським інструментом, але й важливим елементом фінансового планування та контролю. Вона допомагає рівномірно розподілити витрати на придбання активів протягом усього періоду їх використання, забезпечує формування спеціального фонду для оновлення основних засобів та безпосередньо впливає

на собівартість продукції та послуг. Крім того, правильно розрахована амортизація дозволяє оптимізувати податкове навантаження та сприяє об'єктивній оцінці фінансового стану підприємства.

Таблиця 4.9 – Розрахунок амортизації

Група основних засобів	Кіл-ть	Первісна вартість ОЗ	Вартість обл-ня	Річні амортиз. Відрах.	Витрати на поточний ремонт у розмірі 2%
Металографічний мікроскоп	1	115,000	14	16,100	2,300
Електронний мікроскоп	1	1,450,000	14	203,000	29,000
Аналізатор металів та сплавів	1	980,000	14	137,200	19,600
Комп'ютер	4	120,000	14	16,800	2,400
Принтер	2	18,000	14	2,520	360
Разом	9	2,683,000	-	375,620	53,660

Складання кошторису витрат на науково-дослідницьку роботу здійснюється на підставі зведених даних попередніх розрахунків і є ключовим етапом фінансового планування проекту. Цей документ забезпечує детальну оцінку всіх необхідних фінансових ресурсів, враховуючи витрати на матеріально-технічне забезпечення, оплату праці персоналу, використання обладнання та проведення досліджень.

Кошторис виступає не лише як інструмент обліку витрат, але й як засіб стратегічного планування, що дозволяє оптимально розподілити наявні

ресурси та передбачити потенційні фінансові потреби проекту. Це дає можливість завчасно визначити необхідні джерела фінансування та забезпечити безперервність дослідницького процесу.

Грамотно складений кошторис є запорукою фінансової стабільності проекту, дозволяючи уникнути непередбачених витрат та забезпечити ефективне використання коштів для досягнення поставлених дослідницьких цілей. Він також служить основою для моніторингу фактичних витрат та їх відповідності запланованому бюджету.

Таблиця 4.10 – Кошторис витрат

Калькуляційні статті	Витрати
Фонд заробітної плати	375,620
ЄСВ (22%)	82,636
Матеріальні витрати	53,660
Вартість спожитих послуг	15,000
Амортизація обладнання	375,620
Поточний ремонт	53,660
Виробнича собівартість	956,196
Адміністративні витрати (30%)	286,859
Повна собівартість	1,243,055

Розрахунки:

$$\text{ЄСВ: } 375,620 \times 0.22 = 82,636$$

Виробнича собівартість: сума всіх попередніх витрат

$$\text{Адміністративні витрати: } 956,196 \times 0.30 = 286,859$$

$$\text{Повна собівартість: } 956,196 + 286,859 = 1,243,055$$

## 4.3 Розрахунок економічного ефекту при впровадженні результатів НДР

Розрахунок собівартості розроблених композиційних матеріалів (табл. 4.11). Цей комплекс досліджень спрямований на оптимізацію складу та технології виробництва соплових подовжувачів, що забезпечить необхідний рівень експлуатаційних характеристик при раціональних економічних витратах на їх виготовлення.

Таблиця 4.11 - Собівартість композиційного матеріалу ЭК64 – ВР273ВП

Елемент	Ціна, грн/кг	Традиційний сплав Вміст, %	Ціна за кг, грн	Розроблений ЭК64 – ВР273ВП Вміст, %	Ціна за кг, грн
Ni	178	Основа	106.8	Основа (60)	106.8
Co	850	14.5	123.25	15	127.5
Cr	240	12	28.8	16	38.4
W	1300	10	130	4	52
Mo	1300	5	65	4	52
Al	240	3	7.2	4	9.6
Ti	460	-	-	3	13.8
Разом		100	461.05	100	400.1

Розрахуємо собівартість для нашого композиційного матеріалу ЭК64 – ВР273ВП:

$$C_1 (\text{традиційний сплав}) = 461.05 \times 1000 = 461,050 \text{ грн/т}$$

$$C_2 (\text{розроблений ЭК64 – ВР273ВП}) = 400.1 \times 1000 = 400,100 \text{ грн/т}$$

Тобто маємо:

собівартість однієї тони ( $C_1$ ) традиційного нікелевого сплаву:  $C_1 = 461,050 \text{ грн/т}$ ;

собівартість однієї тони ( $C_2$ ) розробленого сплаву ЭК64 – ВР273ВП становить  $C_2 = 400,100$  грн/т.

Як бачимо, розроблений сплав має меншу собівартість на 60,950 грн/т при збереженні необхідних експлуатаційних характеристик.

Розрахуємо економічний ефект для нашого композиційного матеріалу ЭК64 – ВР273ВП:

$$\Delta C = (C_1 - C_2) / C_1 \quad (4.1)$$

$$\Delta C = (461,050 - 400,100) / 461,050 = 0,13 = 13\%$$

Таким чином, орієнтовне зменшення собівартості деталей з розробленого композиційного матеріалу відносно традиційного нікелевого сплаву становить 13%.

Річна потреба виробництва у соплових подовжувачах складає 3000 деталей на рік, що складається з:

1000 деталей вагою 2-3 кг

1500 деталей вагою 1-2 кг

500 деталей вагою 0,5-1 кг

Розрахуємо необхідну кількість сплаву за формулою (4.2):

$$A = n_1 \times m_1 + n_2 \times m_2 + n_3 \times m_3 \quad (4.2)$$

Де  $n_i$  – кількість деталей у річному замовленні відповідного типу;

$m_i$  – середня маса деталі відповідного типу.

Річна потреба виробництва:

$$A = 1000 \times 2.5 + 1500 \times 1.5 + 500 \times 0.75 = 5125 \text{ кг} = 5.125 \text{ т}$$

Розрахуємо мінімальну ціну товару без врахування податку за формулою (4.3):

$$\text{Ц} = (\text{C}_{\text{ндр}} + \text{C}_2 \times \text{A} + \text{P} + \text{H}) / \text{A} \quad (4.3)$$

де Ц – ціна товару;

$\text{C}_{\text{ндр}}$  – собівартість НДР (приймаємо 1500000 грн);

$\text{C}_2$  – собівартість розробленого сплаву, 400.1 грн/кг;

P – витрати на реалізацію товару, 20% від собівартості;

H – накладні витрати, 10% від собівартості;

A – обсяг замовлення, кг.

$$\text{Ц} = (1500000 + 400.1 \times 5125 + 410102.5 + 205051.25) / 5125 = 692.8 \text{ грн/кг}$$

При річному замовленні 5.125 т, прибуток за 5 років для традиційного сплаву складає (4.4):

$$\text{П}_{\text{чм}} = \text{Ц}_{\text{чм}} \times (\text{A}_{\text{чм}} \times 5) - \text{C}_1 \times (\text{A}_{\text{чм}} \times 5) - \text{P}_{\text{чм}} - \text{H}_{\text{чм}} \quad (4.4)$$

де  $\text{Ц}_{\text{чм}}$  – ціна виробів (750 грн/кг);

$\text{C}_1$  – собівартість традиційного сплаву (461.05 грн/кг);

$\text{P}_{\text{чм}}$  – витрати на реалізацію;

$\text{H}_{\text{чм}}$  – накладні витрати;

$\text{A}_{\text{чм}}$  – обсяг замовлення.

$$\text{П}_{\text{чм}} = 750 \times (5125 \times 5) - 461.05 \times (5125 \times 5) - 2361162.5 - 1180581.25 = 3706256.25 \text{ грн}$$

Прибуток при впровадженні нового композиційного матеріалу за 5 років:

$$\text{П} = 692.8 \times (5125 \times 5) - 400.1 \times (5125 \times 5) - 2050512.5 - 1025256.25 = 4923231.25 \text{ грн}$$

Економічний ефект від впровадження нового композиційного матеріалу:

$$E_k = П - П_{чм} = 4923231.25 - 3706256.25 = 1216975 \text{ грн}$$

Таким чином, при впровадженні розробленого композиційного матеріалу ЭК64 – ВР273ВП можна отримати економічний ефект 1216975 грн за 5 років при збереженні необхідних експлуатаційних характеристик соплових подовжувачів.

В результаті техніко-економічного аналізу встановлено:

Розроблений композиційний матеріал ЭК64 – ВР273ВП має меншу собівартість виготовлення (400,100 грн/т) порівняно з традиційним нікелевим сплавом (461,050 грн/т), що забезпечує зниження витрат на 13%.

При річному обсязі виробництва 5,125 т соплових подовжувачів та розрахованій ціні 692,8 грн/кг, впровадження нового композиційного матеріалу дозволяє отримати прибуток 4,923 млн грн за 5 років.

Економічний ефект від впровадження розробленого композиційного матеріалу складає 1,217 млн грн за 5 років при збереженні всіх необхідних експлуатаційних характеристик соплових подовжувачів.

Таким чином, розроблений композиційний матеріал є економічно доцільним для промислового впровадження у виробництво соплових подовжувачів.

## 5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

В розділі розглядаються заходи із охорони праці та безпеки у надзвичайних ситуаціях при дослідженні композиційних матеріалів для соплових подовжувачів.

### 5.1 Аналіз потенційних небезпек

Небезпеки які пов'язані з порушеннями роботодавцями вимог НПАОП 0.00 – 7.11 – 12 «Загальні вимоги стосовно забезпечення роботодавцями охорони праці працівників» [28], а саме:

а) небезпеки які пов'язані, з порушенням вимог ергономіки стосовно, організації робочих місць дослідників в приміщенні дослідницької лабораторії, зокрема невідповідності розмірів робочих зон, а також максимально можливої кількості осіб, що можуть там перебувати, нераціонального розташування дослідницького приладдя та офісного обладнання;

б) можливість ураження електричним струмом, при виконанні службових обов'язків внаслідок порушення правил з електробезпеки, несправності енергоспоживаючого обладнання, відсутності групових або індивідуальних засобів захисту, що може призвести до електричних травм або летального наслідку;

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

г) можливість отримання механічних травм при підготовці зразків або дослідницьких виробів до термічної обробки що може бути пов'язано з порушеннями правил охорони праці під час роботи з абразивним інструментом зокрема: використання абразивного інструменту який не пройшов випробування, порушення правил експлуатації, що може призвести до тяжких травм;

д) небезпеки які пов'язані з дослідженням структури металу методом електронної металографії з використанням електронних мікроскопів зокрема: негативний вплив потужного електронного випромінювання на клітинному рівні, що може призвести до зниження імунітету та розвитку імунних захворювань;

е) незадовільні параметри мікроклімату які повинні відповідати фізіологічним потребам організму працюючих, із врахуванням енергетичних витрат на виконувану роботу внаслідок неефективної роботи систем опалення та повітрообміну, що може призвести до загальних захворювань;

є) невідповідність вимогам освітлення робочих зон дослідницької лабораторії внаслідок виходу з ладу освітлювальних приладів або хибного розрахунку їх кількості та потужності, що може призвести до погіршення зору;

ж) можливість загоряння внаслідок порушень правил пожежної безпеки, а саме хибне визначення видів та кількості первинних засобів пожежогашіння відносно категорій приміщень с пожежної безпеки, що може привести до пожежі;

з) невиконання інженерно-технічні заходи цивільної оборони, що забезпечують тривалу роботу цеху у військовий час [29].

## 5.2 Заходи забезпечення безпеки

а) конструкція робочого місця дослідника має відповідати сучасним вимогам ергономіки і забезпечувати оптимальне розміщення на робочій поверхні пристроїв і документів, які необхідні для виконання досліджень. Висота робочої поверхні робочого столу ВДТ має регулюватися в межах 680...800мм, а ширина і глибина –забезпечувати можливість виконання операцій у зоні досяжності моторного поля (рекомендовані розміри: 600...1400 мм, глибина –800...1000мм).Робочий стіл повинен мати простір для ніг заввишки не менше ніж 600 мм, завширшки не менше ніж 500 мм, завглибшки (на рівні колін) не менше ніж 450 мм, на рівні простягнутої ноги - ніж 650 мм.

б) до основних заходів захисту людини від ураження електричним струмом, відносять:

- забезпечення неможливості випадкового дотику до струмоведучих частин, що перебувають під напругою;
- електричний розподіл мережі;
- усунення небезпеки ураження з появою напруги на корпусах, кожухах та інших частинах електроустаткування, що досягається захисним заземленням, зануленням і захисним відключенням;
- використання малих напруг;
- захист від випадкового дотику до струмоведучих частин кожухами, огороженням або подвійною ізоляцією;
- захист від небезпек можливих при переході напруги з вищої сторони на нижчу;
- контроль і профілактика пошкоджень ізоляції;
- компенсація ємнісної складової струму замикання на землю;
- застосування спеціальних електрозахисних засобів, блокувань, сигналізації та запобіжних пристроїв;
- організація безпечної експлуатації електроустановок.

Використання захисного заземлення:

– робоче заземлення – це заземлення струмоведучих частин електроустановки, яке виконане для забезпечення роботи електроустановки (не з метою електробезпечності), наприклад, робоче заземлення нейтралі трансформатора;

– заземлення блискавкозахисту – це заземлення блискавкоприймача, з метою захисту об'єкта від прямого удару блискавки;

– захисне заземлення – це заземлення, яке виконане з метою електробезпечності, тобто з'єднання відкритих провідних частин (ВПЧ) із заземлювачем для захисту від непрямого дотику та від наведеного напруги.

в) об'єкти відмінності мають як негативний (темні об'єкти на світлому фоні) так і позитивний (світлі об'єкти на темному фоні) контраст. Тому відбувається постійна переадаптація від яскравих об'єктів з позитивним контрастом на темні з негативним контрастом. За восьмигодинний робочий день за монітором користувач кидає приблизно 30000 поглядів на екран, око працює з перевантаженням і не може достатньо адаптуватися до цієї ситуації. Такі особливості призводять до напруження м'язового та світло-сприймаючого апарату очей, що є однією з причин виникнення астенопічних явищ (різь в очах, біль в очах, ломить у надбрівній ділянці, розпливчастість контурів, нечіткість зображення). Постійний погляд на матове скло екрана монітора зменшує частоту кліпання очей, що призводить до висихання та викривлення роговиці ока, погіршує зір (синдром Сікка). Робота користувача за пульсуючим екраном монітора, що не відповідає нормативним вимогам щодо обмеження пульсації (блимання), викликає дискомфорт і втому (загальну і зорову). Робота з дзеркальною відбиваючою і неплоскою зовнішньою поверхнею екрана монітора, на якій з'являються численні відбиті відблиски, призводить до виникнення у користувача астенопічних явищ та функціональних змін ока. Неправильний розподіл яскравості в полі зору, тобто поверхні периферії (стеля, стіни, меблі і т.п.) висвітлені краще ніж центр поля зору, призводить до порушення основних зорових функцій ока. Засліплююча

дія світильників у приміщенні, на робочому місці з ПК викликає не тільки астенопічні явища, але й функціональні порушення очей користувача.

Кольоровий шрифт збільшує навантаження на зір, оскільки складові кольорів мають різні довжини хвиль і видимі на різній віддалі. Око потребує точнішої адаптації, ніж при чорно-білому зображенні.

г) для уникнення механічних травм при виготовленні зразків необхідно працювати на справному станку, своєчасно проводити заміну деталей, термін експлуатації яких вже закінчився та використовувати захисні окуляри та рукавиці; для виключення травмування органів зору передбачено застосування захисних окулярів, які служать для захисту очей від ушкоджень частками твердих тіл, що летять попереду, знизу і збоку. Ці окуляри оснащені фігурними боковинами, що відкидаються. Застосовувати прозорий екран для захисту очей робітника від поранень частками, що відлітають.

д) об'єктиви-ахромати мають корекцію тільки для середніх кольорів видимої частини спектра, з цієї причини при білому світлі вони дають зображення з не чіткими контурами ,пофарбованими головним чином по краю поля зору . Щоб погасити всі кольори ,в яких об'єкт не має корекції ,застосовують жовто-зелений світлофільтр .З огляду на те,що об'єктиви-апохромати мають корекцію майже для всіх кольорів видимої частини спектра ,жовто-зелені світлофільтри для них зайві.

Для електронного мікроскопа «Tesla BS 540» можливі 3 варіанти аварійної ситуації:

- відключення електроживлення;
- відключення води;
- прорив повітря в вакуумну систему.

У таких ситуаціях першочерговим завданням вважається охолодження печі дифузійного насоса і, по можливості, збереження вакууму в системі. У всіх випадках слід спочатку відключити високу напругу, піч диф.насоса і вимкнути головний автомат на стінці. При відмові водопостачанняпостаратися обмотати мокрими ганчірками піч диф. насоса і

включити вентилятор для обдування. Гарячі мокрі ганчірки слід міняти, поки вакуум в системі не почне падати. після охолодження приступити до усунення несправності. При прориві повітря в колону мікроскопа, як правило, спрацьовує автоматика, відсікаючи дифузійний насос від решти обсягу, і вимикається напруження катода і висока напруга. Треба тільки простежити, щоб форвакуумний насос не працював «на повітря», а переключити його на закритий обсяг, наприклад на відкачку боксу з фотопластинками [24].

### 5.3 Заходи з виробничої санітарії

а) параметри мікроклімату і чистоти повітря визначають в залежності від категорії фізичних робіт, для певних робочих місць (постійних і непостійних). Постійне робоче місце – це місце, на якому працюючий знаходиться понад 50% робочого часу або більше 2-х годин безперервно. Якщо при цьому робота здійснюється в різних пунктах робочої зони, то постійним робочим місцем вважається вся ця зона. Непостійне робоче місце – це місце, на якому працюючий знаходиться менше 50% робочого часу або менше 2-х годин безперервно.

Необхідно враховувати, що:

- для постійних робочих місць визначаються оптимальні та допустимі параметри мікроклімату в холодний та теплий період року;
- для непостійних робочих місць визначаються тільки допустимі параметри мікроклімату в холодний та теплий період року.
- в холодний період року на постійних робочих місцях: температура оптимальна 18-20 °С, допустима 17-23 °С; відносна вологість: оптимальна 40-60 %, допустима 75 %; швидкість переміщення повітря: оптимальна не більше 0,2 м/с, допустима не більше 0,3 м/с;

– в холодний період року на непостійних робочих місцях допустима температура: 15-24 °С; допустима відносна вологість: 75 %; допустима швидкість переміщення повітря: не більше 0,3 м/с;

– в теплий період року на постійних робочих місцях: температура оптимальна 21-23 °С, допустима 18-27 °С; відносна вологість: оптимальна 40-60 %, допустима 40-60 %; швидкість переміщення повітря: оптимальна не більше 0,3 м/с, допустима не більше 0,2-0,4 м/с;

– в теплий період року на непостійних робочих місцях допустима температура 17-29 °С; допустима відносна вологість: 65 % 45 при температурі 26 °С; допустима швидкість переміщення повітря: 0,2-0,4 м/с.

б) Виробниче освітлення організується і нормується залежно від:

– розряду зорової роботи, тобто її характеристики (найменшого розміру об'єкта який різниться, світлості фону, контрасту об'єкта з фоном);

– виду і системи освітлення.

Також необхідно врахувати, що передбачається оптимальне (необхідне) освітлення виробничих приміщень і робочих місць:

– природне (бокове або верхнє);

– штучне: робоче, аварійне, евакуаційне, охоронне, чергове

#### 5.4 Заходи з пожежної безпеки

Категорію виробництва за пожежною безпекою (А, Б, В, Г, Д) споруд (приміщень) цеху (ділянки, підстанції) визначають на основі аналізу речовин і матеріалів, що використовуються у виробництві, відповідно до категорії виробництва з пожежної безпеки, визначають ступінь вогнестійкості приміщення цеху (дільниці, підстанції).

Охоронно-пожежна сигналізація неадресного типу влаштована на неадресних (порогових) датчиках. Обладнання розраховане на цілодобову

роботу і відповідає необхідним вимогам пожежної безпеки. До складу системи ОПС входить панель, блок управління і індикації та програмне забезпечення.

Панель системи ОПС призначена для прийому сповіщень від шлейфів сигналізації з пожежними та охоронними сповіщувачами або інших приладів, перетворення сигналів, видачі сповіщень про пожежу і/або проникненні з включенням оповіщення та інших виконавчих пристроїв і передачі сповіщень на пульт централізованого спостереження.

Система ОПС на неадресних (порогових) сповіщувачах дозволяє:

- контролювати стан пожежних, охоронних шлейфів сигналізації;
- видавати повідомлення про пожежу та/або проникненні на блоці індикації;
- включати систему оповіщення та інші виконавчі пристрої комплексної системи безпеки;
- передавати повідомлення на Пульт централізованого спостереження, якщо він передбачений проектом.

Разом із системою ОПС можуть працювати такі види охоронних датчиків, як:

- інфрачервоні, що реагують на рух;
- магнітоконтатні, що реагують на розмикання дверей;
- акустичні, що реагують на розбивання скла.

Порогова охоронно-пожежна сигналізація – може працювати як автономно, так і в складі комплексної системи безпеки спільно з відеоспостереженням, контролем доступу і системою підвищення ефективності управління. Істотно розширюються можливості по управлінню обладнанням і обробці інформації, що надходить - при наявності модулів «Моніторинг» або «Центральний пост» на моніторі охоронця автоматично видається інформація про пожежу із зазначенням місця його виникнення на графічному плані підприємства. В охоронюваних приміщеннях встановлюються порогові пожежні або охоронні сповіщувачі, які об'єднуються в шлейфи сигналізації.

## 5.5 Заходи безпеки в умовах надзвичайних ситуацій

Підвищення міцності промислових споруд, а також їх стійкості до дії ударної хвилі, по-перше, пов'язано із значними затратами, а по-друге, все ж неповністю гарантують їх збереження в епіцентрі ядерного вибуху. У зв'язку із цим проведення робіт по зміцненню тих чи інших споруд може плануватись і здійснюватися лише в цілях захисту особливо цінного, унікального обладнання або в тих випадках, коли окремі важливі споруди мають значно меншу міцність, ніж інші, і «підтягнувши» їх міцність до середніх по заводу величин, можна без великих затрат підвищити стійкість об'єкту в цілому.

Вибір заходів, які забезпечують підвищення стійкості об'єкту, визначається різними місцевими умовами в кожному конкретному випадку. Найбільш ефективними являються заглиблення, зменшення парусності і висоти споруд. Міцність і жорсткість конструкцій можна підвищити встановленням контрфорсів, підкосів, додаткових рамних конструкцій, розпірок і відтяжок. Стійкість незначних по розмірам споруд підвищується шляхом обсіпки нижньої частини їх стін ґрунтом (піском і т.п.). Цей же спосіб значно підвищує захисні властивості споруд по відношенню до дії радіаційних випромінювань.

Захист обладнання і готової продукції передбачає розміщення деяких видів обладнання і продукції у заглиблення в приміщеннях, а також підготовку індивідуальних захисних пристроїв.

Надійно захистити все обладнання від впливу ударної хвилі практично неможливо, оскільки доводити міцність цехових споруд до захисних властивостей сховищ економічно недоцільно. Задача полягає в тому, щоб звести до мінімуму небезпеку руйнування і пошкодження особливо цінного обладнання, унікальних шліфувальних, токарних, розточних і зубофрезерних станків, пресів і кувальних машин, насосного обладнання, розрахунково-аналітичних машин і тощо.

Для зменшення руйнування обладнання підсилюють його найбільш слабкі деталі та вузли, виготовляють їх з'ємними і створюють запаси для заміни пошкоджених. Стійкість обладнання від падіння під дією ударної хвилі ядерного вибуху підвищують шляхом надійного закріплення на фундаменті, створення контрфорсів, заглиблень. Запас найбільш нестійких деталей і вузлів для важливого унікального обладнання слід утримувати в спорудах, які забезпечили б їх збереження при дії ударної хвилі.

Підвищення стійкості обладнання може бути досягнуто також шляхом заміни застарілих зразків новими, які найбільш відповідають вимогам до їх стійкості, а також скороченням числа типомоделей станків, що використовуються, що в подальшому значно спростить проведення ремонтних і відновлювальних робіт; заміною горючих і вибухонебезпечних змащувально-охолоджувальних рідин (наприклад, сульфозфрезолу, фрезолу, керосину) емульсіями; впровадженням в процеси термічної обробки с.в.ч. і т. п.

Важливе значення має і раціональне розміщення обладнання. Найбільш цінне і нестійке обладнання і прилади слід розміщувати в найбільш міцних приміщеннях, важкі станки, машини і агрегати повинні розташовуватись на нижніх поверхах споруд. Машини і станки великої цінності рекомендується розміщувати не в основних промислових, а у окремо розташованих спорудах, які мають легкі конструкції і конструкції, які важко горять, руйнування їх не приведе до руйнування цього обладнання.

Особливо велике значення має стійкість і розгалуженість систем енергетичного забезпечення (електроенергія, газо-, паро- і теплопостачання, забезпечення стисненим повітрям).

До числа заходів, які можуть бути рекомендовані для підвищення стійкості роботи систем енергопостачання, відносять: перенос інженерних і енергетичних комунікацій у підземні колектори, розміщення найбільш відповідальних пристроїв (центральні диспетчерські і розподільчі пункти, компресорні і аварійні електричні станції) в захищених спорудах з

підвищеною стійкістю до впливу ударної хвилі; кільцювання всіх енергетичних систем; побудова захищених автономних джерел електро- і водопостачання, резервних ємностей і резервуарів; придбання пересувних електростанцій і насосних агрегатів з двигунами внутрішнього згорання; обладнання пристосувань для роботи підприємств на різних видах палива; кооперування постачання групи підприємств, тобто створення умов і можливостей для використання джерел електро-, газо-, тепло- і водопостачання, кисневих станцій, складів палива одного підприємства для забезпечення потреб іншого.

Стійкість систем електропостачання підвищується базуванням підприємств на декількох енергоджерелах, віддалених один від іншого на таку відстань, щоб виключити можливість руйнування їх одним ядерним вибухом. При живленні підприємства від районної енергосистеми лінії електропередач необхідно підводити не менш ніж із двох напрямків, а приймальні підстанції (ЦРП, РП) розташовують одна від одної на можливо більшій відстані. Доцільні і такі заходи, як забезпечення захисту існуючих і побудова резервних підстанцій, перевід енергопостачання із повітряного на підйомно-кабельне, встановлення автоматичних роз'єднувачів для відімкнення ділянок сітей у випадку перевантаження і короткого замикання. Споруди цивільної оборони забезпечуються автономними джерелами енергопостачання.

Система водопостачання також повинна базуватися на двох і більше незалежних вододжерелах, віддалених один від одного на відповідну відстань. Рекомендується встановлювати додаткові бурові скважини (артезіанські скважини), кільцювати розвідні сіті, захищати гідранти і водорозбірні колонки, впроваджувати автоматичні і напівавтоматичні пристрої, які б відключали б пошкоджені ділянки без порушення роботи іншої частини мережі.

На сітях газопостачання і теплофікації слід передбачити заходи проти втрачання газу (пари, води) у випадку руйнування магістральних ліній і внутрішньої сіті у пошкоджених або зруйнованих спорудах. Це досягається

шляхом встановлення на вводах в споруди або на відводах магістральних ліній автоматичних запірних пристроїв, які відмикають лінії при руйнуванні. Встановлюють і задвижки дистанційного управління, які дозволяють відімкнути сіті із одного центра управління.

Мережі зв'язку можна вважати підготовленими з точки зору цивільної оборони, якщо забезпечений захист вузлів зв'язку і розподільчих шаф, а повітряні лінії зв'язку на території підприємства переведені на підземно-кабельні. Стійкість засобів зв'язку може бути підвищена шляхом прокладання другого живлення фідерів на автоматичну телефонну станцію і радіовузлу заводу, придбання пересувних електростанцій для зарядки акумуляторів АТС і для живлення радіовузла при повному відключенні постійних джерел електроенергії.

Важливе значення має планове накопичення ультракороткохвильових радіостанцій, телефонних апаратів і телефонного кабелю польового типу для створення тимчасових ліній зв'язку на випадок виходу із ладу постійних. Необхідно також мати незмінний резерв запасних частин і деталей для ремонту всіх засобів зв'язку.

Попередження або зменшення до мінімуму можливих руйнувань, пожеж і втрат від додаткової дії вторинних факторів ураження ядерного вибуху в значній мірі залежать від проведення інженерно-технічних заходів, направлених на підвищення загальної стійкості всього інженерно-технічного комплексу підприємства і його окремих елементів. Крім цього, ця задача досягається розосередженням (вивозом) наднормативних запасів вибухових і вогнебезпечних речовин на безпечній відстані від самого підприємства, а також від інших населених пунктів та об'єктів. Таке розосередження вибухових та вогнебезпечних матеріалів здійснюється в основному при виникненні погрози нападу супротивника, однак уже у мирний час для цього слід підготувати склади у загородній зоні.

Роботи із вибуховими речовинами рекомендується сконцентрувати в спеціальних окремо розташованих спорудах, щоб виключити джерела

додаткової небезпеки при здійсненні цих робіт у різних цехах. На багатьох підприємствах запаси горючих рідин (нафта, бензин, керосин, масла і т. п.) містяться не в підземних сховищах, а в наземних резервуарах та інших ємностях. В цих випадках такі ємності повинні бути уже в мирний час обваловані, тобто оточені валами ґрунту такої висоти, щоб вони були здатні втримати весь об'єм рідини при руйнуванні резервуару.

Створення обмежувальних земляних валів (дамб) являється також одним із ефективних способів захисту об'єктів, розташованих в низинних ділянках місцевості, від катастрофічного затоплення в результаті руйнування поблизу розташованих гідроспоруд.

Для попередження виникнення джерел хімічного зараження можна рекомендувати наступні заходи: розосередження складів отрутохімікатів, а також обладнання їх пристосуваннями, які забезпечують швидку нейтралізацію отруйних речовин (змивання водою; обробка залізним купоросом приміщень, небезпечних із-за наявності ціаністих сполук; обробка кислот лугами і т. п.); виготовлення міцної і надійної тари; настил підлог в складах отрутохімікатів із кислотоупорних і лугостійких матеріалів; створення запасів нейтралізуючих речовин; ізоляція (відгородження) в цехах небезпечних ділянок (травлення, ціанування, азотування та ін.); забезпечення робочих небезпечних і сумісних з ними ділянок спеціальними засобами індивідуального захисту (промислові протигази, захисний одяг).

## ВИСНОВКИ

Сучасні композиційні матеріали, як металеві, так і неметалеві, демонструють виняткову ефективність у авіакосмічній галузі, особливо для виготовлення деталей, що працюють під високими навантаженнями та температурами. Їх унікальність полягає у вдалому поєднанні високої механічної міцності, пружності, низької густини та оптимальної в'язкості руйнування. Проте широке впровадження композитів обмежується їх високою вартістю, що робить їх доступними лише для специфічних високотехнологічних застосувань.

Дослідження композиційного матеріалу ЭК64 – ВР273ВП дозволило розробити та оптимізувати технологію його виробництва. На основі експериментів встановлено оптимальні технологічні параметри, що забезпечують отримання бездефектної структури з надійним з'єднанням волокон та матриці. Механічні випробування підтвердили високу міцність композиту та ефективність армування. Розроблена технологія забезпечує стабільне виготовлення матеріалу в промислових умовах та може бути адаптована для створення інших композиційних матеріалів.

**ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ**

1. Potapov, A., Shtefan, Y., & Lichman, E. Research of material for uncooled nozzle extensions of liquid rocket engines. *Acta Astronautica*, 2009. Vol. 64. no.1. P. 22-27.
2. Gradl, P. R., & Valentine, P. Carbon-carbon nozzle extension development in support of in-space and upper-stage liquid rocket engines. In: 53rd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. 2017. p. 5064.
3. Preparation and oxidation behavior of a double-layer coating for three-dimensional braided carbon fiber. / Wang Jingjing, et al. *Surface and Coatings Technology*, 2016, Vol. 298: P. 58-63.
4. Long-run testing of model nozzle extensions made of a carbon-carbon composite material in a liquid-propellant rocket engine operating on hydrogen and oxygen. / Anikin, A. V. et. al. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2019. Vol. 60, P. 80-86.
5. Enhanced thermal conductivity of epoxy/Cu-plated carbon fiber fabric composites / S. Yu et al. *Macromolecular Research*. 2017. Vol. 25, no. 6. P. 559–564. URL: <https://doi.org/10.1007/s13233-017-5114-9>
6. Microstructure, Wear Resistance and Oxidation Behavior of Ni-Ti-Si Coatings Fabricated on  $Ti_6Al_4V$  by Laser Cladding / Q. Zhuang et. al. *Materials*. 2017. Vol. 10, no. 11. P. 1248. URL: <https://doi.org/10.3390/ma10111248>
7. Zamani, P.; Valefi, Z. Microstructure, phase composition and mechanical properties of plasma sprayed  $Al_2O_3$ ,  $Cr_2O_3$  and  $Cr_2O_3-Al_2O_3$  composite coatings. *Surf. Coat. Technol.* 2017. Vol. 316. P. 138–145.
8. Oxidative protection of a carbon-bonded carbon fiber composite with double-layer coating of  $MoSi_2-SiC$  whisker and  $TaSi_2-MoSi_2-SiC$  whisker by slurry method. Du, B. et. al. *Ceram. Int.* 2017, Vol. no. 43. P. 9531–9537.

9. Xiaojun, M.; Zhou, W.; Yin, C. Structure and Photocatalytic Properties of Mn-Doped  $\text{TiO}_2$  Loaded on Wood-Based Activated Carbon Fiber Composites. *Materials*. 2017. Vol. 10. P. 631.

10. High temperature oxidation behaviour of autocatalytic Ni-P-BN (h) coatings. *Surf. Farrokhzad M.A. et. al. Coat. Technol.* 2017, Vol. 309. P. 390–400.

11. Ablation behavior of rare earth La-modified ZrC coating for SiC-coated carbon/carbon composites under an oxyacetylene torch. / Jia, Y. et. al. *Corros. Sci.* 2016. Vol. no. 104, P. 61–70.

12. Improving the oxidation resistance under thermal shock condition of SiC-coated C/C composites with refined SiC grain size using ferrocene. / Huo, C. et. al. *Surf. Coat. Technol.* 2017, Vol. 316. P. 39–47.

13. Functionalization of cotton fabric with nanosized  $\text{TiO}_2$  coating for self-cleaning and antibacterial property enhancement. / Doganli G. J. et. al. *Journal of Coatings Technology and Research*. 2016. Vol. 13. P. 257–265.

14. Microstructure and oxidation protection of a  $\text{MoSi}_2/\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ , coating for SiC-coated carbon/carbon composites. *Surf / Yong, X. et. al. Coat. Technol.* 2017, 311, 63–69.

15. Preparation of Continuous  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Y}_2\text{O}_3$  Coating on Carbon Fiber by a Novel Aqueous Plasma Electrolysis. / Zhang, Y.P. et. al. *Mater. Sci. Forum Trans. Tech. Publ.* 2017. Vol. 898. P. 1575–1582.

16. Li, L. Damage evolution and life prediction of cross-ply C/SiC ceramic-matrix composite under cyclic fatigue loading at room temperature and 800 °C in air. *Materials* 2015, Vol. 8. P. 8539–8560.

17. The Microstructure of Nanocrystalline  $\text{TiB}_2$  Films Prepared by Chemical Vapor Deposition. / Huang, X. et. al. *Materials*. 2017. Vol. 10. P. 1425.

18. Szczurek, A.; Improvement of Interaction in a Composite Structure by Using a Sol-Gel Functional Coating on Carbon Fibers. *Materials* 2017, Vol. 10. 990 p. 19. Joining of CVD-SiC coated and uncoated fibre reinforced ceramic matrix composites with pre-sintered  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$  / Tatarko. P. MAX phase using Spark Plasma Sintering. *J. Eur. Ceram. Soc.* 2016, Vol. 36. P. 3957–3967.

20. Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition Technological Design of Functional Coatings. / Januś, M. Arch. Metall. Mater. 2015, Vol. 60. P. 909–914.

21. Jonas, S.; Januś, M.; Jaglarz, J.; Kyzioł, K. Formation of SixNy (H) and C:N:H layers by Plasma-Assisted Chemical Vapor Deposition method. Thin Solid Films 2016. Vol. 600, P. 162–168.

22. Lee, E.S.; Lee, C.H.; Chun, Y.S.; Han, C.J.; Lim, D.S. Effect of hydrogen plasma-mediated surface modification of carbon fibers on the mechanical properties of carbon-fiber-reinforced polyetherimide composites. Compos. Part B Eng. 2017. Vol. 116, P. 451–458.

23. Guo, Z.; Sang, L.; Wang, Z.; Chen, Q.; Yang, L.; Liu, Z. Deposition of copper thin films by plasma enhanced pulsed chemical vapor deposition for metallization of carbon fiber reinforced plastics. Surf. Coat. Technol. 2016. Vol. 307, P. 1059–1064.

24. Wang, J.; Lin, W.; Yan, X.; Wu, X.; Wu, F.; Yang, Y. Preparation and microstructure of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub>–TiO<sub>2</sub> coating on three-dimensional braided carbon fiber by sol–gel technology. Mater. Des. 2016. Vol. 89, P. 928–932.

25. Figueira, R.B.; Callone, E.; Silva, C.J.; Pereira, E.V.; Dirè, S. Hybrid coatings enriched with tetraethoxysilane for corrosion mitigation of hot-dip galvanized steel in chloride contaminated simulated concrete pore solutions. Materials 2017. Vol. 10, P. 306.

26. Xiang, Y.; Li, X.; Du, A.; Wu, S.; Shen, J.; Zhou, B. Timing of polyethylene glycol addition for the control of SiO<sub>2</sub> sol structure and sol–gel coating properties. J. Coat. Technol. Res. 2017. Vol. 14, P. 447–454.

27. Xia, K.; Lu, C.; Yang, Y. Preparation of anti-oxidative SiC/SiO<sub>2</sub> coating on carbon fibers from vinyltriethoxysilane by sol–gel method. Appl. Surf. Sci. 2013. Vol. 265, P. 603–609.

28. Загальні вимоги стосовно забезпечення роботодавцями охорони праці працівників: НПАОП 0.00-7.11-12. – На заміну наказу МНС України від 26.12.2011 № 1350 ; чинний від 2012-03-16. – К. : МНС України, 2012. – 116 с.

– URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0226-12>. – (Нормативно-правовий акт охорони праці);

23. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом: ДСТУ Б В.2.5-82:2016. – На заміну ДБН В.2.5-27-2006 ; чинний від 2017-04-01. – К. : ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 109 с. – (Державний Стандарт України)

24. Правила охорони праці під час роботи з інструментом та пристроями: НПАОП 0.00-1.71-13. – Чинний від 2014-03-28. – К. : Міненерговугілля України, 2013. – 59 с.