

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 можливостей оптимізації технологічного процесу термічної  
обробки лопаток ГТД

(назва теми)

Виконав(ла): студент(ка) 2 курсу, групи ІФз 212м

Спеціальності 132 Матеріалознавство

(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

Прикладне матеріалознавство

КОРОЛЬОВА Т.Г

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Керівник ВІНІЧЕНКО В.С.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Рецензент \_\_\_\_\_

(ПРИЗВИЩЕ 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)**

КОРОЛЬОВА Тетяна Геннадіївна

(ПРІЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) Дослідження можливостей оптимізації технологічного процесу термічної обробки лопаток ГТД

керівник проєкту (роботи) доцент, к.т.н ВІНІЧЕНКО Валерій Степанович

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

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

2. Строк подання студентом проєкту (роботи) 22.01.2024

3. Вихідні дані до проєкту (роботи) умови експлуатації лопаток ГТД, жароміцні титанові сплави

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Літературний огляд, матеріали та методика, експериментальна частина, розрахунок економічної ефективності, охорона праці, висновки

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

## 6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	ПРИЗВИЩЕ, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1	ВІНІЧЕНКО В.С. доцент, к.т.н		
2	ВІНІЧЕНКО В.С. доцент, к.т.н		
3	ВІНІЧЕНКО В.С. доцент, к.т.н		
4	КРУГЛІКОВА В.О, доцент, к.т.н		
5	НЕСТЕРОВ О.В., доцент, к.т.н		
НК			

7. Дата видачі завдання «10» жовтня 2023 року.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Літературний огляд		
2	Матеріали та методика досліджень		
3	Експериментальна частина		
4	Економіко-організаційна частина		
5	Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях		
	Висновки		

Студент(ка)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Тетяна КОРОЛЬОВА

(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Керівник проєкту (роботи)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Валерій ВІНІЧЕНКО

(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до магістерської роботи: 80 с., 23 табл., 11 рис., 1 додаток, 21 джер.

ЛОПАТКА ГТД, ТИТАНОВІ СПЛАВИ, ЛЕГУВАННЯ, ЖАРОМІЦНІСТЬ, ТЕРМІЧНА ОБРОБКА, ЛЕГУВАЛЬНІ ЕЛЕМЕНТИ, ЕКОНОМІЙНИЙ ЕФЕКТ, ОХОРОНА ПРАЦІ

Метою дослідження є аналіз впливу режиму термічної обробки на фазові перетворення, механічні характеристики та зміну кількості фаз у жароміцних титанових сплавах при зміні температури випробувань.

Об'єкт дослідження – термічна обробка жароміцних титанових сплавів.

Отримані результати дозволяють зробити висновок про можливість оптимізації технологічного процесу термічної обробки лопаток ГТД з метою поліпшення якості продукції та зниження витрат на виробництво. Результати дослідження можуть бути корисними для підприємств, що займаються виробництвом ГТД, та сприяти підвищенню їхньої конкурентоспроможності на ринку.

## ЗМІСТ

Вступ.....	7
1 Літературний огляд .....	8
1.1 Характеристика та умови експлуатації виробу, вимоги до матеріалів ....	8
1.2 Характеристика сплавів для робочої лопатки компресора ГТД .....	13
1.3 Термічна обробка сплавів для лопаток ГТД .....	22
2 Матеріали та методика досліджень .....	28
2.1 Хімічний склад досліджуваних сплавів.....	28
2.2 Дослідження механічних характеристик.....	28
2.3 Дослідження мікроструктури .....	31
2.4 Рентгеноструктурний аналіз .....	32
3 Експериментальна частина .....	35
3.1 Дослідження впливу термічної обробки на жароміцні титанові сплави	35
3.2 Розрахунки тривалості нагрівання лопаток ГТД .....	42
3.3 Вибір та розрахунки кількості обладнання .....	45
3.4 Дефекти, які виникають під час термічної обробки лопаток із титанових сплавів .....	51
4 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.....	54
4.1 Аналіз потенційних небезпек .....	54
4.2 Заходи забезпечення безпеки.....	55
4.3 Заходи забезпечення виробничої санітарії та гігієни праці.....	61
4.4 Заходи з пожежної безпеки .....	63
4.5 Заходи по забезпеченню безпеки у надзвичайних ситуаціях .....	64
5 Економіко-організаційна частина.....	65
5.1 Актуальність теми з позиції маркетингу .....	65
5.2 Послідовний аналіз .....	66
Висновок .....	76
Перелік джерел посилань .....	77

Додаток А..... 80

## ВСТУП

У сучасних умовах розвитку технологій та конкурентного виробництва, питання оптимізації технологічних процесів має велике значення для підприємств, які займаються виробництвом компонентів для газотурбінних двигунів (ГТД). Одним з ключових елементів таких двигунів є лопатки, які піддаються термічній обробці для забезпечення необхідних механічних властивостей та тривалого терміну експлуатації.

Цей дипломний проект присвячений дослідженню можливостей оптимізації технологічного процесу термічної обробки лопаток ГТД з метою підвищення ефективності виробництва, якості продукції та зниження витрат. Розв'язання цього завдання передбачає проведення комплексного аналізу існуючих технологічних процесів та їхніх параметрів, впровадження нових методів обробки, а також визначення оптимальних умов для отримання бажаних властивостей лопаток.

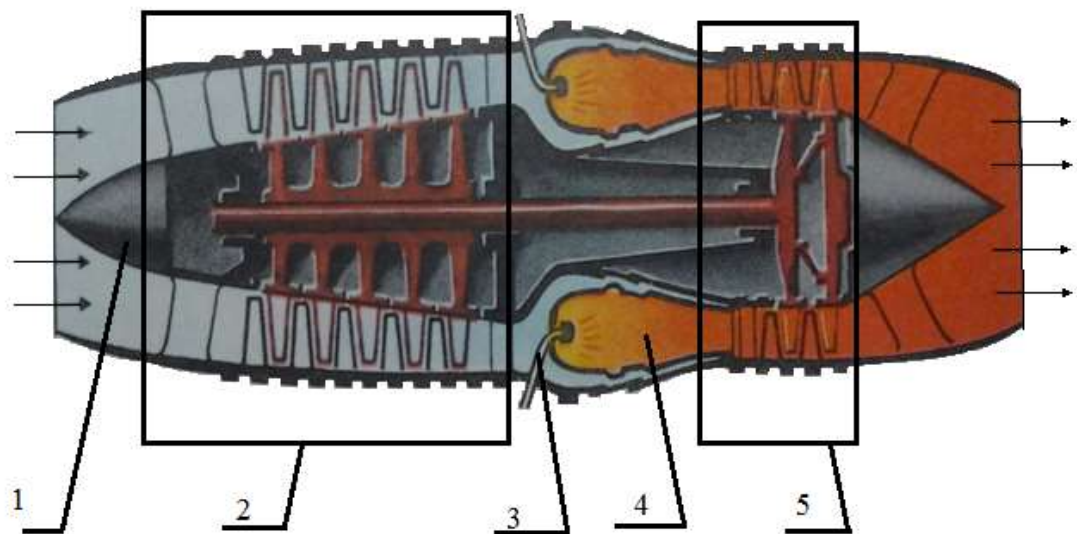
Основні напрямки роботи включають в себе вивчення літературних джерел та аналіз існуючих підходів до термічної обробки лопаток, проведення експериментальних досліджень з використанням різних режимів термічної обробки, а також оцінку отриманих результатів з точки зору їхньої відповідності вимогам експлуатації.

Враховуючи важливість технологічної оптимізації для підприємств, що займаються виробництвом ГТД, результати цього дослідження можуть мати значний практичний вплив на ефективність виробництва та якість виробів, що стане важливим кроком у поліпшенні конкурентоспроможності на ринку.

## 1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

### 1.1 Характеристика та умови експлуатації виробу, вимоги до матеріалів

Газові турбіни призначені для перетворення внутрішньої енергії робочого газу на механічну енергію обертання валу турбіни. Основні елементи газових турбін показані на рисунку 1.1 - це корпус турбіни, ротор та статор турбіни, опори ротора (статора), вал турбіни, камера згорання [1].



1 - обтискувач компресора, 2 - компресор високого тиску, 3 - форсунки,  
4 - камера згорання, 5 - турбіна

Рисунок 1.1 – Схема газовой турбины [1]

Лопатки компресора ГТД є найбільш відповідальними елементами конструкції газотурбінних двигунів, від надійної роботи яких залежить надійність роботи двигуна в цілому. В робочій лопатці розрізняють профільну частину (перо) і замкову (хвостовик). Між пером і хвостовиком лопатки передбачають полицю, яка поліпшує перехід від пера до хвостовика. Наявність полиці підвищує також вібраційні характеристики лопатки. Лопатки фіксуються в ободі за допомогою замків. Профільна частина

обтікається надзвуковим або навіколозвуковим потоком повітря, і від її аеродинамічних характеристик залежить ККД (коефіцієнт корисної дії). За довжиною лопатки хорди її перерізів повернені відносно хорди кореневого перетину відповідно до закону зміни трикутників швидкостей, тобто лопатка має геометричне закручування. Після установки лопатки на диску полиці утворюють розрізне бандажне кільце. Між полками в холодному стані передбачається невеликий зазор (0,15-0,25мм). На рисунку 1.2 показані робочі лопатки компресора ГТД [2].

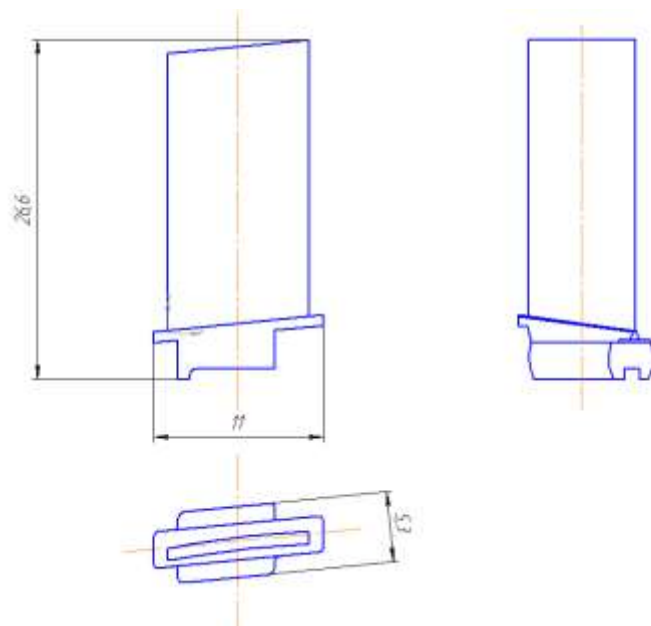


Рисунок 1.2 – Ескіз лопатки компресора ГТД

За довжиною лопатки хорди її перерізів повернені відносно хорди кореневого перетину відповідно до закону зміни трикутників швидкостей, тобто лопатка має геометричне закручування. Після установки лопатки на диску полиці утворюють розрізне бандажне кільце. Між полками в холодному стані передбачається невеликий зазор (0,15...0,25мм) [2,3].

Вузол кріплення лопатки до обода повинен мати достатню міцність і твердість при малих габаритах і маси хвостовика та деякому ослабленні обода. Він повинен забезпечувати високу точність установки лопатки по кроку та куту, можливість розміщення на ободі необхідної кількості лопаток при

збереженні рівномірності елементів кріплення лопатки і обода, низьку вартість виготовлення, монтажу та демонтажу. Найбільше розповсюдженим для робочих лопаток газової турбіни є хвостовик типу «ялинка».

Умови експлуатації лопаток компресора ГТД: температура повітря на вході в компресор низького тиску дорівнює  $50^{\circ}\text{C}$ . Робоча температура металу перших ступеней компресора низького тиску (КНТ) залежить від температури засмоктуваного атмосферного повітря. Робоча температура металу лопаток останніх ступеней КНТ  $140\dots180^{\circ}\text{C}$ . Робоча температура металу лопаток перших ступеней компресору високого тиску (КВТ)  $30\dots220^{\circ}\text{C}$ ,  $30\dots50^{\circ}\text{C}$  за наявності повітроохолоджувача, температура лопаток останніх ступеней КВТ  $320\dots450^{\circ}\text{C}$ . В робочих лопатках КНТ згинальні напруження не перевищують  $40\text{МПа}$ , напруження від відцентрових сил знаходиться в межах  $120\text{-}220\text{МПа}$ . [4]

Робочі лопатки повинні задовольняти таким вимогам:

- Профільна частина повинна мати високі аеродинамічні характеристики: високу підйомну силу, малий лобовий опір і можливість працювати без зриву потоку у великому діапазоні кутів атаки.

- Конструкція лопаток і матеріал, з якого вони виготовлені, повинен забезпечити високу механічну міцність, оскільки діючі на лопатку відцентрові і газові сили викликають значні напруження згину і крутіння.

- Конструкція і технологія виготовлення лопаток повинні забезпечити високу точність виготовлення і чистоту обробки поверхні. Відхилення від номінальних розмірів допускаються не більше  $0,05\dots0,15\text{ мм}$ , а від номінальних кутів - не більш  $15^{\circ}$ . Чистота обробки профільної частини має великий вплив як на міцність, так і на ККД. Наявність навіть найдрібніших рисок, особливо на кромках, часто є причиною появи тріщин і виникнення поломок. Тому поверхню профільної частини обробляють до сьомого - дев'ятого класу чистоти, а кромки часто полірують в поздовжньому напрямку.

- Лопатки повинні мати належні вібраційні характеристики, що запобігає вібрації лопаток з великими амплітудами в діапазоні робочих режимів

двигуна. Розкид частот власних коливань лопаток одного рівня не повинен перевищувати 3 - 4 %.

- Лопатки повинні мати якомога меншу масу для зменшення маси всього двигуна [5].

Динамічні навантаження, що є результатом коливань лопаток, викликають в них змінні за величиною та знаком напруження крутіння і згину.

Температурні напруження, що діють на лопатку турбіни, викликані нерівномірним нагріванням її за товщиною та довжиною, при чому розподіл температур за перерізом залежить від режиму, на якому працює двигун. При запуску тонкі кромки профілю прогриваються швидше, ніж середня частина. При цьому менш нагріті шари, стримуючи розширення більш нагрітих уздовж осі лопатки, викликають в них напруження стиснення; в найменш нагрітих шарах виникають напруження розтягу. Аналогічна картина розподілу напружень спостерігається і при сталому режимі: кромки мають більш високу температуру в порівнянні з середньою частиною, оскільки тепловідвід від кромки ускладнений.

При зупинці двигуна в початковий момент великі маси холодного повітря швидко охолоджують вхідні й вихідні кромки робочих лопаток та викликають в них напруження розтягу, які підсумовуються із напруженнями розтягу від відцентрових сил.

До статичних навантажень, що діють на лопатки, відносять відцентрові сили мас лопаток, що виникають при обертанні ротора, і газові сили, що виникають при обтіканні газом профілю й через наявність різниці тисків газу перед та поза лопаткою.

Відцентрові сили викликають деформації розтягу, згину і крутіння, газові — деформації згину і крутіння.

Напруження розтягу є найбільш істотними, особливо для лопаток. Напруження згину значно менші за напруження розтягу. Це пояснюється тим, що лопатку виготовляють і встановлюють так, що напруження згину від

відцентрових сил в найбільш навантажених точках перерізу протилежні за знаком напруженню згину від газових сил.

Проаналізувавши умови експлуатації роботи робочих лопаток компресора ГТД та вимоги до матеріалу, можна зробити висновок про те, що матеріал для лопаток повинен володіти: високим рівнем питомої міцності, достатньо високою жароміцністю, границею термічної втоми, втомною міцністю, малою чутливістю до надрізів, достатнім опором ерозії, максимально можливою теплопровідністю, що забезпечує найменшу нерівномірність нагріву, низьким коефіцієнтом лінійного розширення, однорідністю та стабільністю основних властивостей, особливо при робочих температурах. Даним вимогам відповідають титанові сплави. В подальшому розглядаються сплави ВТ3-1, ВТ8, ВТ9.

Направляючі і спрямляючі апарати уявляють собою кільцеві набори нерухомих або поворотних профілюючих лопаток, що утворюють розширювальні канали, і є частиною статора ГТД.

На напрямні лопатки діють напруження згину та крутіння від дії газових сил. В них внаслідок коливань можуть виникати значні змінні напруження, а особливо в довгих лопатках перших ступіней. Напрямні лопатки кріпляться або до корпусу компресора, або в проміжних кільцях чи полукільцях, які після цього встановлюються в корпус. Спосіб кріплення повинен забезпечувати необхідну жорсткість, високу міцність, ідентичність і незамінність установлення лопаток, а також зручність складання компресора.

Вимоги до напрямних лопаток аналогічні вимогам, які висуваються до робочих лопаток.

Напрямні лопатки компресора випробовують значні статичні і вібраційні навантаження від оточуючого їх газового потоку, а в деяких випадках також зусилля від пов'язаних з ними деталей статорів. Внаслідок нерівномірності температур газів проточної частини турбін температури окремих лопаток або окремих перерізів лопаток можуть бути на 50 - 100°C вище середньої.

В напрямних лопатках КНТ напруження згину досягають 80МПа, напруження від відцентрових сил знаходиться в межах 120-220МПа. Руйнування лопаток часто пов'язані з дією динамічної (вібраційних, втомних) напружень.

Матеріал напрямних лопаток повинен володіти наступними характеристиками: жароміцністю, термостійкістю в умовах різкої зміни температури, відповідних зміні температури газу, яке спостерігається при пусках, зупинках і зміні режиму роботи ГТД; довготривалою міцністю, опору повзучості, що забезпечує їх працездатність в процесі експлуатації при підвищених температурах, іноді перевищуючих середню температуру газу.

Напрямної лопатки виготовляють із жароміцних сплавів на нікелевій та залізонікелевій основі, а також із жароміцних сталей. Ці матеріали найбільш повно відповідають заданим вимогам [6].

## 1.2 Характеристика сплавів для робочої лопатки компресора ГТД

Високий рівень питомої міцності, що є характерним для титанових сплавів, зумовлює широке використання цих матеріалів при виготовленні ГТД. Зменшення маси конструкції є особливо важливим для авіаційних двигунів. Заміною сталевих деталей на титанові забезпечується зменшення маси в 1,7 разів із збереженням показників міцності та тривалої міцності. Використання титанових сплавів дозволяє знизити масу компресора на 30-35%. Основною складністю при використанні титанових сплавів як матеріалу деталей компресорів (лопаток) є висока чутливість до стану поверхні. Від виробництва вимагається високий технічний рівень обладнання та кваліфікація персоналу. Титанові сплави мають високий рівень корозійної стійкості. Ці матеріали забезпечують достатній рівень жароміцності до 450°C, тобто в умовах підвищення температури повітря, що відбувається в

компресорі. Недоліком є схильність до корозійного розтріскування. При певних умовах (тиску та концентрації кисню) при виникненні свіжого зламу, коли поверхня не захищена окисною плівкою, стає можливим спалахування титану на повітрі. Це явище має назву “титанова пожежа”. З метою запобігання цього явища використовують оптимальний вибір зазорів між деталями та підбір пар “титан-сталь” замість небезпечного поєднання “титан-титан”.

Жароміцні титанові сплави – це сплави на основі твердих розчинів з деякою кількістю дисперсних включень, що забезпечує суттєве підвищення характеристик міцності та жароміцності. Як хімічні елементи, що утворюють сполуки використовують алюміній ( $Ti_3Al$ ), кремній ( $TiSi$ ), вуглець ( $TiC$ ), бор ( $TiB$ ) та ін. В багатокомпонентних сплавах можливе утворення і інших сполук.

В титанових сплавах поряд із інтерметалідним зміцненням присутнє й твердо розчинне зміцнення. Підвищення теплостійкості, особливо помітне від введення легувальних елементів, які підвищують температуру рекристалізації: алюмінію, олова, кремнію, вуглецю та ін.

Важливою вимогою, яка є необхідною для титанових сплавів, це термічна стабільність, тобто здатність зберігати фізико-механічні властивості незмінними або змінними, але незначною мірою у процесі тривалого нагрівання при робочих температурах та напруженнях.

Сплав ВТЗ-1 - жароміцний титановий сплав системи  $Ti-Al-Mo-Cr-Fe-Si$ . Деформівний. За структурним класом в рівноважному стані відноситься до двофазних, має структурою  $\alpha+\beta$ . Такі сплави здатні зміцнюватися термічною обробкою. В загартованому стані відноситься до мартенситного класу. Обмежена зварюваність. Деталі з цього сплаву працюють при температурі до  $400^{\circ}C$  (6000 год) і до  $450^{\circ}C$  (2000 год) [7].

Сплав ВТ9 – деформівний жароміцний титановий сплав системи  $Ti-Al-Mo-Zr-Si$  відноситься до двофазних  $\alpha+\beta$ -сплавам мартенситного класу. Використовується для виготовлення великогабаритних зварних і збірних конструкцій літальних апаратів, для виготовлення балонів, що працюють під

внутрішнім тиском в широкому інтервалі температур до 500°C, і цілого ряду інших конструктивних елементів. Алюміній у сплавах цієї системи підвищує міцність та жароміцність. Сплав добре деформується в гарячому стані [8].

Сплав VT8 - жароміцний титановий сплав системи Ti-Al-Mo-Si, із структурою  $\alpha+\beta$ . Титановий сплав, що легований алюмінієм, ізоморфними  $\beta$ -стабілізаторами та евтектоїдоутворювачами (неперехідними елементами). VT8 містить 5,8-7,0% алюмінію, кремній та цирконій, що підвищують опір повзучості та тривалу міцність. VT8 у відпаленому стані містить  $\alpha$ -фазу, 10%  $\beta$ -фази та дисперсні силіциди. Алюміній розчиняється в  $\alpha$ -фазі та зміцнює її. Додавання  $\beta$ -стабілізаторів поряд із підвищенням міцності призводить і до підвищення характеристик пластичності. Даний сплав відрізняється високою термічною стабільністю; задовільною пластичністю, не нижче початкової, яка зберігається при витримці 600 год при температурах до 500°C. Він має високий опір повзучості, довготривалу міцність, що обумовлено високим вмістом в ньому алюмінію та додатковим легуванням кремнієм. Сплав термічно зміцнюється. Добре деформується у гарячому стані. Технологічні властивості при обробці тиском погані. Зварювання не рекомендується. В основному застосовується в деталях ГТД (дисках, лопатках компресора низького тиску, деталі кріплення вентилятора) [8].

Титан – корозійностійкий метал, утворює на поверхні щільну оксидну плівку ( $TiO_2$ ). Наявність домішок зменшує опір корозії. При температурі понад 500°C титанові сплави легко окислюються, активно насичуються воднем з пари, що викликає явище водневої крихкості. Механізм водневої крихкості залежить від фазового складу титанових сплавів. У випадку нелегованого титану та однофазних  $\alpha$ -титанових сплавів причиною явища підвищення крихкості є виділення крихкої гідридної фази, що різко зменшує опір відриву. В двофазних сплавах гідриди не утворюються через присутність  $\beta$ -фази, що добре розчиняє водень, проте виникають зони пересичених воднем твердих розчинів, що викликають крихке руйнування при низьких швидкостях деформації. Із збільшенням кількості  $\beta$  - фази чутливість сплавів до водневої

крихкості зменшується. До недоліків титану належать низька теплопровідність, низькі антифрикційні властивості. Титан погано оброблюється різанням.

В залежності від впливу на поліморфізм титану всі легувальні елементи поділяють на три основні групи:

Елементи, що сприяють розширенню  $\alpha$ -області:  $\alpha$ -стабілізатори (Al, Ga, B, C, N, Zn), вони підвищують температуру поліморфного перетворення (рис.1.1).

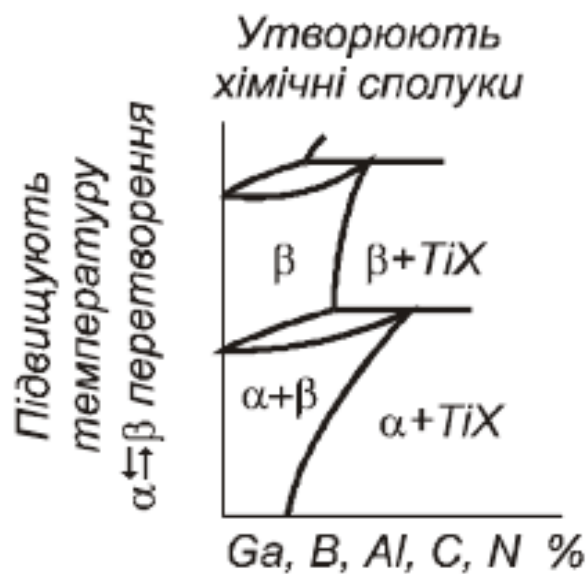


Рисунок 1.2 – Вплив елементів першої групи на поліморфізм титану

Нейтральні елементи, що не впливають на температуру поліморфного перетворення: Hf, Zr, Sn, Ge [9].

Для отримання в сплавах змішаної  $\alpha+\beta$ -структури вводять певну кількість як  $\alpha$ - так і  $\beta$ -стабілізаторів. При відсутності  $\alpha$ -стабілізаторів велика кількість  $\beta$ -стабілізаторів призведе до утворення стабільної  $\beta$ -структури, що є небажаним, бо призведе до окрихчування.

Елементи  $\beta$ -стабілізатори (Mo, V, Mn, Cr, Fe, Ni, Si, Ta, Co, Nb). Ці елементи знижують температуру поліморфного перетворення, збільшують  $\beta$ -області (рис.1.2).

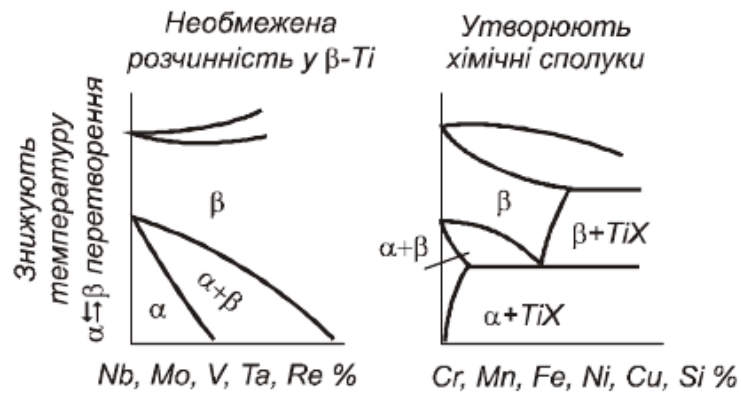


Рисунок 1.3 – Вплив елементів другої групи на поліморфізм титану

Сплави ВТ3-1, ВТ8, ВТ9 леговані наступними елементами: Al, Mo, Cr, Zr, Si. Вплив легувальних елементів на властивості титану наведено на рис.1.6. За інтенсивністю підвищення границі плинності легувальні елементи розташовуються в ряд: Nb, Ta, Zr, Al, V, Sn, Cu, Si, Mn, Co, Fe, Mo, Cr [10].

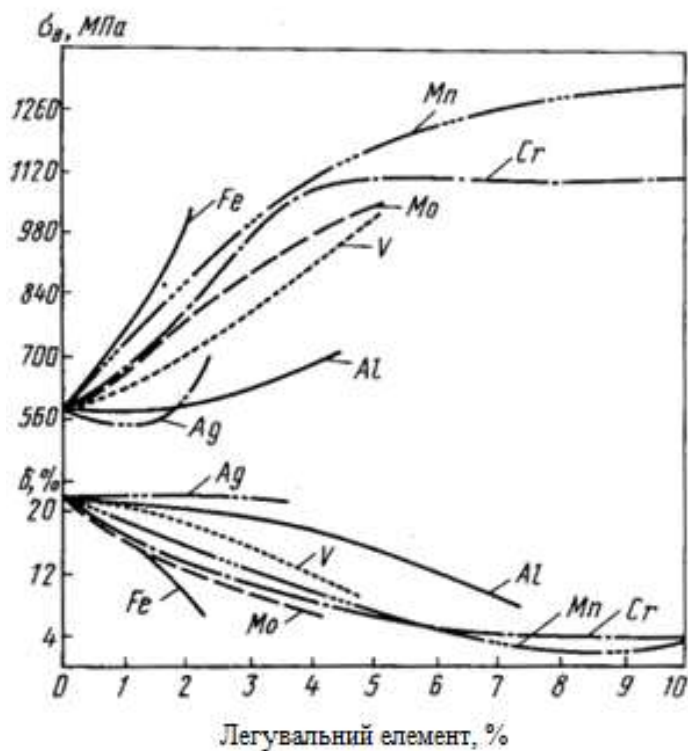


Рисунок 1.4 - Вплив легувальних елементів на механічні властивості титану

Алюміній головним чином входить у розчин  $\alpha$ -фази і сприяє її зміцненню. Алюміній є основним легувальним елементом. Порівняно з іншими легувальними елементами, алюміній має свої переваги: він широко доступний та економічно вигідний; густина алюмінію менше, ніж густина титану, що призводить до підвищення питомої міцності; ефективно зміцнює сплави, зберігаючи при цьому задовільну пластичність; зі збільшенням вмісту алюмінію підвищується жароміцність; підвищує модуль пружності; зі збільшенням вмісту алюмінію зменшується схильність до водневої крихкості. Однак зі збільшенням вмісту алюмінію зростає чутливість титанових сплавів до сольової корозії, а також зменшується технологічна пластичність [10,11].

Молібден утворює неперервний ряд твердих розчинів із  $\beta$ -модифікацією титану та обмежено розчиняється у  $\alpha$ -модифікації. Властивості молібдену як  $\beta$ -стабілізатора при гарячій обробці призводять до збільшення кількості пластичної  $\beta$ -фази. Легування молібденом ефективно підвищує міцність сплавів як при кімнатній, так і при підвищених температурах, а також збільшує термічну стабільність сплавів, які містять хром та залізо. Важливою перевагою молібдену є відсутність інтерметалідних фаз, які можуть призводити до окрихчування сплаву [12].

Хром в титанових сплавах гарантує високу міцність при збереженні хорошої пластичності та ефективності зміцнювальної термічної обробки. Проте наявність евтектоїдного розпаду  $\beta$ -фази може виникнути при тривалих нагріваннях загартованого сплаву при температурі нижче евтектоїдної, але вище  $350^{\circ}\text{C}$ , що приводить до окрихчення титанових сплавів через присутність інтерметалідної сполуки  $\text{TiCr}_2$ .

Залізо та кремній обмежено розчиняються як в  $\beta$ - так і в  $\alpha$ -модифікаціях титану та при концентраціях більших за граничну утворюють з титаном інтерметалідні сполуки  $\text{Ti}_5\text{Si}$ ,  $\text{TiFe}$ ,  $\text{TiFe}_2$ ,  $\text{Ti}_2\text{Fe}$ . Залізо відносно мало впливає на механічні властивості титану. Однак при збільшенні вмісту заліза міцність зростає, пластичність знижується, що пояснюється утворенням при прискореному охолодженні мартенситних структур. При повільному

оохолодженні з  $\beta$ -області знижується і міцність, і пластичність внаслідок так званої  $\beta$ -крихкості. Підвищення вмісту кремнія на 0,1% призводить до зростання міцності, однак пластичність і, особливо, в'язкість при цьому суттєво знижуються. Кремній підвищує жароміцність та жаростійкість титанових сплавів [13].

Цирконій дуже слабкий зміцнювач в порівнянні з іншими легувальними елементами, однак при підвищених температурах зміцнювальний вплив цирконію зростає. Тому його вводять до складу жароміцних титанових сплавів. Підвищення жароміцності титанових сплавів відбувається завдяки невеликому твердорозчинному зміцненню, яке не зменшує сили міжатомного зв'язку. Крім того, цирконій збільшує розчинність  $\beta$ -стабілізаторів в  $\alpha$ -фазі, що дозволяє додатково зміцнити жароміцні  $\alpha$ -сплави [14].

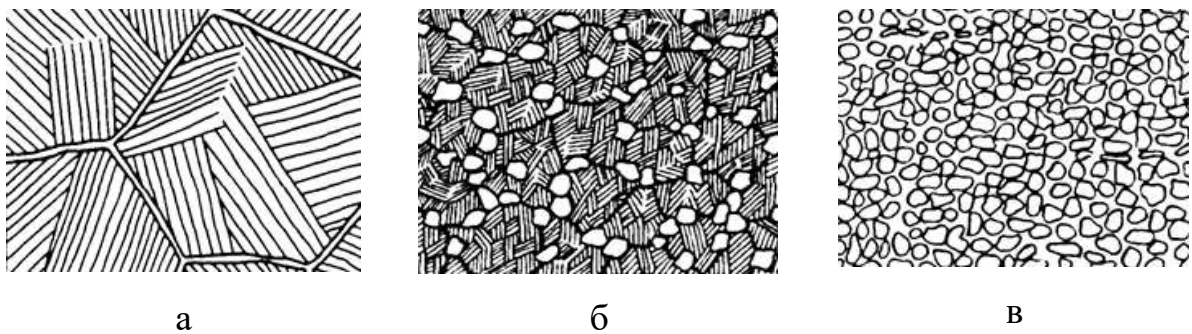
Як ізоморфні, так і евтектоїдоутворюючі  $\beta$ -стабілізатори знижують температуру мартенситного перетворення в титані.

При збільшенні вмісту  $\beta$ -стабілізатору відбувається збільшення кількості  $\beta$ -фази при суттєвому подрібненні структури. Ці фактори визначають зміну властивостей титану при збільшенні концентрації  $\beta$ -стабілізаторів [15].

При цьому ступінь зниження границі текучості і граничної пластичності при переході від дрібнозернистої структури до грубозернистої, як правило, зростає при збільшенні вмісту  $\beta$ -стабілізатора (посилюється схильність до «крихкості»). Таким чином, використання двофазного сплаву може забезпечити помітний вигравш у пластичності при рівній міцності з однофазними  $\alpha$ -сплавами лише за наявності в них дрібнозернистої структури.

Наявність змішаної  $\alpha+\beta$ -структури в сплавах обумовлює додатковий опір ковзанню дислокацій внаслідок переходу дислокацій від  $\alpha$  до  $\beta$  структури, тобто  $\beta$ -фаза може відігравати роль зміцнювальної фази. Водночас краща пластичність  $\beta$ -складової структури обумовлює кращу пластичність  $\alpha+\beta$ -сплавів.

В титанових сплавах перетворення поліморфного типу  $\beta \rightleftharpoons \alpha$  відбувається в певному інтервалі температур. Верхня межа цього інтервалу, що відповідає переходу від структури  $\alpha + \beta$  до  $\beta$ -структури, позначається як  $T_p$ ,  $T_{pp}$  (температура повного поліморфного перетворення) або  $A_{c3}$ . При низьких швидкостях охолодження перетворення  $\beta \rightarrow \alpha$  відбувається через утворення зародків кристалів нової фази та їх наступний ріст. У цьому процесі встановлюється певне орієнтаційне співвідношення між  $\alpha$ -фазою та вихідною  $\beta$ -фазою.



а

б

в

а – початок поліморфного перетворення;

б – інтервал нагрівання до температури існування  $\alpha$ -фази та нестійкої  $\beta$ -фази

в – рівноважна структура

Рисунок 1.5 - Зміна мікроструктури при фазових перетвореннях

Процес перетворення  $\beta \rightarrow \alpha$  починається незалежно від кількох ділянок міжзерної  $\beta$ -границі, що призводить до заповнення об'єму  $\beta$ -зерна декількома колоніями однаково орієнтованих  $\alpha$ -пластин (а). Така структура, іноді відома як перетворена  $\beta$ -структура, характеризується розмірами колишнього  $\beta$ -зерна ( $D$ ),  $\alpha$ -колоній ( $d$ ) та товщиною  $\alpha$ -пластин ( $l$ ). У сплавах з високим вмістом  $\beta$ -стабілізаторів,  $\alpha$ -пластини можуть бути розділені прожилками  $\beta$ -фази [14].

Якщо титан та його сплави нагрівають до температури існування  $\alpha$ -фази та нестійкої  $\beta$ -фази, при наступному охолодженні  $\alpha$ -фаза залишається, а  $\beta$ -фаза зазнає поліморфного перетворення. Це призводить до формування змішаної структури, яка складається з світлих поліедричних зерен первинної  $\alpha$ -фази та  $\beta$ -перетвореної матриці (б). Така структура відома як дуплексна. Повністю рівновісну структуру (в) можна отримати шляхом деформації в  $\alpha$ - або  $(\alpha+\beta)$ -області з подальшою рекристалізаційною обробкою при температурах нижче  $\beta$ -області [15].

Механічні властивості  $(\alpha+\beta)$ -сплавів залежать від характеру мікроструктури. Взаємозв'язок спостерігається між структурою сплавів та їхніми механічними властивостями. У сплавах зі зернистою структурою зерна  $\alpha$ - та  $\beta$ -фаз дуже дрібні, що призводить до високої циклічної міцності, пластичності та технологічності при температурах 900...950°C.

У сплавах з пластинчатою структурою спостерігається повільне поширення тріщин, що призводить до великої в'язкості руйнування, високої ударної в'язкості та жароміцності, але при цьому знижується пластичність та циклічна витривалість. Механічні властивості сплавів з пластинчатою структурою залежать від її параметрів:  $D$ ,  $d$ ,  $l$ .

Жароміцність сучасних титанових сплавів забезпечується за рахунок двох основних факторів:

Багатокомпонентне легування твердого розчину (твердорозчинне зміцнення):

Основним елементом твердого розчину є  $\alpha$ -фаза, і легування проводиться з використанням  $\alpha$ -стабілізаторів та нейтральних компонентів.

Для забезпечення термічної стабільності важливо враховувати співвідношення  $[Al]_{\text{стрекв}} < 9\%$ , щоб уникнути утворення  $\alpha_2$ -фази ( $Ti_3Al$ ) та зберегти пластичність [16].

Формування високодисперсних виділень інтерметалідних фаз (дисперсійний механізм зміцнення):

Жаромічні псевдо- $\alpha$ -сплави можуть бути леговані невеликою кількістю тугоплавкими ізоморфними  $\beta$ -стабілізаторами (наприклад, молібденом), що підвищують силу міжатомного зв'язку при робочих температурах і зменшують температури поліморфного перетворення.

Додавання елементів, які блокують дислокації та заважають переповзанню і поперечному ковзанню (наприклад, кремній), може бути корисним для покращення механічних властивостей.

Принципи легування ( $\alpha+\beta$ )-сплавів розглядаються також, враховуючи перехідні  $\beta$ -стабілізатори, ізоморфні та евтектоїдні  $\beta$ -стабілізатори. Підкреслюється важливість балансу між вмістом елементів для досягнення високих механічних властивостей та термічної стабільності.

Щодо псевдо- $\beta$ -титанових сплавів, наголошується на важливості вмісту  $\beta$ -стабілізаторів для запобігання утворенню  $\omega$ -фази, збереженню пластичності та ефективному термічному зміцненні. Одночасно, легування повинно бути розумним з погляду економічності та маси виробу [17].

### 1.3 Термічна обробка сплавів для лопаток ГТД

Термічна обробка є необхідною складовою технологічного процесу при виготовленні металевих виробів. Ця процедура включає в себе певний цикл нагрівання та охолодження металу з метою досягнення визначеної структури, покращення механічних та експлуатаційних характеристик, а також підвищення якості виробу.

В процесі повільного охолодження вихідні зерна фази  $\beta$  під час поліморфного перетворення  $\beta \rightarrow \alpha$  розкладаються на декілька менших зерен фази  $\alpha$ . Згідно з орієнтаційним співвідношенням  $((011)\beta \parallel (0001)\alpha; \parallel$  (орієнтаційне співвідношення Бюргерса)), сусідні зерна фази  $\alpha$  мають подібні орієнтації. Це призводить до виникнення текстури всередині кожного зерна

(внутрішньозеренна текстура). Мікроструктура має пластинчасту будову і визначається розмірами початкового зерна  $\beta$  ( $D$ ),  $\alpha$ -колоній ( $d$ ) та товщиною  $\alpha$ -пластин ( $l$ ). У сплавах з високим вмістом  $\beta$ -стабілізаторів  $\alpha$ -пластини розділені смугами фази  $\beta$ .

Отримати рівноважну (зернисту) структуру в  $\alpha + \beta$ -сплавах можна шляхом деформації з області фази  $\alpha$  або ( $\alpha + \beta$ ) з подальшою рекристалізацією при температурах нижче області фази  $\beta$ . Механічні властивості  $\alpha + \beta$  - сплавів залежать від мікроструктури [18]:

Сплави з зернистою структурою мають високу циклічну міцність, пластичність і технологічність. Зерна  $\alpha$  - і  $\beta$  - фаз дуже дрібні, що забезпечує високу пластичність при 900...950 °С.

Сплави з пластинчастою структурою характеризуються низькою швидкістю розповсюдження тріщин, високою в'язкістю руйнування, високою ударною в'язкістю і термостійкістю, але при цьому показники пластичності та циклічної міцності зменшуються. Механічні властивості залежать від параметрів структури:  $D$ ,  $d$ ,  $l$ .

Зміцнення сплавів  $\alpha+\beta$  можна досягти різними режимами термічної обробки:

Мінімальні значення напруження  $\sigma_B$  та максимальна пластичність можуть бути отримані після ізотермічного відпалу.

Середні значення напруження  $\sigma_B$  та пластичності можна досягнути після подвійного відпалу (або м'якого закалювання з подальшим старінням).

Максимальні значення напруження  $\sigma_B$  та мінімальна пластичність можуть бути отримані після закалювання у воді та старіння.

Відпал ( $\alpha+\beta$ ) - сплавів поєднує елементи відпалу першого і другого роду. Температура відпалу ( $\alpha+\beta$ ) - титанових сплавів повинна бути достатньо високою для зняття нагартовки і достатньо низькою для забезпечення стабільності  $\beta$ -фази під час експлуатації. Нижча температура відпалу в ( $\alpha+\beta$ ) - області дозволяє досягти вищого рівня термічної стабільності  $\beta$ -фази.

Можливість впливу режимів охолодження під час відпалу на механічні властивості титанових сплавів обумовлена їхнім поліморфним перетворенням  $\beta \rightarrow \alpha$ , яке змінює кількісне співвідношення і склад фаз під час охолодження. Сплав стає більш міцним, але менш пластичним при збільшенні швидкості охолодження.

Ізотермічний і подвійний відпал ( $\alpha+\beta$ ) - сплавів виконуються при температурах відповідно до ( $\alpha+\beta$ ) - області. Вища ступінь цих відпалів відбувається при високих температурах, де розвивається рекристалізація. Низькотемпературна ступінь цих відпалів приблизно співпадає з температурним інтервалом відпалу для зменшення залишкових напружень. В таблиці 1.1 наведено режими відпалу для деяких марок титанових сплавів [19].

Таблиця 1.1 – Режими відпалу для титанових сплавів

Сплав	Ізотермічний відпал*				Подвійний відпал*			
	t <sub>1</sub> , °C	τ <sub>1</sub> , год	t <sub>2</sub> , °C	τ <sub>2</sub> , год	t <sub>1</sub> , °C	τ <sub>1</sub> , год	t <sub>2</sub> , °C	τ <sub>2</sub> , год
BT3-1	870-	1-4	600-650	2	870-	1-4	550-	2-5
BT8, BT8M	920	1-4		1	920	1-4	600	1
BT9	920-	1-4	570-600	6	920-	1-4	570-	6
BT14	950	0,4-1		0,5	950	-	600	-
BT18У	950-980	-	530-580	-	950-980	1-4	530-580	6
BT25У	790-810	-	640-660	-	-	1-4	-	6
BT6**		-		-	900-980	-	600	-
	-		-		950-970		530-570	

Особливістю двофазних сплавів є сильна залежність їхньої структури від швидкості охолодження після гарячої деформації. Це пов'язано з поліморфним перетворенням, під час якого змінюється кількісне співвідношення і склад фаз. Процес формування структури деформованих двофазних сплавів можна

розділити на два етапи: формування структури під впливом деформації і формування її під час охолодження після деформації [20].

При швидкому охолодженні відбувається мартенситне перетворення, і як ізоморфні, так і евтектоїдні  $\beta$  - стабілізатори знижують температуру цього перетворення у титані. Таке охолодження призводить до більш тонкої внутрішньозеренної структури, а  $\beta$  - фаза стає більш метастабільною і здатною до структурного зміцнення на другому етапі відпалу. Збільшення швидкості охолодження призводить до збільшення міцності сплаву за рахунок зміцнення.

Зі збільшенням вмісту  $\beta$ -стабілізаторів спостерігається збільшення кількості  $\beta$ -фази та суттєве подрібнення структури. Ці зміни визначають зміну властивостей титану при збільшенні концентрації  $\beta$ -стабілізаторів.

У випадку сплаву VT3-1, звичайний відпал при температурах вище початку рекристалізації і нижче температури поліморфного перетворення призводить до часткового розпаду метастабільної  $\beta$ -фази на ділянки з гетерофазною структурою. Така структура нестабільна і схильна до розпаду при температурі експлуатації. Стабільну структуру і властивості сплаву VT3-1 забезпечує ізотермічний відпал, після якого формується стабільна двофазна ( $\alpha+\beta$ )-структура. Це забезпечує високу границю міцності (1000 МПа), максимальну пластичність і високу термічну стабільність протягом тривалого періоду експлуатації при робочих температурах



Рисунок 1.6 – Залежність температури мартенситного перетворення титанових сплавів від вмісту  $\beta$  - стабілізаторів

Відпал при високих температурах в  $\alpha+\beta$ -області призводить до рекристалізації та постійного укрупнення зерен  $\alpha$ -фази. При збільшенні температури відпалу вище точки  $A_{c3}$  значно збільшуються розміри зерна первинної  $\beta$ -фази. Під час наступного охолодження відбувається  $\beta\leftrightarrow\alpha$  перетворення, формуючи пластинчасту структуру всередині вихідного  $\beta$ -зерна [19].

Щодо сплавів ВТ8 і ВТ9, після першого відпалу при температурі вище початку рекристалізації, але нижче точки  $A_{c3}$ , в процесі охолодження на повітрі відбувається частковий розпад метастабільної  $\beta$ -фази. При підвищенні температури першого відпалу до  $870-920^{\circ}\text{C}$  спостерігається ріст тимчасового опору розриву.

Підвищення температури другого відпалу до  $550^{\circ}\text{C}$  призводить до коагуляції продуктів розпаду і деякого зниження тимчасового опору розриву порівняно з  $450^{\circ}\text{C}$ . При підвищених температурах другого відпалу ( $600\dots 700^{\circ}\text{C}$ ) відбувається падіння міцності через укрупнення структури. Після першого відпалу при  $750-850^{\circ}\text{C}$  сплави містять близько 8-10%  $\beta$ -фази, решта  $\alpha$ -фаза. Після другого відпалу при  $530^{\circ}\text{C}$  майже не змінюється характер мікроструктури сплавів. Відпал при  $950^{\circ}\text{C}$  з охолодженням на повітрі призводить до збереження приблизно 9%  $\beta$  – фази.

Структура після першого відпалу включає  $\alpha+\beta+\beta_{\text{м}}$  (при охолодженні частково відбувається перетворення  $\beta\rightarrow\alpha$ ). Після другого відпалу відбувається перетворення  $\beta_{\text{м}}\rightarrow\alpha+\beta_{\text{стаб}}$ .

Зміцнювальні термічні обробки застосовуються до  $(\alpha+\beta)$ - та  $\beta$ -сплавів, якщо вихідна структура є рівноважною та дрібнозернистою, а не пластинчастою. Для виправлення ливарних дефектів та покращення механічних властивостей литого металу, фасонні відливки піддають газостатичній обробці за температур  $950-1000^{\circ}\text{C}$  під тиском  $75-100\text{МПа}$  [20].

Ливарні псевдо- $\beta$ -сплави, такі як ВТ35Л, використовуються в термічно зміцненому стані. Ці сплави мають особливість: вони мають метастабільну структуру  $\beta$ -твердого розчину відразу після лиття, тому не потребують

процесу гартування; фасонні відливки їх піддають лише старінню. Режими зміцнювальної термічної обробки наведені в таблиці 1.2

Таблиця 1.2 - Режими зміцнювальної термічної обробки промислових титанових сплавів

Сплав	Температура, °C		Тривалість старіння, год
	нагріву під гартування	старіння	
BT6	900-950	450-550	2-4
BT6c	880-930	450-500	2-4
BT3-1	840-900	500-620	1-6
BT8, BT8M	920-940	500-600	1-6
BT9	920-940	570	1-6
BT14	870-910	480-560	8-16
BT23	780-800	450-520	10
BT16	800-820	540-570	6-10
BT22	700-760	500-560	8-16
BT15	700-800	450-500	15-25
BT32	780*	480-520*	4-8
BT35	740-760**	490*-520*	8*-16
* Нагрівання у вакуумній печі.			
** Нагрівання та охолодження у вакуумній печі зі швидкістю більш 6-12°C/хв.			

У  $\alpha$ -сплавах, які, згідно з діаграмами рівноваги, вважаються однофазними, практично завжди виявляється присутність другої фази. Кількість цієї другої фази зростає разом із збільшенням вмісту легувального елемента і становить приблизно 1-2%. В  $\alpha$ -сплавах ця друга фаза представлена концентраційною неоднорідністю, подібно до технічного титану, або фазою з граткою  $\beta$ -титану [21].

## 2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

### 2.1 Хімічний склад досліджуваних сплавів

За останній значний період часу в усьому світі спостерігається стійка тенденція до збільшення використання жароміцних титанових сплавів у конструкціях різних типів і призначень. Це пояснюється комбінацією високих технологічних та експлуатаційних характеристик цих сплавів. Жароміцні титанові сплави широко застосовуються в сучасному виробництві для виготовлення виробів, які піддаються статичним, циклічним, повторно-статичним навантаженням. Вони також доводяться ефективними у випадках, коли вироби схильні до негативного впливу процесів газової корозії. В таблиці 2.1 наведено хімічний склад титанових сплавів для лопаток ГТД які досліджуються в даній роботі. .

Таблиця 2.1– Хімічний склад сплавів BT3-1 та BT8

Сплав	Вміст елементів, % (мас.)										
	Ti	Al	Mo	Zr	Cr	Si	Fe	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	C
BT3-1	основа	5,5 - 7,0	2,05 -3,0	≤ 0,5	0,8 - 2,3	0,15 -0,4	0,2- 0,7	≤ 0,18	≤ 0,015	≤ 0,05	≤ 0,10
BT8		5,8 - 7,0	2,8- 3,8	0,5	-	0,2- 0,4	≤0,3	≤ 0,15	≤ 0,015	≤ 0,05	

### 2.2 Дослідження механічних характеристик

На універсальній випробувальній машині УМЕ-10Т проводились випробування на розтяг циліндричних зразків з робочою частиною у вигляді

циліндру. Для цих зразків було встановлено співвідношення довжини до діаметру  $l_0/d_0=10$ , де  $d_0=10$  (основний діаметр) та  $l_0=100$  мм (довжина). Зразок фіксувався у захватах та піддавався розтягуванню на даній випробувальній машині.

Ці випробування відповідали певним стандартам, які визначають методи оцінки таких параметрів, як модуль пружності  $E$ , границя пропорційності  $\sigma_{пц}$ , границя міцності  $\sigma_{0.02}$ , границя плинності умовної  $\sigma_{0.2}$ , фізична границя міцності  $\sigma_t$ , тимчасовий опір (границя міцності)  $\sigma_v$ , відносне рівномірне подовження  $\delta_r$ , відносне подовження після розриву  $\delta$  та відносне звуження поперечного перерізу після розриву  $\psi$ .

Результатами цих випробувань була побудована діаграма розтягу для зразків, які були відпущені при різних температурах (рисунок 2.1).

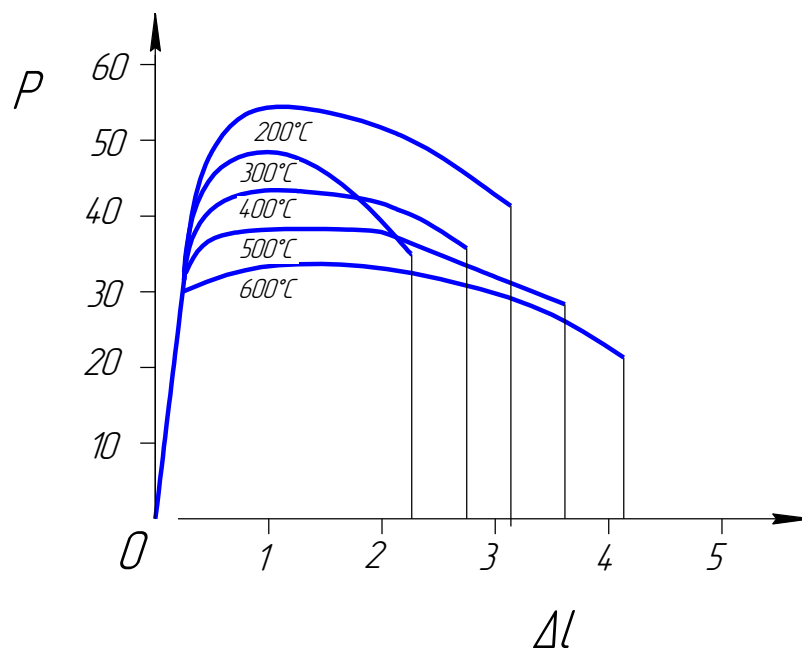


Рисунок 2.1 – Діаграма розтягу зразків із досліджуваної сталі

Ударні випробування проводилися за допомогою маятнікового копра, який мав обмежену енергію до 300 Дж. Для цих випробувань використовувалися зразки з перерізом 10x10 мм та довжиною 55 мм, які мали

U-подібний концентратор напруження для визначення КСУ (з радіусом  $r = 1$  мм) та зразки без концентратора для визначення КС.

Процес випробувань включав підняття маятника вгору та його фіксацію за допомогою шаблону. Стрілку копра встановлювали на нуль. Зразок розміщували на нижніх опорах копра таким чином, щоб він був симетрично розташований щодо опор і U-подібний надріз був спрямований в протилежну сторону від напрямку удару. Після цього, відпускаючи засувку, маятник падав, руйнуючи зразок, і рухаючись далі, переміщав стрілку за шкалою. Це дозволяло виміряти величину енергії, яка залишалася в маятнику після руйнування зразка.

Робота  $\Delta W F$ , витрачена маятником на руйнування визначалася по залежності:  $\Delta W F = G h_1 - G h_2 - W_{\text{втрат}}$ , де  $G$  - вага маятника;  $G h_1$  - потенційна енергія, запасена маятником в самому верхньому його положенні;  $G h_2$  - потенційна енергія, збережена маятником після руйнування зразка.  $W_{\text{втрат}}$  - енергія втрат, що витрачається маятником на подолання недоречних опорів (тертя в вузлах копра, опір, струшення копра і фундаменту, на зминання зразка на опорах і під ножом, на повідомлення енергії уламків зразка і на пружну деформацію штанги маятника).

Твердість HRC вимірювали у відповідності із ГОСТ 9013–76 Для визначення твердості за Роквелом застосовували прилад типу ТК-2 (твердомір конусний). За індентор було обрано алмазний конус з кутом при вершині  $120^\circ$ , із  $P_0 = 98\text{Н}$ ,  $P_1 = 1373\text{Н}$ ,  $P = 1471\text{Н}$ . Твердість за Роквелом виражається в одиницях умовної шкали і визначалася як різниця глибин проникнення індентора після попереднього ( $P_0$ ) та основного ( $P_1$ ) навантаження. Для вимірювання твердості можна використовувати зразки з наступними розмірами  $10 \times 10 \times 20$  мм або  $10 \times 10 \times 30$  мм

До проведення випробування висуваються наступні вимоги:

- випробування проводять при температурі  $20^\circ\text{C}$ ;
- під час випробування пристрій повинен бути захищеним від ударів та вібрацій;

- опорні поверхні робочого столика-підставки та зразка повинні бути очищеними від сторонніх речовин. Зразок повинен лежати на підставці стійко, без зміщення та прогину під час випробування;

- перші три вимірювання після зміни наконечника, робочого столика або підставки є пробними і не записуються в протокол випробування;

- границя вимірювання твердості за шкалою С: 20...67 одиниць.

При вимірюванні твердості повинні бути дотримані наступні умови:

- перпендикулярність навантаження, що діє, до випробовуваної поверхні зразка виробу;

- плавне прикладання попереднього навантаження  $P_0$  ;

- плавне прикладання протягом 2...8 с основного навантаження до максимального значення;

- плавне зняття через 2 с основного навантаження після різкого уповільнення руху стрілки індикатора.

Відлік результатів вимірювання твердості за шкалою індикатора з їх округленням до 0,5 ділення шкали проводять при дії попереднього навантаження  $P_0$ , що продовжується.

Відстань між центрами двох сусідніх відбитків або від центру відбитку до краю зразка повинно складати не менше 3 мм, якщо в нормативно-технічній документації на металопродукцію не встановлені інші вимоги.

Кількість відбитків при визначенні твердості за Роквелом вказують в нормативно-технічній документації на металопродукцію.

### 2.3 Дослідження мікроструктури

Дослідження мікроструктури сталі виконували за допомогою методів оптичної та електронної мікроскопії. Для підготовки металографічних шліфів використовували такі операції: вирізання зразка, його обробка, шліфування,

полірування та травлення. Процес шліфування починали з більш абразивного паперу (з номером 60), згодом переходили до дрібнішого та завершували на папері з номером 220-280. Зразок шліфували, притискаючи його до обертаючогося диска. Після кожного змінюваного паперу зразок очищали від наждачного пилю та шліфували, поки не зникав слід попередньої обробки. Після тонкого шліфування зразок мили водою, щоб видалити залишки абразиву, та полірували.

Механічне полірування виконували протягом 8-10 секунд на спеціальному верстаті з фетровим диском, змоченим розчином  $H_2O$  та  $Al_2O_3$ . Для металографічного дослідження мікроструктури зразки піддавали щавленню у реактиві.

Для вивчення мікроструктури металів використовували горизонтальний металографічний мікроскоп МІМ-8. Він мав можливість проводити дослідження у світлому полі, темному полі, у поляризованому світлі, а також мав різні насадки та об'єктиви для збільшення від  $\times 100$  до  $\times 1350$ . Предметний столик мікроскопа мав механізми для координатного переміщення об'єкта. Освітлення забезпечувалося від електролампи розжарювання потужністю 170Вт.

Для отримання зображень досліджуваних поверхонь в цифровому форматі використовували окулярну веб-камеру UMD300.

#### 2.4 Рентгеноструктурний аналіз

Для аналізу кристалічної структури металевих матеріалів часто використовують метод рентгеноструктурного аналізу (РСА). Цей метод ґрунтується на взаємодії рентгенівського випромінювання з електронами металу, що спричиняє дифракцію рентгенівських променів (довжина хвилі 0,02 - 0,2 нм).

Крім цього, РСА використовується для ідентифікації фаз і частинок за їх кристалоструктурними параметрами. Для проведення цього аналізу застосовують рентгенівські камери та дифрактометри.

Дослідження структури металевих матеріалів різними методами дозволяє вивчити внутрішню будову матеріалів, процеси перетворень, що відбуваються у структурі під час зовнішніх обробок.

Рентгеноструктурний аналіз титанових сплавів - це метод, що використовується для вивчення кристалічної структури матеріалу за допомогою рентгенівського випромінювання. Цей метод є досить важливим у дослідженні титанових сплавів через їх широке застосування у промисловості та інженерії.

Основний принцип рентгеноструктурного аналізу полягає в тому, що рентгенівські промені, що проходять через зразок, взаємодіють з його кристалічною структурою, відбиваючись або пропускаючись через неї. Ця взаємодія викликає дифракцію променів, що має відношення до розташування атомів у матеріалі. Дифракційні відбитки, отримані під час експерименту, дозволяють отримати інформацію про кристалічну структуру, орієнтацію та параметри кристалів у титанових сплавах.

Застосування рентгеноструктурного аналізу дозволяє визначити такі параметри, як кристалічні фази, розмір і форму кристалів, їхню орієнтацію, а також можливі дефекти в кристалічній ґратці (такі як дислокації чи деформації).

Методика рентгеноструктурного аналізу титанових сплавів базується на принципах рентгенівської дифракції та вимірювання рентгенівських променів, які взаємодіють з кристалічною структурою матеріалу. Основні етапи методики включають такі кроки:

Підготовка зразка: Це включає в себе виготовлення зразків титанових сплавів у формі монокристалів або порошків та їх підготовку для дослідження. Зразки повинні бути адекватно підготовлені, з урахуванням їхньої форми та структури.

Експериментальний аналіз: Зразок розміщується в рентгенівському промені, і рентгенівське випромінювання розсіюється на атомах матеріалу. Це відбиття (або дифракція) променів вимірюється за допомогою детекторів.

Опрацювання отриманих даних: Отримані дифракційні відбитки аналізуються та обробляються. Це включає ідентифікацію кристалічних фаз, визначення орієнтації кристалів, розміру кристалів та інших параметрів кристалічної структури.

Інтерпретація результатів: Отримані дані дозволяють побачити структуру та взаєморозташування атомів у матеріалі, виявити можливі дефекти та деформації кристалічної ґратки.

Застосування отриманих знань: Інформація, отримана з рентгеноструктурного аналізу, допомагає розуміти структуру та властивості матеріалу, що може бути корисним для подальших досліджень, розробки нових матеріалів або для вирішення конкретних завдань у різних галузях індустрії та науки.

Отримані дані з рентгеноструктурного аналізу титанових сплавів є важливими для розуміння їхньої мікроструктури та властивостей, що в свою чергу визначає їхнє можливе використання у різних галузях промисловості, від авіаційного та медичного до виробництва спортивного обладнання.

### 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

#### 3.1 Дослідження впливу термічної обробки на жароміцні титанові сплави

Під час термічної обробки титанових сплавів відбуваються складні фазові перетворення, які супроводжуються перерозподілом легуючих елементів і формуванням різноманітних метастабільних фаз з різним ступенем легованості. Ці процеси значно впливають на фізичні, механічні, технологічні та експлуатаційні характеристики титанових сплавів. Оскільки титанові сплави природно володіють властивістю змінювати співвідношення фаз, ступінь легованості та морфологію структурних компонентів, це відкриває можливість широкого варіювання властивостей виготовлених виробів. Хімічний склад досліджуваних сплавів наведено в таблиці 2.1

Під час дослідження вивчалися фазові перетворення в широкому температурному діапазоні від 200 до 1100°C. Це включало нагрівання до зазначених температур від кімнатної та охолодження після утримання при високій температурі в однофазній області. Такий підхід дозволяв враховувати вплив початкової структури зразків та нерівномірного розподілу легувальних елементів.

Режим зміцнювальної термічної обробки сплаву ВТ3-1 наведено в таблиці 3.1

Таблиця 3.1 – Режим зміцнювальної термічної обробки титанового сплаву ВТ3-1

Марка сплаву	$T_{\text{пн}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{гар}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{стар}}, ^\circ\text{C}$	Тривалість старіння, год
ВТ3-1	960...1000	860...900	500...620	1...6

Фазовий склад зразків, який представлено у таблицях 3.2 та 3.3, варіювався в залежності від режимів термічної обробки. З наданих даних видно, що параметри термічної обробки суттєво впливали на склад фаз у матеріалі.

Таблиця 3.2 - Фазовий склад зразків титанового сплаву в залежності від температури гартування

Температура °С	Фазовий склад	Кількість $\beta$ -фази
100	$\alpha$ - $\beta$	24,0
200	$\alpha$ - $\beta$	17,0
300	$\alpha$ - $\beta$	13,0
400	$\alpha$ - $\beta$	9,0
500	$\alpha$ - $\beta$	6,0
600	$\alpha$ - $\beta$	4,0
700	$\alpha$ - $\beta$	14,0
800	$\alpha$ - $\beta_{\text{нест}}$	20,0
820	$\alpha$ - $\beta_{\text{нест}}$	50,5
840	$\alpha$ - $\beta_{\text{нест}}$	41,0
860	$\alpha$ - $\alpha''$ - $\beta$	34,0
900	$\alpha$ - $\alpha''$ - $\beta$	4,0
930	$\alpha(\alpha')$ - $\alpha''$ - $\beta$	-
980	$\alpha'$	0
1050	$\alpha'$	0
1100	$\alpha'$	0
1200	$\alpha'$	0

При низьких температурах (100...500°C), переважає фаза  $\alpha$ - $\beta$ , причому кількість  $\beta$ -фази зменшується зі збільшенням температури. При 700°C відбувається вище середньої кількості  $\beta$  - фази, що може бути зумовлено

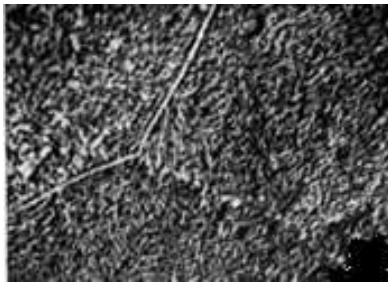
конкретними умовами термічної обробки. При 800...860°C спостерігається поява нових фаз, таких як  $\alpha$ - $\beta_{\text{нест}}$  та  $\alpha''$  -  $\beta$ . При 900°C і вище, фаза  $\alpha'$  переважає, і при подальшому збільшенні температури її кількість залишається стабільною.

Таблиця 3.3 - Вміст фаз у зразках титанового сплаву в залежності від температури тривалої витримки

Обробка в $\beta$ -області	Температура витримки, °C	Час витримки, хв	Фазовий склад	Обробка в $\beta$ -області
980°C, 10 хв	960	5	$\alpha$ - $\alpha'$ - $\beta$	-
		90	$\alpha$ - $\alpha'$ - $\beta$	
	930	5	$\alpha$ - $\alpha'$ - $\alpha''$ - $\beta$	10
		30	$\alpha(\alpha')$ - $\alpha''$ - $\beta$	8
		60	$\alpha$ - $\alpha''$ - $\beta$	7
	900	3	$\alpha$ - $\alpha'$ - $\alpha''$ - $\beta$	10
		5	$\alpha$ - $\alpha'$ - $\alpha''$ - $\beta$	6
		20	$\alpha$ - $\alpha''$ - $\beta$	9
		30	$\alpha$ - $\alpha''$ - $\beta$	7
	600	5	$\alpha$ - $\beta$	25
		60	$\alpha$ - $\beta$	23

Аналіз даних таблиці вказує на велику чутливість фазового складу до температури витримки та часу утримання в  $\beta$ -області. Зміни в параметрах обробки значно впливають на структурні характеристики матеріалу, що може мати суттєві наслідки для його механічних властивостей та умов експлуатації.

Мікроструктура сплаву ВТЗ-1 після різних режимів термічної обробки вказані на рисунку 3.1



а



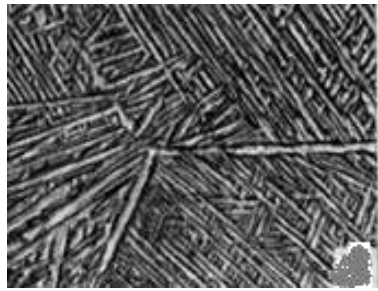
б



в



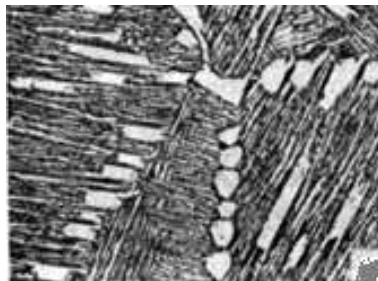
г



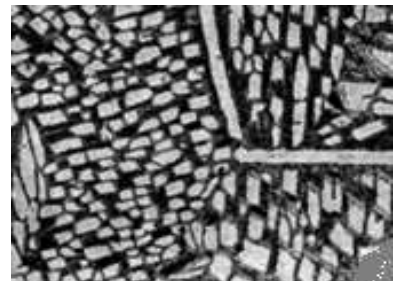
д



е



ж



з

×200

а – 1150°C, вода; б - 1150°C, повітря; в - 1150°C, піч; г - 1150°C, вода + 950°C, 1 год, повітря; д - 1150°C, повітря + 920°C, 1 год, піч; е - 1150°C, повітря + 950°C, 1 год, піч; ж - 1150°C, піч + 960°C, 10 год, піч; з - 1150°C, піч + 920°C, 50 год, піч

Рисунок 3.1 - Структура пластинчастого типу сплаву VT3-1 в залежності від режиму термічної обробки

Структура недеформованих титанових сплавів характеризується великими зернами  $\beta$  - фази та пластинчастою будовою внутрішньозеренної  $\alpha$  - фази різної дисперсності.

Під час нагрівання та витримки при температурах однофазної  $\alpha$ -області в  $\alpha$ -сплавах спостерігається збільшення товщини  $\alpha$ -пластин та глобуляризація виділень другої фази. Якщо ці виділення перед нагрівом були тонкими прошарками, то відбувається їхня коагуляція. Важливо відзначити, що структура  $\alpha$ -сплавів у цьому випадку залишається майже незмінною незалежно від швидкості охолодження.

Нагрівання титанових сплавів у двофазній  $(\alpha+\beta)$ -області супроводжується зменшенням кількості  $\alpha$  - фази до її повного зникнення при температурі, що відповідає  $\beta$  - області. Витримка при температурі нагріву призводить до збільшення товщини  $\alpha$ -пластин та  $\beta$  - прошарків. Укрупнення структури відбувається дуже повільно. Під час нагрівання зміни розмірів  $\alpha$ -колоній та  $\beta$  - зерен виявляються незначними. Проте, при нагріванні та витримці відбувається зникнення дрібніших  $\alpha$ -колоній та  $\beta$  - зерен, що призводить до збільшення середніх розмірів цих структурних елементів у відпаленому стані.

Під час експериментальних досліджень виявлено наступні особливості фазових перетворень у титанових сплавах:

- в всіх досліджених зразках утворюються фази  $\alpha$  -  $\beta$  при температурах нижче 700 °С як при нагріванні, так і при охолодженні;

- під час нагрівання та охолодження спостерігається утворення численних метастабільних перехідних станів, які під час закалювання зафіксовані у вигляді  $\beta_{\text{нест}}$  і мартенситних фаз ( $\alpha'$ ,  $\alpha''$ ).

- фазовий склад зразків сплаву ВТЗ - 1, попередньо оброблених при температурах  $\beta$ -області, змінюється в залежності від часу витримки при температурах 930 °С і 900 °С.

- фазові перетворення в титанових сплавах пов'язані з перерозподілом компонентів між  $\alpha$ - і  $\beta$  - фазами через їхню різну розчинність. Значення

розчинності легувальних елементів, згідно з даними, які представлені у таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 - Механічні характеристики, фазовий склад та кількість  $\beta$ -фази в зразках зазнали змін до та після проведення термічної обробки

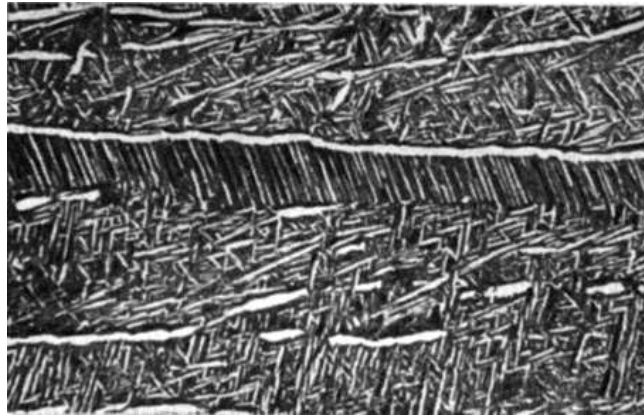
Режими термічної обробки	Механічні властивості			Фазовий склад	Кількість $\beta$ -фази, %
	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %		
Вихідний зразок	1030	9	20,3	$\alpha$ - $\beta$	-
Режим 1	1370	2,5	10,0	$\alpha$ - $\alpha'$ - $\beta$	-
Режим 2	1200	7,0	14,8	$\alpha$ - $\alpha''$ - $\beta$	8
Режим 3	1130	5,0	13,0	$\alpha$ - $\beta$	25-28
Режим 4	1100	6,0	21,0	$\alpha$ - $\beta$	~20

Зміцнювальна термічна обробка деформованого сплаву ВТЗ-1 за режимами 2...4 призводила до підвищення границі міцності при задовільній пластичності. Проте, після термічної обробки за режимом 1 сплав ВТЗ-1 характеризувався низькими значеннями відносного подовження та відносного звуження.

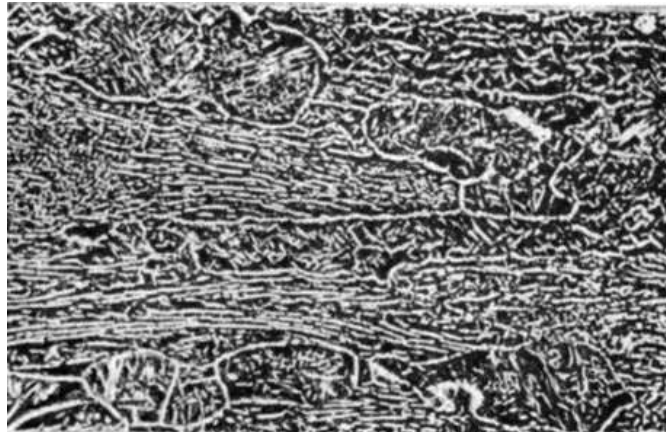
Це пояснюється утворенням після гартування великогольчастої  $\alpha'$ -фази, яка при старінні приводила до формування голчастих виділень вторинної  $\alpha$ -фази. Зазначено, що уникнення утворення мартенситної  $\alpha'$ -фази під час гартування є критичним. Це може бути досягнуте вибором оптимальних режимів термічної обробки (режими 2...4), які забезпечать покращення механічних характеристик сплаву без формування небажаних фаз та структур.

Вихідна структура сплавів, які були деформовані в  $\beta$ -області, зазвичай виявляється наявністю характерних витягнутих в напрямку деформації металу  $\beta$ -зерен та дрібних рівновісних  $\beta$ -зерен. Останні формуються під час процесу

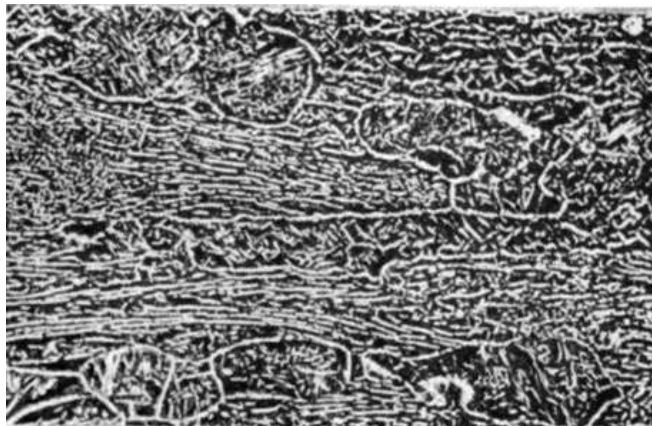
рекристалізації під впливом деформації. Границі  $\beta$ -зерен оточені зернами  $\alpha$ -фази (рисунок 3.2).



а



б



в

Рисунок 3.2 - Структура сплаву VT3-1 після деформації в  $\beta$ -області та відпалу за режимом: 870°C, 1 год, перенесення в піч, витримка при 650°C, 2 год, охолодження на повітрі

При підвищенні температури сплаву з описаною структурою до області  $(\alpha+\beta)$ ,  $\alpha$ -фаза стабілізує структуру  $\beta$ -фази, і розмір та форма  $\beta$ -зерен залишаються практично незмінними. Зміни внутрішньозеренної структури деформованих в  $\beta$ -області сплавів при відпалюванні в  $(\alpha+\beta)$ -області аналогічні змінам у недеформованих сплавах.

Підвищення температури відпалу до рівня, що відповідає  $\beta$ -області, суттєво прискорює ріст рекристалізованих зерен за рахунок деформованих (збиральна рекристалізація). Інтенсивний ріст  $\beta$ -зерен в сплавах, відпалених з температур  $\beta$ -області, приводить до формування грубозернистої структури, де розмір  $\beta$ -зерна може сягати декількох сотень мікрон.

При охолодженні з  $\beta$ -області внутрішньозеренна будова залежить від швидкості охолодження, аналогічно сплавам, які не були деформовані.

### 3.2 Розрахунки тривалості нагрівання лапаток ГТД

Як основне обладнання для здійснення основної операції термічної обробки (відпал) використовується елеваторна вакуумна піч. Це дозволяє уникнути окислення.

Загальний час визначається за формулою:

$$\tau_{\text{заг}} = \tau_{\text{н}} + \tau_{\text{в}} + \tau_{\text{ох}}, \quad (3.1)$$

де  $\tau_{\text{н}}$  – час нагрівання до заданої температури, хв;

$\tau_{\text{в}}$  – час витримки при технологічній температурі, хв.

$\tau_{\text{ох}}$  – час охолодження, хв.

Час нагрівання виробу до заданої температури розраховується за формулою:

$$\tau_{\text{н}} = S \times k \times f \times L_{\text{л}} \quad (3.2)$$

де  $S$  – характеристичний розмір виробу (діаметр кулі, циліндру, найменше ребро призми і т.ін.), мм;  $S=5,3$  мм;

$k=2$  – коефіцієнт форми;

$f=2$  – коефіцієнт розташування виробів в нагрівальному пристрої, що впливає на час нагрівання;

$L_L$  – коефіцієнт легування сталі, хв/мм. При проведенні термічної обробки сплавів на основі нікелю, титану, алюмінію, магнію слід враховувати теплофізичні параметри цих матеріалів, застосовуючи при розрахунках часу нагрівання поправочні коефіцієнти. Відоме значення коефіцієнта легування  $L_L$  для сталей замінити модифікованим коефіцієнтом легування:  $L=f(c/\lambda)$ ; Підраховуємо коефіцієнт легування за формулою:

$$L_{ст} = \frac{C_{спл} \cdot \lambda_{ст}}{C_{ст} \cdot \lambda_{спл}} \quad (3.2)$$

де  $C$ -теплоємність, кДж/(кгК),

$\lambda$ -теплопровідність Вт/(мК)

$C_{спл}=0,712$  кДж/(кгК),  $C_{ст}=0,549$  кДж/(кгК);  $\lambda_{спл}=31,275$  Вт/(мК),  $\lambda_{ст}=47$  Вт/(мК);

$L_{Ti}=1,5$

Для робочої лопатки компресора ГТД із сплаву ВТ8 розрахуємо необхідний час для нагрівання до  $920^{\circ}\text{C}$  для відпалення:

$$\tau_H = S \times k \times f \times L_L = 5,3 \times 2,0 \times 2,0 \times 2,92 = 61,9 \text{ хв}$$

Час витримки при нагрівання  $\tau_B$ , хв. відомий за технологічними картами, отриманими на підприємстві,  $\tau_B = 75 \text{ хв}$

Охолодження після відпалу проводиться на повітрі і буде відбуватися протягом:

$$\tau_{ох.} = (\tau_H - \tau_K) / V_{ох.} \quad (3.4)$$

де  $t_{п}$  – температура початку охолодження, °С

$t_{к}$  – температура кінця охолодження, °С

$V_{ох}$  – швидкість охолодження, 50°С/хв

$$\tau_{ох} = (920 - 20) / 5^{\circ}\text{C}/\text{c} = 180\text{c} = 3 \text{ хв}$$

Таким чином загальний час, що було затрачено на перший відпал:

$$\tau_{заг} = 61,9 + 75 + 3 = 139,9 \text{ хв}$$

Розрахуємо час, що було витрачено на другий нагрів до температури відпалювання 590°С:

$$C_{спл} = 0,712 \text{ кДж}/(\text{кгК}), C_{ст} = 0,549 \text{ кДж}/(\text{кгК});$$

$$\lambda_{спл} = 31,275 \text{ Вт}/(\text{мК}), \lambda_{ст} = 47 \text{ Вт}/(\text{мК});$$

$$L_{Ti} = 2,35$$

$$\tau_{н} = S \times k \times f \times L_{л} = 5,3 \times 2,0 \times 2,0 \times 4,58 = 97 \text{ хв}$$

Час витримки при нагрівання  $\tau_{в}$ , хв., при заданій температурі відомий за технологічними картами, отриманими на підприємстві;

$$\tau_{в} = 145 \text{ хв}$$

Охолодження після відпалу проводиться на повітрі і буде відбуватися протягом:

$$\tau_{ох} = (590 - 20) / 5^{\circ}\text{C}/\text{c} = 114\text{c} = 1,9 \text{ хв.}$$

Таким чином загальний час, що було затрачено на проведення другого відпалу:

$$\tau_{\text{заг}}=97+145+ 1.9=243,9\text{хв}$$

Лопатки зазвичай закріплюються в пристосуванні замковою частиною. Перший відпал проводиться в СЭВ-11.8/13, другий в СЭВ-11.8/6. Робоча камера нагрівального пристрою циліндрична, в якості пристосування краще обрати піддони, які встановлюються в декілька ярусів.

### 3.3 Вибір та розрахунки кількості обладнання

Вихідні дані для розрахунків кількості обладнання - річна виробнича програма, режим роботи термічного підрозділу, річний фонд часу роботи обладнання, режим термообробки виробів, карти технологічних процесів термообробки.

Річна виробнича програма: Це визначається номенклатурою виробів, їхньою масою, габаритними розмірами, кількістю та загальною масою кожного виробу, який підлягає термічній обробці. Виробнича програма підрозділу включає загальну кількість та масу виробів, які проходять обробку.

Режим роботи термічного підрозділу: Це визначає, як обладнання працює протягом року, включаючи робочі години, дні тижня, можливі перерви або сезонні зміни у виробничому графіку.

Річний фонд часу роботи обладнання: Це відображає загальну кількість годин, протягом яких обладнання може функціонувати протягом року, враховуючи можливі технічні перерви або технічне обслуговування. Річна виробнича програма представлена в таблиці 3.5

Таблиця 3.5 - Річна виробнича програма

Назва виробу	Матеріал	Маса 1 шт., кг	Габаритні розміри, мм	Виробнича програма	
				шт.	кг
1	2	3	4	5	6
Група робочих лопаток компресора ГТД					
Лопатка	BT8	0,0069	h= 26,6 $\delta = 5,3$ b = 11	1660210	11455,45
Лопатка	BT8	0,0066	h= 26,4 $\delta = 5,3$ b = 10,5	1660209	10957,38
Лопатка	BT8	0,0062	h= 26,4 $\delta = 5,3$ b=10	1660209	10293,30
Лопатка	BT8	0,012	h= 35,6 $\delta = 7,5$ b=10,2	1660210	19922,52
Лопатка	BT3-1	0,016	h= 46 $\delta = 8$ b=10	1660210	26563,36
Лопатка	BT3-1	0,035	h= 61,8 $\delta = 8$ b=15,8	1660210	58107,36
Лопатка	BT3-1	0,056	h= 76,1 $\delta = 11$ b=15	1660210	92971,77
Разом				4980630	300000

Дійсний фонд часу роботи обладнання  $\Phi_d$  залежить від прийнятого режиму роботи, тривалості зміни, втрат часу і визначається за формулою:

$$\Phi_d = (365 - D_{\text{вих}} - D_{\text{св}}) \times K_{\text{зм}} \times T_{\text{зм}} \times K_{\text{вик}}, \quad (3.5)$$

де  $D_{\text{вих}}$  - кількість вихідних днів за рік;

$D_{\text{св}}$  - кількість святкових днів за рік;

$K_{\text{зм}}$  - кількість змін за добу;

$T_{\text{зм}}$  - тривалість однієї зміни, год;

$K_{\text{вик}}$  - коефіцієнт використання часу роботи обладнання.

Режим роботи термічного підрозділу проводиться в 2 зміни.

Дійсний фонд часу роботи обладнання :

$$\Phi_d = 251 \times 2 \times 8 \times 0,92 = 3694 \text{ год}$$

Кількість садок на рік розраховується за формулою:

$$N_i = M_{\text{pi}} / \Pi_{\text{ci}} \quad (3.6)$$

Необхідний час роботи печі для обробки  $i$ -того виробу розраховують за формулою:

$$T_i = N_i \times \tau_{\text{заг}i} \quad (3.7)$$

Загальна тривалість роботи обладнання  $T_3$  для обробки деталей, передбачених річною програмою:

$$T_3 = \sum T_i \quad (3.8)$$

Кількість однотипного обладнання розраховується за формулою:

$$\Pi_p = \frac{\sum T_3}{\Phi_n} \quad (3.9)$$

Коефіцієнт завантаження обладнання:

$$K_3 = \Pi_p / \Pi_{\text{пр}} \quad (3.10)$$

де  $\Pi_{\text{пр}}$  – число  $\Pi_p$  яке отримано при розрахунках і округлене до цілого.

Таблиця 3.6 - Завантажувальна відомість для універсального обладнання періодичної дії Обладнання – СЭВ11.8/13

Назва Виробу	Матеріал	Маса l шт., кг	Виробнича програма		Садка $\text{Pc}_i$		К-сть садок на рік $N_i$ , шт.	Загальний час обробки садки $t_{\text{заг}}$ , год.	Необхідний час роботи печі $T_i$ , год.
			шт.	Кг	шт.	кг			
Лопатка	BT8	0,0069	1660210	11455,45	15780	108,8	105	2,28	239,4
Лопатка	BT8	0,0066	1660209	10957,38	17220	113,6	96	2,28	218,8
Лопатка	BT8	0,0062	1660209	10293,30	20290	125,7	81	2,28	184,6
Лопатка	BT8	0,012	1660210	19922,52	14070	168,8	117	2,15	251,5
Лопатка	BT3-1	0,016	1660210	26563,36	10145	162,1	163	3,98	648,7
Лопатка	BT3-1	0,035	1660210	58107,36	2984	104,4	556	3,98	2212,8
Лопатка	BT3-1	0,056	1660210	92971,77	2343	131,2	708	4,71	3334,6
Усього $T_3$									6838,9

$$T_3 = \sum T_i = 8235,2 \text{ год}$$

$$\Pi_p = 8235,2 / 3694 = 2,22$$

$$\Pi_{\text{пр}} = 3$$

$$K_3 = 2,22 / 3 = 0,74$$

Розробка плану дільниці (відділення, цеху) та вантажопотоків. При проектуванні відділення розраховують площу для розташування обладнання, допоміжних служб, проходів, проїздів.

Загальна площа визначається:

$$\Pi_{\text{заг}} = \Pi_{\text{кор}} + \Pi_{\text{доп}} + \Pi_{\text{прох}} \quad (3.11)$$

де  $\Pi_{\text{кор}}$  – корисна виробнича площа, необхідна для розташування обладнання;

$\Pi_{\text{доп}}$  – допоміжна площа, необхідна для розташування технологічного оснащення, деталей до та після термообробки, технологічних та допоміжних матеріалів, для організації між операційних складів, місць для формування садок та тощо.

Таблиця 3.7 - Завантажувальна відомість для івер сального обладнання періодичної дії Обладнання – СЭВ 11.8/6 .Операція термообробки – Другий відпал робочих лопаток компресора ГТД

Назва Виробу	Матеріал	Маса l шт., кг	Виробнича програма		Садка $\Pi_{\text{с}}$		К-сть садок на рік $N_i$ , шт.	Загальний час обробки садки тзаг, год.	Необхідний час роботи печі $T_i$ , год.
			шт.	Кг	шт.	кг			
Лопатка	ВТ8	0,0069	1660210	11455,45	15780	108,8	105	4,03	423,1
Лопатка	ВТ8	0,0066	1660209	10957,38	17220	113,6	96	4,03	386,8
Лопатка	ВТ8	0,0062	1660209	10293,30	20290	125,7	81	4,03	326,4
Лопатка	ВТ8	0,012	1660210	19922,52	14070	168,8	117	4,6	538,2
Лопатка	ВТ3-1	0,016	1660210	26563,36	10145	162,1	163	3,4	554,2
Лопатка	ВТ3-1	0,035	1660210	58107,36	2984	104,4	556	3,4	1890,4
Лопатка	ВТ3-1	0,056	1660210	92971,77	2343	131,2	708	4	3120
Усього Тз									9217

Розробка плану дільниці (відділення, цеху) та вантажопотоків. При проектуванні відділення розраховують площу для розташування обладнання, допоміжних служб, проходів, проїздів.

Загальна площа визначається:

$$\Pi_{\text{заг}} = \Pi_{\text{кор}} + \Pi_{\text{доп}} + \Pi_{\text{прох}} \quad (3.11)$$

де  $\Pi_{\text{кор}}$  – корисна виробнича площа, необхідна для розташування обладнання;

$\Pi_{\text{доп}}$  – допоміжна площа, необхідна для розташування технологічного оснащення, деталей до та після термообробки, технологічних та допоміжних

матеріалів, для організації між операційних складів, місць для формування садок та тощо.

$P_{\text{прох}}$  – площа проходів та проїздів.

$P_{\text{кор}}=55 \times 25=1375 \text{ м}^2$  на одиницю обладнання

$P_{\text{доп}}=0,25P_{\text{кор}}=0,25 \times 1375=343,75 \text{ м}^2$

$P_{\text{прох}}=0,25P_{\text{кор}}=343,75 \text{ м}^2$

$P_{\text{зар}}=1375+343,75+343,75=2062,5 \text{ м}^2$

Загальні габарити промислової будівлі:  $L \times B=66 \times 36=2376 \text{ м}^2$

довжина  $L=66 \text{ м}^2$ , ширина  $B=36 \text{ м}^2$

Уточнені розміри після планування:

загальні габарити промислової будівлі:  $L \times B=66 \times 30=1980 \text{ м}^2$

довжина  $L=66 \text{ м}^2$

ширина  $B=30 \text{ м}^2$

Відстань між колонами по зовнішнім стінам дорівнює 6 м, по середньому ряду колон між прольотами – 12 м.

Ширина вікон приймається 2,4 м, ширина воріт 3,9 м.

Відстань між обладнаннями та стінами 2,0 м, між печами та обладнанням 2,0 м. Транспортні проїзди 2,5 м, ширина проходів для працюючих 1,2 м. У відділені передбачається не менше двох виходів.

Для виконання підйомно-транспортних операцій, завантаження та розвантаження обладнання, ремонтів обладнання використовують мостові крани, кран-балки, консольні кран-балки, монорельсові доріжки, конвеєри, транспортні візки, електрокари, завантажувальні машини. Мостові крани використовують для транспортування виробів та садок великої маси.

Складські місця – це площадки на плані, їх позначають штриховими лініями з позначенням в центрі МС.

Також на плані відділення передбачають приміщення для майстра, пірометра, бюро технічного контролю, механіка, енергетика, а також туалети.

Для забезпечення високої якості технічних процесів розташовують в ізолюваних приміщеннях обладнання для вакуумної термообробки.

### 3.4 Дефекти, які виникають під час термічної обробки лопаток із титанових сплавів

Висока якість виробів гарантується в ході вірно проведеного вхідного, міжопераційного та завершального контролю.

Вхідний контроль включає в себе перевірку матеріалів, використовуваних для виготовлення лопаток та хімікатів. Цей вид контролю визначає хімічний склад матеріалу за допомогою спектрального аналізу, відповідність форм і розмірів деталей контролюється вимірювальними пристроями, відсутність внутрішніх і зовнішніх дефектів перевіряється рентгенівським та неруйнівними методами.

Міжопераційний контроль технологічних процесів термічної обробки включає перевірку готовності обладнання, регулювання температур, виконання витримок та інші технічні аспекти.

При поточному контролі вимірюються температура, час, схема садки, витрати середовища, тиск, структура за допомогою мікроскопа, властивості виробів після операцій, такі як твердість.

Вихідний контроль є обов'язковою операцією, оскільки після термічної обробки лопатки піддаються механічному обробленню та складальним операціям, тобто вони повинні мати необхідні структури та властивості.

Основними видами контролю якості лопаток після термічної обробки є візуальний контроль для виявлення поверхневих дефектів, контроль мікроструктури та перевірка жароміцності.

В таблиці 3.8 представлені основні види дефектів робочої лопатки компресора газової турбіни, що можуть виникнути в результаті термічної обробки.

Таблиця 3.8 - Можливі дефекти при ТО (відпал) лопаток із титанових сплавів, їх види, причини появи, заходи по запобіганню та усуненню

Вид дефекту	Причина появи	Заходи по запобіганню	Заходи по усуненню
1	2	3	4
Тріщина	Неметалеві включення та інші концентратори напружень	Вилучення неметалевих включень додатковою обробкою (переплав)	Дефект невипраний
	Завищена швидкість нагрівання	Нагрівання з регламентованою швидкістю	
	Завищена температура нагрівання	Дотримуватися регламентованої температури нагрівання	
Крупне зерно	Перегрів	Дотриманні заданих температури та часу нагрівання	Повторна термічна обробка

Продовження таблиці 3.8

1	2	3	4
Короблення	Нераціональне розташування виробів в садці	Дотримання схеми садки при її формуванні	Рихтування або механічне оброблення
Не відповідна структура	Перегрів або недостатня температура нагріву	Дотримання заданих температур	Повторне термічне оброблення
	Невідповідний сплав за хімічним складом	Проведення контролю	Не виправний дефект
Присутність в структурі після 1-го відпалу мартенситної фази	Завищена швидкість охолодження	Дотримання заданих швидкостей (охолодження на повітрі)	Дефект не виправний
Окислення	Несправність обладнання - низький вакуум	Дотримання високого вакууму	Не виправний дефект

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

У даному розділі аналізуються аспекти, пов'язані з охороною праці та безпекою під час проведення досліджень з термічної обробки сплавів для лопаток ГТД. Розглядаються заходи, спрямовані на забезпечення безпеки персоналу під час роботи з високотемпературними процесами та хімічними речовинами, які використовуються у технологічних процесах.

### 4.1 Аналіз потенційних небезпек

а) Небезпеки які пов'язані з порушеннями роботодавцями вимог НПАОП 0.00 – 7.11 – 12 «Загальні вимоги стосовно забезпечення роботодавцями охорони праці працівників», а саме вимог щодо організації та забезпечення безпеки на робочих місцях, що може бути пов'язано з не проведенням організаційних заходів щодо навчання та перевірки знань з охорони праці, інструктажів, не наданням інформації про можливі небезпеки.

б) Можливість ураження електричним струмом внаслідок порушення правил електробезпеки, несправності електроспоживаючого обладнання, що може призвести до електричних травм або летального наслідку.

в) Можливість отримання механічних травм при підготовці зразків для подальшої обробки або випробувань. В більшості випадків використовується абразивний (відрізни та шліфувальні круги) та полірувальний інструмент. Основними причинами отримання пошкоджень може бути використання не атестованого інструменту, порушення правил експлуатації обладнання, порушення методики виготовлення зразків для випробувань.

г) Можливість отруєння хімічними сполуками при виконання операції травлення зразків для дослідження структури, основними причинами є

порушення правил з охорони праці, відсутність або відмова від використання засобів індивідуального захисту.

д) Можливість отримання механічних травм при випробуванні механічних властивостей на випробувальних машинах фірми Instron, внаслідок порушення правил з охорони праці, методики проведення досліджень, правил експлуатації дослідних машин.

е) Наявність в повітряному просторі в дослідній лабораторії азбестових частинок при виконанні дослідження довготривалої міцності внаслідок відсутності або відмови від використання засобів індивідуального захисту, відсутність або недостатня ефективність системи обміну повітря, порушення методики проведення досліджень.

ж) Небезпеки пов'язані з використанням ПК при обробці отриманих при дослідженні даних.

з) Незадовільні параметри мікроклімату в приміщенні дослідницької лабораторії в наслідок не ефективної роботи систем опалення та обміну повітря, що може призвести до загальних захворювань.

и) Можливість загорянь в наслідок порушень правил пожежної безпеки, що може призвести до масштабних пожеж, а також відсутність або непрацездатність первинних засобів пожежогасіння щоб могло би дати можливість ліквідувати загоряння на первинних стадіях.

і) Небезпеки, які пов'язані з умовами праці при надзвичайних ситуаціях.

#### 4.2 Заходи забезпечення безпеки

а) Згідно вимог НПАОП 0.00 – 7.11 – 12 «Загальні вимоги стосовно забезпечення роботодавцями охорони праці працівників» передбачено, що усі працівники повинні пройти навчання та перевірку знань з питань охорони праці відповідно до «Типового положення про порядок проведення навчання і

перевірки знань з питань охорони праці», затвердженого наказом Держнаглядохоронпраці (Держпраці) від 26.01.2005 №15.

Роботодавець повинен забезпечити повну і вичерпну інформацію працівників з питань охорони праці як відносно підприємства в цілому так і відносно специфіки виконуваних робіт на робочих місцях, де зазначені можливі небезпечні ситуації та заходи для їх запобігання. Найбільш ефективним є проведення відповідних інструктажів (вступний, первинний, повторний, позаплановий та цільовий).

б) Згідно вимог НПАОП 40.1-1.01-97 «Правила безпечної експлуатації електроустановок» для безпечного проведення робіт необхідно виконати наступні організаційні заходи:

- призначити працівників, відповідальних за безпечне проведення робіт;
- видати наряд або розпорядження;
- видати дозвіл на підготовку робочих місць і на допуск;
- підготувати робочі місця та забезпечити допуск до роботи;
- забезпечити нагляд при виконанні робіт;
- при необхідності, організувати переведення на інше робоче місце;
- забезпечити оформлення перерв у роботі та порядок її закінчення.

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.

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.

На практиці, у більшості випадків, це той же самий заземлювач до якого приєднують і ВПЧ, і нейтралі трансформаторів, і блискавкоприймачи. Тільки при яких-небудь обґрунтуваннях (технологічних, з погляду безпеки і т.п.) застосовують три різні заземлювача, що обходиться значно дорожче.

Заземлення використовують також для захисту від статичної електрики, що накопичується при терті діелектриків для захисту від електромагнітних випромінювань, підключаючи екрани до заземлювача і т.п.

Захисне заземлення може бути ефективним тільки в тому випадку, якщо струм замикання на землю не збільшується зі зменшенням опору заземлення. Це можливо в мережах з ізольованою нейтраллю, де при глухому замиканні на землю або на заземлений корпус струм не залежить від провідності (або опору) заземлення, а також у мережах, напругою вище 1000 В с заземленою нейтраллю. В останньому випадку замикання на землю є коротким замиканням, при цьому спрацьовує максимальний струмовий захист.

У мережі із заземленою нейтраллю напругою до 1000 В заземлення неефективне, тому що навіть при глухому замиканні на землю струм залежить від опору заземлення та зі зменшенням останнього струм зростає.

в) Згідно з вимогами ГОСТ 21.3.028-82 «Процес обробки абразивним та ельборовим інструментом» при роботі на абразивних та полірувальних верстатах працівник повинен дотримуватися правил безпеки та інструкцій, своєчасно проходити інструктажі. Використовувати захисне обладнання для обличчя (окуляри, щитки), захисні рукавички та захисний одяг. Забезпечити ефективну вентиляційну систему для видалення абразивного пилу та частинок з робочого простору задля уникнення потрапляння в дихальні шляхи, використовувати ЗІЗ для дихальних шляхів. Працівнику необхідно зберігати безпечну відстань між руками та обертовими частинами верстату, використовувати захисні відокремлювані пристрої. Перевіряти стан та відповідність абразивних та полірувальних кругів до верстату та надійність їх закріплення, перевіряти технічний стан верстату перед початком роботи та проводити планові технічні огляди та ремонт.

г) При роботі з леткими хімічними сполуками необхідно використовувати засоби індивідуального захисту (рукавички, окуляри, щитки) в особливості ЗІЗ для захисту органів дихання. Використання справної та потужної витяжної шафи для видалення їдких парів хімічних сполук. Проходження технічних інструктажів для забезпечення своєчасного поновлення інформації та здобуття працівниками нової.

д) Перед початком роботи з випробувальними машинами Instron всі відповідальні за обладнання особи повинні уважно ознайомитися з інструкцією. Всі працівники, що працюють на випробувальних машинах повинні пройти навчання з проведення випробувань та супутнє навчання з техніки безпеки. Повне виключення ризиків при роботі неможливе, тому під час роботи необхідно зберігати обережність. Умови експлуатації обладнання є унікальною системою, що визначається рядом змінних параметрів до яких відносяться:

- умови експлуатації (виробниче приміщення, атмосфера, інженерні комунікації);

- самостійне втручання в конструкцію установки;

- досвід та кваліфікація працівників;

- характеристики зразків.

В процесі експлуатації ці фактори разом з іншими, можуть призводити до виникнення непередбачуваних обставин і, як наслідок, раніше не визначених факторів безпеки.

Перед ввімкненням живлення необхідно перевірити загальний стан обладнання, наявність необхідних вузлів та їх готовність до роботи. Забороняється наближуватися та наближувати інструмент до усіх потенційно небезпечних та відкритих місць обладнання. Заборонено стояти на шляху слідування рухомих частин обладнання. Не експлуатувати машини без встановлених бокових кришок або гофрованих труб, що закривають рухомі деталі обладнання. Не класти частини тіла на шляху переміщення машини, не торкатися рухомого обладнання, шлангів, кабелів, зразків. Працівники зобов'язані знати місця розташування кнопок аварійного вимкнення для запобігання настанню надзвичайних ситуацій. Наявність сторонніх осіб поблизу обладнання суворо заборонено, працівникам, що ведуть спостереження за ходом випробувань, забороняється наближуватися до зразків та обладнання.

е) Захист від шкідливих газів, паро- та пило-виділень передбачає обладнання місцевої витяжної вентиляції для відсосу отруйних речовин безпосередньо від місць їх утворення. Місцеві відсоси влаштовують конструктивно вбудованими та заблокованими з обладнанням так, що агрегат не можна запустити при виключеному відсосі.

- при роботі з отруйними і забруднюючими речовинами використовують спецодяг

- комбінезони, халати і фартухи;

- для захисту від лугів і кислот – гумове взуття і рукавички;

- для захисту шкіри рук, обличчя та шиї застосовують захисні пасти: антитоксичні, маслостійкі та водостійкі;

- очі від можливих опіків і подразнень захищають окулярами з герметичною оправою, масками та шоломами;

- для захисту органів дихання використовують фільтруючі та ізолюючі прилади (протигази і респіратори).

ж) Особливе місце серед профзахворювань користувачів ПК займають порушення зору, викликані:

- нераціональним освітленням;

- світлотехнічною специфікою робочих місць із ПК;

- недотриманням режиму праці.

Світлотехнічна специфіка обумовлена світлотехнічною різноманітністю об'єктів зорової роботи користувача ПК: екрана, документації і клавіатури, розташованих у різних зонах спостереження, що вимагає багаторазового переміщення лінії зору від одного об'єкта до іншого. 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 астенотичних 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 астенотичних 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 астенотичні явища, але й функціональні порушення очей користувача. Кольоровий шриффт 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.

#### 4.3 Заходи забезпечення виробничої санітарії та гігієни праці

з) Заходи з виробничої санітарії і гігієни праці визначаються відповідно до вимог Державних санітарних норм і правил «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу», зареєстрованих МЮ України 06.05.2014 р. за № 472/25249, з урахуванням виявлених, в процесі аналізу потенційних небезпек, небезпечних і шкідливих виробничих факторів.

Санітарний клас виробництва і розміри його санітарно-захисної зони визначаються з урахуванням наявних шкідливих виробничих факторів, згідно вимог ДСП 173-96 «Державні санітарні правила планування та забудови населених пунктів».

Параметри мікроклімату і чистоти повітря визначають згідно вимог ДСН 3.3.6-042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень», 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 % при температурі 26 °С; допустима швидкість переміщення повітря: 0,2-0,4 м/с.

Далі, відповідно до вимог ДБН В.2.5-67:2013 «Опалення, вентиляція та кондиціонування», визначається оптимальний склад і тип систем вентиляції, кондиціонування та опалення, які забезпечують підтримку передбачених параметрів мікроклімату і чистоти повітря.

#### 4.4 Заходи з пожежної безпеки

и) Заходи з пожежної безпеки визначаються відповідно до вимог НАПБ А.01.001-2014 «Правила пожежної безпеки в Україні».

Категорію виробництва за пожежною небезпекою (А, Б, В, Г, Д) споруд (приміщень) цеху (ділянки, підстанції) визначають на основі аналізу речовин і матеріалів, що використовуються у виробництві, відповідно до вимог ДСТУ Б В.1.1-36:2016 «Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою» і СНиП 2.09.02-85\* «Производственные здания».

Відповідно до категорії виробництва з пожежної небезпеки та вимогами ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги», визначають ступінь вогнестійкості приміщення цеху (дільниці, підстанції).

Шляхи евакуації працівників на випадок пожежі (переходи, евакуаційні виходи) передбачають згідно вимог ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги». Максимальну відстань від найбільш віддаленого робочого місця до найближчого евакуаційного виходу визначають згідно п. 2.29 (табл. 2) СНиП 2.09.02-85\* «Производственные здания».

Відповідність обладнання, силових і освітлювальних мереж вимогам пожежної безпеки в першу чергу залежить від відповідності ступеня захисту їх оболонок (ІР) класу пожежанебезпечної зони (П-I, П-II, П-IIIа и П-III) визначених згідно НПАОП 40.1-1.32-01 «Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок». Засоби виявлення займань та пожеж передбачаються згідно вимог ДБН В.2.5-56:2014 «Системи протипожежного захисту».

#### 4.5 Заходи по забезпеченню безпеки у надзвичайних ситуаціях

і) Для запобігання небезпек які пов'язані з умовами праці в надзвичайних ситуаціях необхідно забезпечити сховища, протирадіаційні укриття, швидкокомтовані захисні споруди цивільного захисту. Для вирішення питань укриття населення в захисних спорудах створюється фонд захисних споруд. Цей фонд створюється завчасно Державною службою України з надзвичайних ситуацій, місцевими державними адміністраціями, органами місцевого самоврядування та об'єктами господарської діяльності. Порядок створення та утримання фонду захисних споруд, а також його облік визначається Кабінетом Міністрів України. Проектування, будівництво, обладнання та розміщення захисних споруд та об'єктів подвійного призначення здійснюють за нормами, розробленими відповідно до Закону України «Про будівельні норми».

Вимоги до змісту і експлуатації захисних споруд визначається Державною службою України з надзвичайних ситуацій. Зміст захисних споруд здійснюється об'єктами господарської діяльності, на балансі яких вони знаходяться, за рахунок власних коштів. З моменту виключення захисної споруди з фонду захисних споруд воно втрачає статус захисної споруди цивільного захисту. Захисні споруди цивільного захисту можуть використовуватися в мирний час для господарських, культурних, побутових потреб у порядку визначеному Кабінетом Міністрів України. Тому вони можуть передаватися в оренду, зі збереженням їх цільового призначення, за винятком, захисних споруд, що знаходяться в постійній готовності, а саме: в яких розташовані пункти управління, призначених для укриття працівників об'єктів, що мають виробництво підвищеної небезпеки, розташовані в зонах ймовірного радіоактивного зараження і призначених для укриття населення при радіаційних аваріях.

## 5 ЕКОНОМІКО-ОРГАНІЗАЦІЙНА ЧАСТИНА

### 5.1 Актуальність теми з позиції маркетингу

Дослідження можливостей оптимізації технологічного процесу термічної обробки лопаток ГТД є актуальним з позиції маркетингу з кількох причин. По-перше, у змагальному середовищі, де інновації та ефективність виробництва відіграють ключову роль, оптимізація технологічного процесу може дати значну конкурентну перевагу, забезпечуючи якість продукції за оптимальних витрат. Далі, покращення технологічного процесу може сприяти підвищенню продуктивності, зниженню витрат та збільшенню ефективності виробництва, що є ключовими показниками для бізнесу. Крім того, оптимізація технологічного процесу може допомогти управляти ризиками, пов'язаними з можливими проблемами якості або невдалими виробничими процесами, що можуть вплинути на репутацію підприємства та його позиції на ринку. Також важливо враховувати, що оптимізація технологічного процесу може сприяти зменшенню впливу виробництва на навколишнє середовище, зменшуючи споживання ресурсів та викиди шкідливих речовин. Нарешті, покупці все більше уважні до якості продукції та її виробничого процесу. Оптимізація технологічного процесу може відповісти на зростаючі вимоги ринку до інноваційних та ефективних виробничих методів. Таким чином, дослідження та оптимізація технологічного процесу термічної обробки лопаток ГТД є важливим завданням, яке може принести як практичну користь для підприємства, так і позитивні результати з позицій маркетингу та конкурентоспроможності.

Зважаючи на те, що сучасні технології постійно розвиваються, а конкуренція на ринку стає все жорсткішою, оптимізація технологічних процесів стає ключовим аспектом для підприємств, що займаються виробництвом лопаток для газотурбінних двигунів (ГТД). Такі лопатки

використовуються у різноманітних галузях, включаючи авіацію, енергетику та промисловість.

Оптимізація технологічного процесу термічної обробки лопаток ГТД може значно підвищити якість продукції, знизити витрати на виробництво та підвищити загальну ефективність виробництва. Проведення досліджень у цьому напрямку може сприяти розробці та впровадженню нових технологічних рішень, які дозволять досягти оптимальних результатів.

Зокрема, вдосконалення процесів термічної обробки може позитивно позначитися на міцності, довговічності та стійкості лопаток до впливу високих температур та агресивних середовищ, що є критичними параметрами для їх ефективної роботи у складних умовах.

Крім того, оптимізація процесів виробництва може допомогти підприємствам зменшити витрати на енергію, сировинні матеріали та ресурси, що є важливим аспектом в контексті сталого розвитку та збереження навколишнього середовища.

Навчальні та наукові заклади, спільно з промисловими підприємствами, мають великий інтерес у вивченні та впровадженні нових методів та технологій, спрямованих на оптимізацію технологічних процесів термічної обробки. Такі дослідження можуть стати основою для подальших інновацій та підвищення конкурентоспроможності виробничих підприємств на міжнародному ринку.

## 5.2 Послідовний аналіз

У даній роботі було проведено аналіз сфер застосування продукції та вигоди для клієнтів (див. таблицю 5.1). Це надає повне уявлення про суть концепції та основні ринки, на яких слід зосередитися при пошуку потенційних клієнтів.

Таблиця 5.1 – Опис ідеї

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для споживачів (користувачів)
Дослідження можливостей оптимізації технологічного процесу термічної обробки лопаток ГТД	Виробництво авіаційних двигунів, виробництво енергетичних турбін	Для виробництва авіаційних двигунів: зниження витрат на виробництво, підвищення надійності продукції. Для виробництва енергетичних турбін: продовження терміну служби обладнання, оптимізація використання енергоресурсів.

Таким чином, запропонована технологія дозволить отримати значні конкурентні переваги на ринку авіаційних двигунів та енергетичних установок.

Виконаний аналіз характеристики потенційного ринку (табл. 5.2).

Таблиця 5.2 – Попередня характеристика потенційного ринку

Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
Головні конкуренти	General Electric, Rolls-Royce, Siemens
Динаміка ринку (якісна оцінка)	Стабільний попит, тенденція до інновацій
Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Високі вимоги до сертифікації, потреба у великих інвестиціях
Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Дотримання стандартів ISO, EN, ДСТУ, необхідність сертифікації FAA та EASA

Отже, існує потенційний попит на ринку з боку виробників авіаційних двигунів. При цьому для виходу на ринок потрібні інвестиції в обладнання та сертифікацію послуг для забезпечення конкурентоспроможності.

Вивчені та визначені потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та сформований орієнтований перелік вимог до товару для кожної групи (табл. 5.3).

Таблиця 5.3 – Попередня характеристика потенційних клієнтів

Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів (користувачів)
Підвищення ефективності та надійності лопаток газотурбінних двигунів.	Виробники авіаційних та промислових газотурбінних двигунів.	Авіаційна галузь потребує високої точності та надійності, промисловість - оптимізацію вартості.	Висока довговічність, висока продуктивність, економічна ефективність.

SWOT-аналіз є потужним інструментом для оцінки переваг та недоліків, а також можливостей та загроз у рамках певного проекту чи ініціативи. У випадку інноваційного проекту, такий аналіз допомагає виокремити фактори, які можуть сприяти або перешкоджати його успішній реалізації. Проведений SWOT-аналіз середовища реалізації інноваційного проекту, результати якого наведені в Таблиці 5.4, надає цінну інформацію про потенційні переваги та виклики, що стоять перед проектом. SWOT-аналіз допомагає проектній команді краще розуміти контекст їхньої діяльності, ідентифікувати основні фактори, які впливають на успіх проекту, і визначити стратегії для

максимізації переваг і зменшення ризиків. Результати аналізу, відображені в табличному форматі, створюють зручний інструмент для подальшого планування та управління проектом.

Таблиця 5.4 – SWOT- аналіз

Сильні сторони:	Слабкі сторони:
Підвищення якості кінцевого продукту, зниження виробничих витрат, можливість індивідуалізації технологічного процесу, збільшення продуктивності праці, покращення екологічних показників.	Висока вартість впровадження технології, потреба в кваліфікованих кадрах, залежність від постачальників обладнання та матеріалів, складнощі здійснення технічного обслуговування, потенційні ризики втрати інформації про унікальні технологічні процеси.
Можливості:	Загрози:
Розширення ринку збуту через покращення характеристик продукту, встановлення довгострокових партнерських відносин з виробниками лопаток ГТД, можливість отримання грантів на наукові дослідження, підвищення конкурентоспроможності на міжнародному ринку, можливість розвитку суміжних напрямків виробництва.	Зміна законодавчих вимог у сфері виробництва та експлуатації ГТД, поява інноваційних технологій у конкурентів, нестабільність на світових ринках сировини, високі ризики піратства та витоку інтелектуальної власності, зростання цін на енергоносії.

SWOT-аналіз допомагає зрозуміти внутрішні та зовнішні фактори, які можуть впливати на успішність інноваційного проекту та розробити стратегії для максимізації переваг та мінімізації ризиків.

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів (табл. 5.5).

Таблиця 5.5 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
Великі авіавиробники стартапи в галузі аерокосмічних технологій; науково-дослідні інститути..	Висока для авіавиробників, середня для стартапів, низька для наукових інституцій.	Для великих авіавиробників 500-700 одиниць на рік; для стартапів 100-200 одиниць на рік; для науково-дослідних інституцій 50-100 одиниць на рік.	Висока у сегменті великих авіавиробників, середня у сегменті стартапів, низька у сегменті науково-дослідних інститутів	Складна для великих авіавиробників через високі бар'єри входу, середня для стартапів, проста для науково-дослідних інститутів через наявність наукової співпраці.

Проведена ідентифікація стейкхолдерів, їхнє пріоритизування та побудована Карта стейкхолдерів, що дозволяє візуалізувати взаємозв'язки між стейкхолдерами. Три концентричні області на карті відображають всіх осіб, зацікавлених в інноваційному проекті, враховуючи можливості впливу ініціатора проекту. Внутрішня область стейкхолдерів вказує на повноваження та відповідальності ініціатора. Внутрішні зацікавлені сторони перебувають в

прямому підпорядкуванні ініціатора, що дозволяє використовувати ефективні методи адміністрування проекту.



Рисунок 5.1 - Карта стейкхолдерів

Під час виконання роботи також було враховано внесок кожного працівника у загальний успіх проекту. Науковий керівник забезпечував координацію робіт, визначав стратегічні напрямки дослідження та надавав консультації з питань наукового планування. Старший науковий співробітник, крім безпосередньої участі у дослідженні, брав на себе важливу роль у контролі якості та виконанні робіт у відповідності до встановлених стандартів. Інженер-дослідник відповідав за експериментальну частину робіт, забезпечуючи правильну настройку обладнання та аналіз результатів. Лаборант забезпечував підтримку у виконанні рутинних завдань та відповідав за документацію та підготовку дослідницького середовища. Завдяки допомозі кожного учасника команди та їхній високій кваліфікації було досягнуто успішних результатів у проведенні дослідження.

Таблиця 5.6 – Склад, чисельність та фонд заробітної плати

Посада	Кількість осіб	Посадовий оклад, грн	Преміальний відсоток до окладу, %	Сума премій, грн	Місячна заробітна плата	Річний фонд оплати праці, грн	ЄСВ, грн
Науковий керівник	1	15600	20	3120	18720	224640	49420,8
Провідний інженер	1	12300	20	2460	14760	177120	38966,4
Інженер-технолог	2	11200	20	2240	13440	322560	70963,2
Лаборант	4	8600	20	1720	10320	495360	108979,2
Разом	5	47700	-	9540	57240	1219680	268329,6

Розрахунок вартості матеріалів. До цієї статті належать витрати на придбання основних матеріалів для проведення дослідження, а також для виготовлення макетів та дослідних зразків (табл. 5.7)

Таблиця 5.7 – Розрахунок матеріальних витрат

Матеріальні витрати	Одиниця виміру	Кількість	Ціна за од., грн	Сума, грн
Азот	м <sup>3</sup>	120	280	33600
Травник	шт	20	180	3600
Олівець	шт	20	10	200
Зразки	шт	55	260	14300
Реактиви	шт	10	900	9000
Змінні лінзи	комплект	2	3200	6400
Тара зразків	комплект	23	25	575
Разом	-	-	-	67675

Розрахунок вартості послуг. До цієї статті належать витрати на електропостачання, водопостачання тощо (табл. 5.8).

Таблиця 5.8 – Розрахунок вартості спожитих послуг

Вид послуг	Одиниця виміру	Кількість	Тариф, грн	Сума, грн
Електропостачання	кВт·год	398	2,64	1050,72
Водопостачання	м <sup>3</sup>	5	28,3	141,5
Теплопостачання	Гкал	2	3777	7554
Сертифікація	послуга	1	800	800
Утилізація відходів	тонна	1	2300	2300
Охоронна сигналізація	місяць	2	200	400
Разом	-	-	-	12246,22

Визначили річну суму амортизації з урахуванням первісної вартості основних засобів та норми амортизації при терміні експлуатації у 5 років (табл. 5.9).

Обладнання	Кількість	Вартість, грн	Загальна вартість, грн	Річна амортизація (20%), грн	Поточний ремонт (2%), грн
МІМ-7	2	98 287	196574	27520,36	3931,48
Електронний мікроскоп	1	1357110	1357110	189995,4	27142,2
Піч вакуумна лабораторна	1	72563	72563	10158,82	1451,26
Комп'ютер	4	23062	92248	12914,72	1844,96
Принтер	1	12000	12000	1680	240
Разом	9	1563022	1730495	242269,3	34609,9

Враховано основне устаткування: вакуумна піч, твердоміри, мікроскоп та комп'ютери. Загальна річна сума амортизації з урахуванням ремонту складає 276878, 3грн.

Відображаємо кошторис витрат на основі даних, вказаних в табл. 5.6-5.9. В табл. 5.10 наведено кошторис витрат на проведення науково-дослідницьких робіт.

Таблиця 5.10 – Кошторис витрат

Стаття витрат	Сума, грн
Фонд заробітної плати	1219680
ЄСВ	268330
Матеріальні витрати	67675
Вартість послуг	12246
Амортизація обладнання	242269
Поточний ремонт	34610
Виробнича собівартість	1844810
Адміністративні витрати (20%)	609840
Повна собівартість	2454650

Розрахунок економічного ефекту виконувався на основі того, що порівнювався економічний ефект від термічної обробки за стандартною технологією та новою.

Таблиця 5.11 - Порівняння стандартної технології та лазерної

Показник	Од. виміру	Стандартна технологія	Удосконалена технологія
Собівартість ТО однієї лопатки	грн	520	420
Ресурс лопатки	тис. км	150	170

Показник	Од. виміру	Стандартна технологія	Удосконалена технологія
Кількість замін лопаток за 3 роки експлуатації	шт	2	1
Витрати на заміни лопаток	грн	660	420
Економія витрат на 1 двигун	грн	-	240
Річний економічний ефект	млн грн	-	240

Розроблена технологія термічної обробки є ефективним інструментом для підвищення економічної ефективності виробництва. За допомогою цієї технології досягається подовження терміну експлуатації лопаток, що дозволяє збільшити їхній ресурс. Одночасно з цим, завдяки оптимізації процесу, вдається знизити собівартість виготовлення однієї деталі.

Ця комбінація позитивних ефектів сприяє збільшенню прибутковості виробництва та конкурентоспроможності на ринку. Зокрема, зменшення витрат на виробництво одного зразка дозволяє підприємству зберегти ресурси та залучити нових клієнтів за більш привабливими цінами. Таким чином, використання цієї технології виявляється важливим кроком для підвищення ефективності та прибутковості виробництва лопаток.

## ВИСНОВОК

Розглянуто умови експлуатації лопаток ГТД та вимоги до матеріалів. Після аналізу наукових джерел було встановлено, що існує необхідність у подальшому удосконаленні жароміцних титанових сплавів. У зв'язку з високими температурами, які негативно впливають на властивості титану, дослідники продовжують проводити експерименти з мікролегуванням і режимами термічної обробки титанових сплавів. Це робиться з метою поліпшення їхніх характеристик та досягнення стабільності у їхній експлуатації при різних умовах.

Після аналізу ряду досліджень була виявлена значимість правильного вибору матеріалів для їх використання у виробництві конструкційних деталей, які працюють при підвищених температурах. Для титанових сплавів досліджено вплив термічної обробки на властивості та склад фаз. Розраховано економічний ефект та розглянуті питання з охорони праці.

**ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ**

1. Солонина О.П., Глазунов С.Г. Жаропрочные титановые сплавы - М.: Металлургия, 1976. - 448 с.
2. Титановые сплавы в машиностроении / И. В. Горынин, Б. Б. Чечулин. Л.: Машиностроение 1990. 400 с.
3. Синяева Н.П. Розробка комплексонометричного методу визначення вмісту цирконію у сплавах на основі титану ВТ-9, ВТ-20 та у цирконовому концентраті: сб. науч. тр. Нац. Запорізький. ун-т., 2015. С. 107 – 116.
4. B. Jiang, Q. Wang, C. Dong, P.K. Liaw, Exploration of phase structure evolution induced by alloying elements in Ti alloys via a chemical-short-range-order cluster model, *Sci. Rep.* 9 (1), 2019.
4. A. Knaislova, P. Novak, F. Průša, M. Cabibbo, L. Jaworska, D. Vojtech, High-temperature oxidation of Ti–Al–Si alloys prepared by powder metallurgy, *J. Alloys Compd.* 810, 2019.
5. Бичков А. С. Концепція підвищення експлуатаційних характеристик конструкцій агрегатів вітчизняних цивільних літаків спеціальними методами порошкової металургії: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук: 05.07.02. Київ, 2019. 311 с.
6. Колачев Б.А., Ливанов В.А., Буханова А.А. Механические свойства титана и его сплавов. – М.: Металлургия, 1974, с. 544.
7. Коллинз Е.В. Физическое металловедение титановых сплавов / Пер. С англ. Под ред. Б.И. Веркина, В.А. Москаленко. М.: Металлургия, 1988. 224 с.
8. Davis J. R. *ASM Speciality Handbook Stainless Steels (Asm Specialty Handbook)* / J. R. Davis // ASM International – 1995 – 600 p.
9. Budinski K. G. *Properties and Selection. Engineering Materials.* Englewood Cliffs / K. G. Budinski, M. K. Budinski // New Jersey: Prentice-Hall – 1992 – 817 p.

10. George E. Totten. Steel Heat Treatment - Metallurgy And Technologies / George E. Totten // CRC Press - 2006.- 1077 p.
11. Rajan T.V. Heat treatment: principles and techniques / T.V Rajan C. P. Sharma // PHI Learning Pvt. Ltd – 2011 – 611p.
12. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Лопатки компрессора и вентилятора. Часть I. Монография. г.Запорожье, изд. ОАО «Мотор Сич», 2003. – 396 с.
13. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Лопатки турбины. Часть II. Монография. г.Запорожье, изд. ОАО «Мотор Сич», 2003. – 420 с
14. Kear B. H. Aircraft gas turbine materials and processes / B. H. Kear, E. R Thompson //Science. – 1980. – Т. 208. – №. 4446. – С. 847-856.
15. Schilke P. W. Advanced gas turbine materials and coatings / P. W Schilke //GE Energy. – 2004 – 269 p.
16. Fadok J. Advanced gas turbine materials, design and technology / J. Fadok //Advanced Power Plant Materials, Design and Technology. – Woodhead Publishing, 2010. – С. 3-31.
17. Roddy D. Advanced power plant materials, design and technology / D. Roddy // Woodhead Publishing Series in Energy. Elsevier – 2010 - 448 p
18. Clausen P. D., Evans S. P., Wood D. H. Design, manufacture, and testing of small wind turbine blades / P. D. Clausen, S. P Evans, D. H. Wood // Advances in wind turbine blade design and materials. – Woodhead Publishing, 2023. – С. 441-461.
19. Mishnaevsky Jr L. Materials for wind turbine blades: An overview / Jr. L. Mishnaevsky // Materials. – 2017. – Т. 10. – №. 11. – С. 1285.
20. Конспект лекцій з дисципліни (1 частина) “Спеціальні сталі та сплави в газотурбобудуванні” для студентів спеціальності 132 “Матеріалознавство” усіх форм навчання / Укл.:В.Я. Грабовський, О.А. Глотка. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2017. - 82 с

21. Tetyukhin V.V. Status and Progress in wrought processing of titanium / V.V. Tetyukhin, M.O. Leder , V.A. Kropotov // Proceedings of the 13th World Conference on Titanium. Metals & Materials Society, 2016, pp. 249–256.

**ДОДАТОК А**