

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Інженерно-фізичний факультет

(повне найменування факультету)

Фізичне матеріалознавство

(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного роботи

магістр

(ступінь вищої освіти)

на тему: «Розробка інженерних рішень для удосконалення термічної обробки деталей газотурбінних двигунів з титанових сплавів»

Виконав(ла): студент(ка) 2 курсу, групи ІФ232м

Спеціальності 132 Матеріалознавство

(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

Прикладне матеріалознавство

ОРЖЕХОВСЬКИЙ С.В

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Керівник ТКАЧД.В

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Рецензент _____

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

2023

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)

ОРЖЕХОВСЬКИЙ Сергій Васильович

(ПРІЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) Розробка інженерних рішень для удосконалення термічної обробки деталей газотурбінних двигунів з титанових сплавів

керівник проєкту (роботи) доцент, к.т.н ТКАЧ Дар'я Володимирівна

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від « _____ » _____ 20 ____ року № _____

2. Строк подання студентом проєкту (роботи) 25.01.2023

3. Вихідні дані до проєкту (роботи)

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Аналіз літературних джерел, матеріали та методика, експериментальна частина, розрахунок економічної ефективності, охорона праці

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

перезинтація

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	ПРИЗВИЩЕ, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1	ТКАЧД.В доцент, к.т.н		
2	ТКАЧД.В доцент, к.т.н		
3	ТКАЧД.В 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 «_____» _____ 20__ року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

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

Студент(ка)

_____ Дар'я ТКАЧ
(підпис) (Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Керівник проєкту (роботи)

_____ Сергій ОРЖЕХОВСЬКИЙ
(підпис) (Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до магістерської роботи: 102 с., 20 табл., 28 рис.,
1 дод., 14 джерел.

ТЕРМІЧНА ОБРОБКА, ТИТАНОВИЙ СПЛАВ, КОМПРЕСОР
АВІАЦІЙНОГО ДВИГУНА, ПОДВІЙНИЙ ВІДПАЛ, МАРШРУТНА
ТЕХНОЛОГІЯ, ТЕХНОЛОГІЧНА КАРТА, ДОМІШКИ, β -СТАБІЛІЗАТОРИ,
 $\alpha+\beta$ -СПЛАВИ,

Об'єктом дослідження є деталі ротору сучасних високотемпературних
турбореактивних двигунів.

Метою дослідження є розробка інженерних рішень для удосконалення
термічної обробки цих деталей з метою підвищення їх ресурсу та надійності.
Основна увага приділяється технологічному процесу виробництва деталей з
титанових сплавів, зокрема термічній обробці, яка визначає структуру
матеріалу та комплекс його механічних, теплофізичних та експлуатаційних
властивостей. Виходячи з цього, дослідження спрямоване на вдосконалення
існуючих та створення нових, більш ефективних процесів термообробки для
сучасних титанових сплавів, з метою підвищення експлуатаційних
характеристик робочих лопаток турбіни та збільшення ресурсу роботи
авіаційного двигуна.

ЗМІСТ

	С.
Вступ.....	7
1 Аналітичний огляд	9
1.1 Характеристика та умови експлуатації виробів.....	9
1.2 Маршрутна технологія виготовлення виробів.....	17
1.3 Обґрунтування вибору матеріалу для виробу.....	19
1.4 Вплив легування на властивості жароміцних титанових сплавів.....	25
2 Матеріали та методи дослідження.....	39
2.1 Характеристика обраного матеріалу.....	39
2.2 Дослідження мікроструктури	39
3 Розробка режимів та технології термічної обробки	43
3.1 Вибір технології термічної обробки жароміцних титанових сплавів	43
3.2 Розробка технології термічної обробки барабанна компресора зі сплаву BT8.....	51
3.3 Технологічний контроль, попередження та виправлення дефектів	55
3.4 Застосування азотування для підвищення експлуатаційних властивостей виробів з титанових сплавів.....	64
4 Охорона праці і навколишнього середовища.....	72
4.1 Аналіз потенційних небезпек	72
4.2 Заходи по забезпеченню техніки безпеки	73
4.3 Заходи по забезпеченню виробничої санітарії та гігієни праці	76
4.4 Заходи з пожежної безпеки.....	81
4.5 Заходи по забезпеченню безпеки у надзвичайних ситуаціях.....	83

	6
5 Економіко-організаційна частина.....	86
5.1 Актуальність теми з позиції маркетингу	86
5.2 Послідовний аналіз	87
Висновки	97
Перелік використаних джерел	99
Додаток А	96

ВСТУП

Підвищення ресурсу та надійності авіаційних газотурбінних двигунів є надзвичайно важливим стратегічним завданням для вітчизняного авіадвигунобудування. Збільшення міжремонтних ресурсів дозволяє суттєво знизити витрати авіакомпаній на технічне обслуговування та ремонт повітряних суден, здешевлюючи таким чином експлуатацію та роблячи її більш економічно вигідною. Крім того, це безпосередньо позитивно впливає на безпеку польотів, знижуючи ризики відмови двигуна у польоті через втому або пошкодження деталей. Отже, робота над підвищенням надійності є запорукою конкурентоспроможності авіабудівних компаній на світовому ринку та відповідає загальносвітовим тенденціям у галузі авіаційного двигунобудування.

Одним з найбільш навантажених та відповідальних компонентів сучасних високотемпературних турбореактивних двигунів є деталі ротору, які у процесі роботи зазнають впливу екстремальних умов - високих температур, тиску, швидкостей та значних механічних напружень. Саме ресурс роботи цих виробів безпосередньо визначає міжремонтний ресурс усього двигуна. Для виготовлення даних найвідповідальніших деталей застосовують спеціальні жароміцні титанові сплави, які поєднують високу міцність за високих температур з достатньою пластичністю, зносостійкістю та корозійною стійкістю. Тому подальший прогрес у галузі авіадвигунобудування нерозривно пов'язаний із вдосконаленням технологій виробництва жароміцних титанових сплавів та їх обробки для забезпечення високої надійності та необхідного рівня експлуатаційних властивостей.

Однією з ключових операцій у технологічному процесі виробництва деталей з титанових сплавів є термічна обробка, яка визначає структуру матеріалу та комплекс його механічних, теплофізичних та експлуатаційних властивостей. Від режимів термообробки залежить досягнення оптимального

поєднання характеристик міцності, пластичності, опору повзучості та втоми при робочих температурах, а отже, і ресурс безпечної експлуатації відповідальних деталей. Тому розробка інженерних рішень, які дозволять удосконалити існуючі та створити нові, більш ефективні процеси термообробки для сучасних титанових сплавів є важливим науково-технічним завданням, вирішення якого дасть можливість підвищити експлуатаційні характеристики робочих лопаток турбіни та збільшити ресурс роботи авіаційного двигуна в цілому.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

1.1 Характеристика та умови експлуатації виробів

До ротору компресора входять деталі, що обертаються. Основними деталями ротора є барабан або диски, робочі лопатки, цапфи або вал (рис. 1.1).

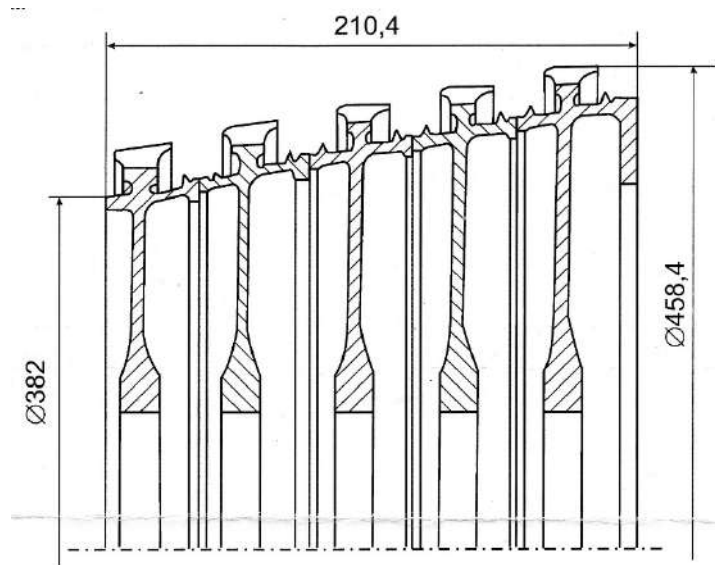


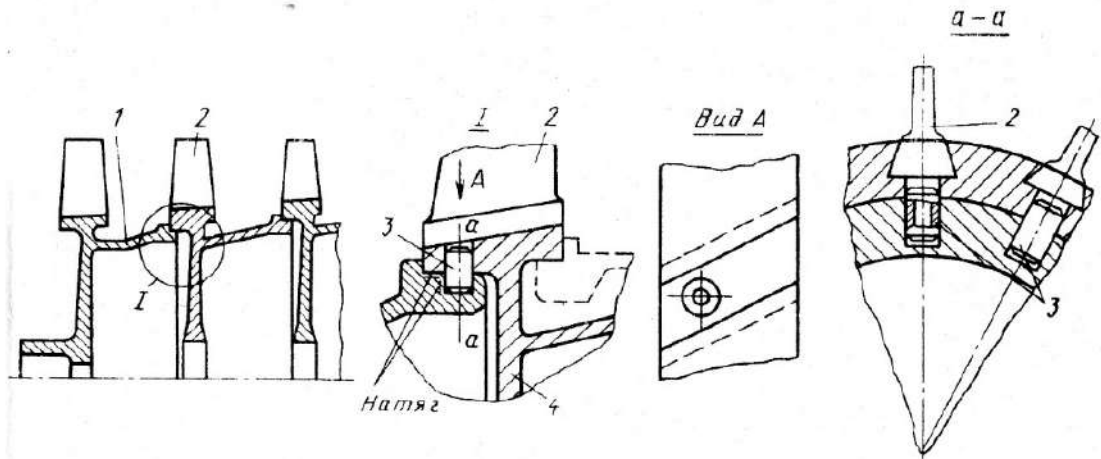
Рисунок 1.1 – Барабанно-дисковий компресор

Ротор компресора навантажується у процесі роботи крутним та обертаючим моментами із значними інерційними і газовими силами.

В осьових компресорах авіаційних двигунів застосовуються три конструктивні схеми роторів, один із яких барабанно-дискового (змішаного) типу.

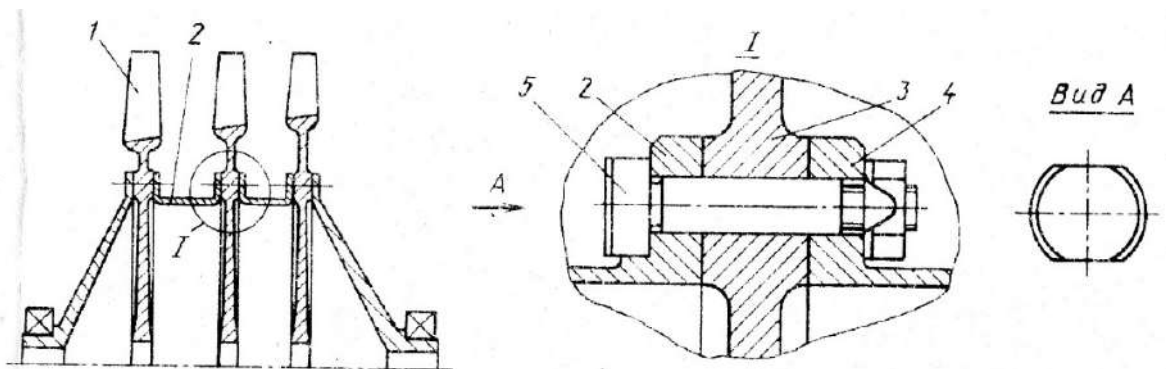
Ротори барабанно-дискового (змішаного) типу знаходять широке застосування в сучасних конструкціях компресорів завдяки тому, що вони поєднують високу вигинаючу жорсткість роторів барабанного типу і допустимість високих окружних швидкостей роторів дискового типу. Крім того, при з'єднанні дисків один з одним на великому діаметрі простіше питання, передачі крутного моменту і усунення вібрації дисків.

Ротор змішаного типу складається з окремих секцій, що включають або диск з розвиненим циліндровим (або конічним) буртом (рис. 1.2, поз. 1), виконаним спільно з диском, або диск і окрему кільцеву проставку (рис. 1.3, поз. 2), яка передає крутний момент.



1 - розвинений бурт; 2 - робоча лопатка; 3 - радіальний штифт; 4 - диск

Рисунок 1.2 - Ротор барабанно-дискового типу



1 - робоча лопатка; 2, 4 - проставки; 3 - диск; 5 - призонний болт

Рисунок 1.3 - Ротор барабанно-дискового типу

Ширина бурту або проставки визначається відстанню між дисками. Секції з'єднуються між собою, і бурти або проставки утворюють барабан. До передніх і задніх дисків кріпляться цапфи. Для отримання високої жорсткості, надійної передачі крутного моменту і доцільно застосовувати диски з буртами, які слід розташовувати на можливо більшому радіусі. Протевикористання подібних секцій істотно ускладнює виробництво. Крім того, кільцеві бурти

додатково навантажують диски. Для усунення цього недолікурозташування буртів визначається з умови рівності радіальних деформацій диска і бурту, що дозволяє їх взаємно розвантажити.

Ротор, що складається з дисків і кільцевих проставок, простіше у виготовленні, але має більше число роз'ємів, що знижує його жорсткість і збільшує масу в порівнянні з ротором, в якому використовуються диски з буртами.

Для зменшення вібрації дисків більшого діаметру, їх виконують із центральним отвором та ступицею в полотні диска. Це істотно підвищує його жорсткість і усуває можливість виникнення небезпечних коливань, як у закріпленої по краю круглої мембрани.

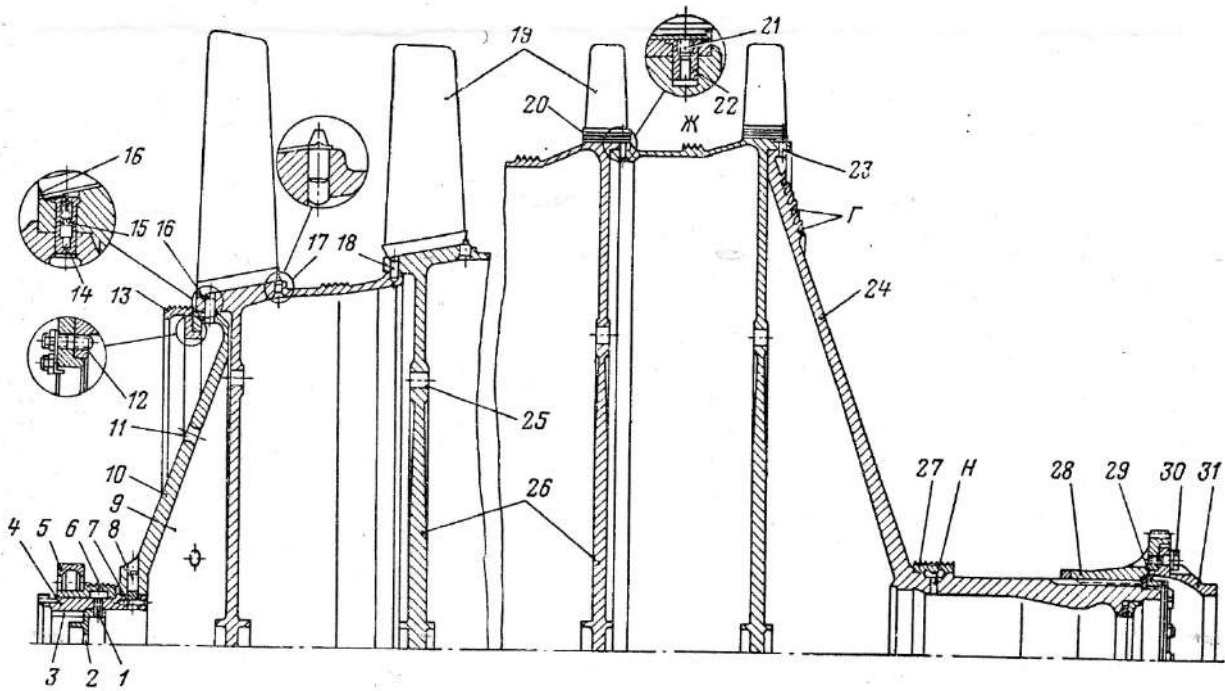
До з'єднань секцій в роторах барабанно-дискового типу пред'являються наступні основні вимоги:

- надійна передача крутного моменту від секції до секції;
- збереження протягом всієї експлуатації двигуна;
- нерозкриття стиків з'єднання за всіх умов експлуатації.

За способом з'єднання дисків ротори барабанно-дискового типу можна розділити на три групи:

- із з'єднанням натягом і радіальними штифтами;
- з фланцевим болтовим з'єднанням;
- із з'єднанням торцевими шліцами.

Конструкція ротора із з'єднанням дисків за першим способом представлена на рис. 1.4. Диски виконуються за одне ціле з розвиненими буртами і з'єднуються один з одним натягом, для чого кожен диск з буртом, нагрівається до температури 100-150°C. Після з'єднання дисків в буртах свердляться і відкриваються радіальні отвори, в які з натягом встановлюються штифти 14. Таким же чином з'єднуються з ротором передня і задня цапфи. На ділянках між ободами дисків виконані гребінці Г і Ж, створюючи спільно з внутрішніми банджами випрямляючих апаратів лабіринтові ущільнення.



1 - стопор; 2 - заглушка; 3 - шліци; 4 - передня цапфа; 5 - передній ролик підшипника; 6 - лабіринт переднього підшипника; 7, 8 - штифти; 9 - вузол передньої цапфи; 10 - стінка передньої цапфи; 11 - розвантажувальний отвір; 12 - шпилька; 13 - лабіринт передньої цапфи; 14, 18, 23 - штифти кріплення дисків; 15 - гвинт; 16 - замок осової фіксації лопатки; 17 - осовий упор лопатки; 19 - робочі лопатки; 20 - замкова частина лопатки; 21 - балансування; 22 - штифт; 24 - задня цапфа; 25 - отвір в діафрагмі дисків; 26 - диски ротора компресора; 27 - лабіринт задньої цапфи; 28 - шліцьова втулка; 29 - гайка; 30 - гвинт; 31 - кришки кульової опори; Н - отвір; Г, Ж - гребінці лабіринтових ущільнень

Рисунок 1.4 – Ротор барабанно-дискового типу із з'єднанням дисків натягом і радіальними штифтами

Ротори із з'єднанням дисків натягом і радіальними штифтами є нерозбірною конструкцією і мають високу міцність і жорсткість.

Проте ротор із з'єднанням секцій за допомогою штифтів має і недоліки:

- трудність виконання дисків за одне ціле з розвиненими барабанними буртами;

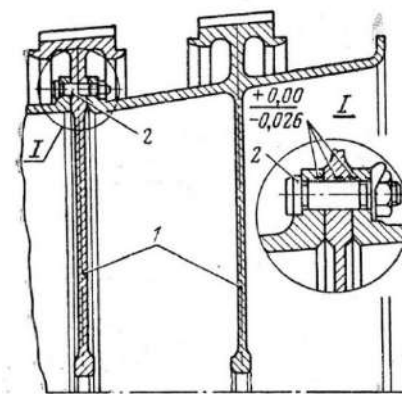
- нероз'ємність конструкції в умовах експлуатації.

Правда, необхідно відзначити, що перехід на експлуатацію по технічному стану передбачає заміну або всього ротора, або компресора в цілому. У зв'язку з цим доцільно використовувати зварні ротори.

Зварні ротори мають найменшу масу і найбільшу жорсткість зі всіх можливих конструктивних типів роторів.

При використанні нероз'ємних роторів для забезпечення зборки компресора корпус направляючих апаратів повинен мати роз'єм в площині осі двигуна (тобто подовжній роз'єм).

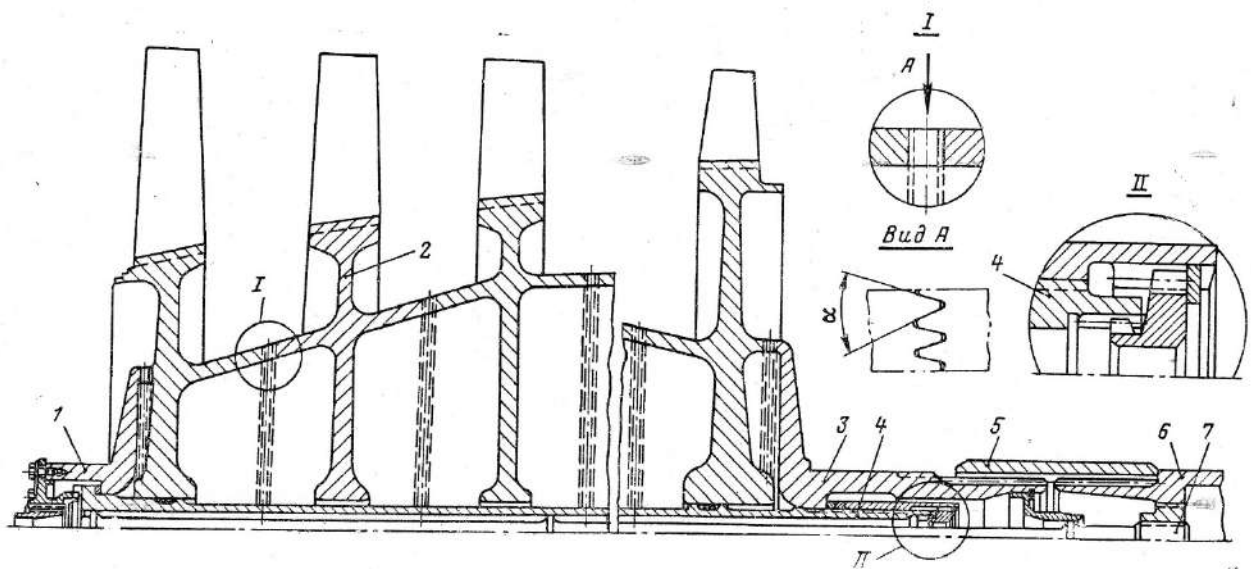
У роторах з фланцевим з'єднанням дисків (рис. 1.5) і передача моменту, що крутить, проводяться призонними болтами. Іноді для спрощення виготовлення дисків розвинені циліндрові або конічні ділянки виконуються окремо у вигляді проставок з фланцями, якими вони і з'єднуються з дисками за допомогою призонних болтів. При цьому число роз'ємів і число болтів буде більше, ніж в конструкції без проставок. Ротори з фланцевим з'єднанням найбільш доцільні при виконанні всіх елементів ротора із сталі. У конструкції ротора з фланцевим з'єднанням передня і задня цапфи кріпляться до дисків також за допомогою призонних болтів, а іноді цапфи виготовляються за одне ціле з відповідними дисками.



1 – диски; 2 – призонний болт

Рисунок 1.5 – Ротор барабанно-дискового типу із фланцевим з'єднанням дисків

Ротор, в якому диски з'єднуються за допомогою торцевих шліців і стяжного болта (рис. 1.6), відноситься до розбірних конструкцій. Цим же стяжним болтом приєднуються до дисків і цапфи ротора.



1, 3 - цапфи; 2 - диски; 4 - стяжний болт; 5 - сполучна муфта; 6 - вал турбіни; 7 - штанга, що сполучає ротор компресора і вал турбіни

Рисунок 1.6 – Ротор барабано-дискового типу із з'єднанням дисків торцевими шліцами і стяжним болтом

Ці диски між собою і з цапфами, а також передача крутного моменту, здійснюються торцевими шліцами трикутного профілю. Для забезпечення жорсткості ротора затягування стяжного болта повинне проводитися з великим зусиллям, що викликає значні напруження в деталях ротора і в стяжному болті.

Величина затягування болта визначається з умови недопущення розкриття стиків дисків ротора під дією осьової сили ротора, передаваного крутного моменту, моменту, що вигинає, і неоднакового розширення дисків і стяжного болта при робочих температурах.

Неоднакове розширення дисків і стяжного болта залежно від їх температури може збільшувати або зменшувати початкове затягування болтів. Наприклад, при переході на режим планування диски швидко

охолоджуватимуться і зменшуватимуться в розмірі, а стяжний болт, що знаходиться в середині, залишається нагрітим, це призводить до ослаблення затягування і сприяє розкриттю стику.

Осьова сила P_{oc} від крутного моменту $M_{кр}$ залежить від величини цього моменту, від величини кута α при вершині трикутника, що визначає профіль шліців (див. рис. 1.6), і від середнього r , на якому розміщені шліци:

$$P_{oc} = \frac{M_{кр}}{2r} \sin \alpha .$$

Як видно з формули, чим менше кут α , тим менше осьова сила при тих же значеннях $M_{кр}$ і r ; на виконаних конструкціях $\alpha = 40^\circ \div 45^\circ$. Для визначення необхідної сили затягування болта отримана розрахунком сумарна величина всіх сил, сприяючих ослабленню затягування, завищується на 15-25%. Контроль зусилля затягування стяжного болта зазвичай проводиться шляхом виміру його подовження. Величина залежно від зусилля затягування, довжини і перетини болта складає 1,5 -3,5 мм. При цьому питомий тиск на поверхні стиків досягає 40 МПа..

Для перевірки міцності болта визначається величина найбільшого напруження на розрив під дією сили затягування і сили, що з'являється при термічному розширенні дисків, нагрітих до робочої температури, рахуючи температуру болта тієї, що не змінилася. Напруження, що допускається, на розрив для болтів з легованої сталі 600-650 МПа.

Ротори з осьовим стягуванням дисків можуть застосовуватися у поєднанні з роз'ємним і нероз'ємним корпусами і з різною конструкцією випрямляючих апаратів.

Недоліками ротора даної конструкції є:

— складність виготовлення дисків;

– велике зусилля затягування стяжного болта для забезпечення необхідної щільності стику у всьому діапазоні робочих режимів експлуатації, а також для запобігання взаємним радіальним секцій, які порушення балансування.

На виріб діють відцентрові сили, тобто барабан зазнає сили стиснення та розтягнення (складнонапружений стан).

До барабану компресора кріпиться певна кількість дисків і тому складнонапружений стан, який діє на них, буде відображатись і на самому барабані.

Складнонапружений стан полотна диска спричиняється наявністю відцентрових сил та градієнтів температур (по радіусу та вздовж вісі), які призводять до утворення радіальних, тангенціальних та осьових напружень (в ступиці), як правило значно менших за величиною. Градієнти температур по радіусу в деяких дисках при стаціонарних режимах можуть досягати 400°C , а при запусканні 600°C .

Характер напруженого стану диска в процесі експлуатації змінюється, як в наслідок перерозподілу напружень із-за повзучості, так і при запусках та зупинках, які викликають різкі зміни температурних напружень.

Значні ускладнення напруженого стану відбувається за рахунок концентрації напружень в пазах, нерівномірного засмічення монтажних зазорів, різниць в коефіцієнтах лінійного розширення металів лопаток та дисків, вигинань в осьовому напрямку під дією осьового градієнта температур, вібраційних напружень, які збуджуються від коливань лопаток. Додаткові напруження в диску можуть утворюватись в разі анізотропії механічних та фізичних властивостей матеріалу.

Барабан компресора авіаційного двигуна під час роботи повинен мати високу міцність, значні показники видовження та звуження, добрі показники ударної в'язкості, витривалості та тривалої міцності. Виріб повинен працювати 6 тис. год., але температура експлуатації не повинна перевищувати 500°C . Засіб виробництва повинен бути деформівний.

Для виготовлення барабана компресора авіаційного двигуна згідно вказаним властивостям, запропонуємо титанові сплави та корозійностійку сталь.

1.2 Маршрутна технологія виготовлення виробів

Технологія виготовлення виробів на підприємствах газотурбобудівної галузі уявляє собою логічну послідовність технологічних операцій, виконання яких дозволяє отримати якісні вироби із відповідними характеристиками та властивостями матеріалу. Маршрутна технологія уявляє собою рух заготовок по цехам та відділенням підприємства, в ній зазначаються виконувані операції, які можуть повторюватися, але мати різне призначення, режими та забезпечувати зміну форми, розмірів, шорсткості поверхні, мікроструктури та властивостей. В розробці маршрутної технології приймають участь фахівці тих цехів, в яких відбувається обробка даного виробу. Вона може включати десятки операцій. Ураховуючи це в курсовому проекті необхідно розробити спрощену маршрутну технологію, тобто схему маршрутної технології (табл. 1.1).

Як видно з таблиці 1.1, маршрутна технологія виготовлення барабана компресора з титанового сплаву BT8 складається з 7 основних етапів обробки. Спочатку здійснюється вхідний контроль заготовок, після чого відбувається заготівельна операція та штампування для надання необхідної форми. Далі йде попередня механічна обробка з наступним зварюванням окремих частин у єдиний корпус. Ключовим етапом є термічна обробка для формування потрібних властивостей матеріалу.

Таблиця 1.1 – Схема маршрутної технології виготовлення барабана компресора авіаційного двигуна із титанового сплаву BT8

№ з/п	Назва операції (комплексу операцій)	Цех (дільниця), де виконується операція	Призначення операції
1	Вхідний контроль	Заготівельний цех або заготівельна дільниця ковальського цеху	Контроль хімічного складу, розмірів, макроструктури, відсутності дефектів прокату
2	Заготівельна	Заготівельний цех або заготівельна дільниця ковальського цеху	Отримання заготовок із прокату для наступного штампування
3	Штампування	Ковальський цех	Надання необхідної форми, розмірів та створення сприятливої макроструктури
4	Попередня механічна обробка	Механічний цех	Надання деталі необхідних форми та розмірів
5	Зварювання	Зварювальний цех	Надання виробу суцільності
6	Термічна обробка	Термічний цех	Отримання заданих робочим кресленням властивостей матеріалу, виконання вимог щодо геометрії заготовки
7	Остаточна механічна обробка	Механічний цех	Надання виробу остаточних розмірів, геометрії, шорсткості у відповідності із робочим кресленням

Завершується технологія остаточною механічною обробкою згідно креслення. Таким чином реалізується комплексна обробка деталі, що забезпечує необхідні характеристики готового виробу.

1.3 Обґрунтування вибору матеріалу для виробу

Для виготовлення барабана компресора авіаційного двигуна часто застосовують титанові сплави (BT3-1, BT8), а також корозійностійку сталь 20X13.

Сталь 20X13 – корозійностійка сталь мартенситного класу. Сталь має високу стійкість проти корозії лише за умови, якщо вся кількість хрому в сталі припадає на долю твердого розчину. В цьому випадку він утворює на поверхні міцну, захисну оксидну плівку типу $(Cr, Fe)_2O_3$, а також певну кількість карбідів.

20X13 застосовують для виготовлення деталей із підвищеною пластичністю, які піддаються ударним навантаженням (клапанів гідравлічних процесів, предметів домашнього вжитку), використовують в енергетичному машинобудуванні та пічбудуванні, а також для виробів, які зазнають дії слабо агресивного середовища (атмосферних осадів, водних розчинів солей, органічних кислот і таке інше). Цю сталь піддають гартуванню в маслі від 1000 – 1050 °C та високому відпуску при 660 – 770 °C, після якого карбіди присутні у вигляді більш крупних частинок. Застосування більш низького відпуску, який утворює дрібні карбідні частинки, підвищує корозію.

Титанові сплави BT3-1 та BT8 застосовують в авіаційній та космічній промисловості для виготовлення деталей, які працюють при підвищених температурах (150 – 500 °C). Ці сплави мають високі показники міцності та модуля пружності. До переваг також відноситься те, що ці матеріали мають високі показники питомої міцності, яка поступається лише міцності берилієвих сплавів. Електропровідність та коефіцієнт теплопровідності титанових сплавів малі, вони стійкі до зношування та стирання. Титанові сплави відносно стійкі до дії гідроксидів, розчинів солей, азотної та деяких інших активних кислот.

BT3-1 – сплав титану, що легований алюмінієм, ізоморфними β -стабілізаторами та евтектоїдоутворювачами (перехідними та неперехідними елементами). При підвищених температурах β -фаза здатна розпадатися за евтектоїдною реакцією, що окрихчує сплав. BT3-1 належить до системи Ti – Al – Cr – Mo – Fe – Si. Сплав призначений для тривалої експлуатації при 400 – 450°C. Ізотермічне відпалення ($t_1=850 - 880$ °C; $t_2=600 - 650$ °C) забезпечує отримання структури $\alpha+\beta$, із вмістом β -фази – 15%. Після такої обробки сплав має максимальну пластичність та високу термічну стабільність.

BT8 – сплав, що легований алюмінієм, ізоморфними β -стабілізаторами та евтектоїдоутворювачами (неперехідними елементами). Це деформівний жароміцний титановий сплав системи Ti – Al – Mo – Si відноситься до двофазних $\alpha+\beta$ -сплавів мартенситного класу. Алюміній, кремній та цирконій підвищують опір повзучості та тривало міцність. BT8 у відпаленому стані містить α -фазу, 10% β -фази та дисперсні силіциди. Сплав експлуатують при температурах до 450 – 500 °C.

Розглянемо характерні властивості для вибраних матеріалів (сталі 20X13, сплави BT3-1 та BT8), які наведені в таблицях 1.2, 1.3.

Таблиця 1.2 – Хімічний склад матеріалів

Матеріал	Хімічний склад, %															
	Al	Mo	Cr	Si	Fe	C	Zr	Ni	Mn	S	P	O ₂	N ₂	H ₂	Ti	ін.ел.
20X13	-	-	12 - 14	≤ 0,6	≤ 85	0,1 6 – 0,2 5	-	≤ 0,6	≤ 0,6	≤ 0,0 25	≤ 0,0 3	-	-	-	-	-
BT3-1	5,2 – 6,8	2,0 – 3,0	1,5 – 2,5	0,1 5 – 0,3 5	0,2 – 0,7	≤ 0,1 0	≤ 0,5 0	-	-	-	-	≤ 0,1 8	≤ 0,0 5	≤ 0,0 15	≤ 88	≤ 0,3 0
BT8	5,8	2,8	-	0,2	≤	≤	≤	-	-	-	-	≤	≤	≤	≤	-

	– 7,0	– 3,8		– 0,4	0,3	0,1 0	0,5					0,1 5	0,0 5	0,0 15	88	
--	----------	----------	--	----------	-----	----------	-----	--	--	--	--	----------	----------	-----------	----	--

Таблиця 1.3 – Механічні властивості матеріалів в стані постачання

Матеріал	Напрямок вирізки зразка; товщина, мм	Термічна обробка	$\sigma_{0,2}$	σ_B	δ_5	ψ	КСУ, кДж/м ²	НВ
			МПа		%			
20Х13	Повздовжнє, ≤ 150	Нагрів до 1000 – 1050 °С, повітря або масло, відпуск 660-770 °С	450	660	16	55	800	126-197
ВТЗ-1	Повздовжнє, 10 - 60	Подвійний відпал – нагрів при 880 °С, витримка 1 год., охолодження на повітрі; потім нагрів при 550°С, витримка 2-5 год., охолодження на повітрі	1150	1300	7	20	250	340
ВТ8	Повздовжнє, 10 - 60	Подвійний відпал – нагрів до 920-950°С, витримка 1-4 год., охолодження на повітрі; потім нагрів при 570 - 600°С, витримка 1 год., охолодження на повітрі	950	981	9	30	300	285

охолодження на повітрі; потім нагрів при 570 - 600°C, витримка 1 год., охолодження на повітрі							
20	780	950	1100	12	54	-	
300	550	-	880	12	52	-	
400	450	650	820	12	54	-	
450	410	-	800	12	55	-	
500	380	570	750	12	60	-	
550	300	530	720	16	68	-	
600	150	400	680	18	76	-	
650	-	-	600	22	80	-	
700	-	-	400	40	85	-	
800	-	-	200	80	92	-	

Розглянувши хімічний склад, режим термічної обробки, механічні властивості обраних матеріалів, то можна зробити висновок, що найбільш вигідною із урахування потрібних властивостей є сплав ВТ8. Сталь 20Х13 хоча й може працювати при високих температурах, але вона має низькі показники міцності та зависоку пластичність із ударною в'язкістю. Також титанові сплави, в порівнянні зі сталлю, при температурі 500°C мають майже 4 рази більшу питому міцність. А це означає, що вони значно легші за масою, ніж сталь, що позитивно впливає на виробництво авіаційних двигунів. Сплав ВТ3-1 не підходить для виробництва барабану компресора, тому що границя тривалої міцності не відповідає заданим вимогам. Сплав ВТ8 також найкраще підходить за вказаними властивостями, що є обов'язковими для роботи деталі ($\sigma_B=1000$ МПа, $KCU=300$ кДж/м², $\delta_5=10\%$, $\Psi_5=30\%$, $\sigma_{-1}=530$ МПа (за 10^7 циклів), $\sigma_{100}^{500} \geq 500$ МПа).

1.4 Вплив легування на властивості жароміцних титанових сплавів

Розглянемо взаємодію титану з кожним легуючим елементом. Титан (Ti) – метал сріблясто-білого кольору, належить до тугоплавких елементів. Температура плавлення титану 1668°C , густина – $\rho=4,505 \text{ г/см}^3$. Титан має дві поліморфні модифікації α - Ti (ГЦП), що є стійким до 882°C , та β - Ti (ОЦК), що існує при температурах вище 882°C . При $\alpha \rightarrow \beta$ перетворенні об'єм зменшується. При кімнатній температурі твердість йодованого титану (0,08% (Fe+ Al+ Si), 0,019% (C+ N +O+H)) низька – 60НВ, $\delta=50\text{-}60\%$.

Такі властивості пов'язані із особливостями будови ґратки, співвідношення параметрів якої $c/a=1,587$. Із збільшенням кількості домішок міцність Ti збільшується, пластичність – зменшується.

Шкідливими домішками для чистого Ti є вуглець, кисень, водень, азот. Ці елементи утворюють сполуки з високою твердістю, що викликає окрихчення металу. До переваг Ti слід віднести високу питому міцність, здатність працювати в широкому діапазоні температур, в тому числі при температурах від 250 до 500°C , Ti – корозійний метал, утворює на поверхні щільну окисну плівку.

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 титанового сплаву. В двофазному сплаві ВТ8, гідриди не утворюються через присутність β -фази, що добре розчиняє водень, проте виникають зони пересичених воднем твердих розчинів, викликають крихке руйнування при низьких швидкостях деформації. Із збільшенням кількості β -фази, чутливість сплаву до водневої крихкості зменшується. До недоліків титану належать низька теплопровідність, низькі антифрикційні властивості. Титан погано обробляється різанням.

Титан утворює безперервні тверді розчини із α - та β - модифікаціями цирконія, а β - модифікація титана – із молібденом. Інші легуючі елементи обмежено розчиняються в титані.

На рисунку 1.7 приведена класифікація діаграм стану (зі сторони титану) систем на основі титану. Всі діаграми розбиті на три групи: I – діаграми стану систем із безперервною розчинністю легуючих елементів хоча б в одній із модифікацій титану, а також систем, в яких легуючі елементи призводять до стабілізації β -фази при кімнатній температурі, але їх розчинність в α -Ті обмежена; II – діаграма стану систем, в яких введення другого компонента призводить до пониження температури плавлення титана, а потім двофазна рівновага $P + \beta$ змінюється евтектичною або перитектичною рівновагою; III – діаграми стану систем, в яких температура плавлення титану підвищується при введенні другого компонента, а потім двофазна рівновага $P + \beta$ змінюється перитектичною рівновагою.

Кожний з цих груп діаграм стану можна розділити на підгрупи. В першу групу входять діаграми стану: Ia – систем із безперервною розчинністю легуючих елементів в α - та β - модифікаціях титану (Zr); Ib – систем із безперервною в β - і обмеженою розчинністю легуючих елементів в α -Ті без нон варіантних рівноваг в твердому стані (Mo).

Друга група включає діаграми стану наступних підгруп: IIa – із евтектичною та евтектоїдною рівновагами (Si, Fe); IIб – із евтектичною та перитектоїдною рівновагами (C); IIб – із перитектичною та перитектоїдною рівновагами (Al).

Третя група складається із трьох підгруп діаграм стану: IIIa – із перитектичною рівновагою (N, O); IIIб – із перитектичною та перитектоїдною рівновагами та IIIв – із перитектичною та евтектоїдною рівновагами. Жодна із відомих систем не можна віднести до підгруп IIIб та IIIв, але існування таких систем не виключене.

В залежності із низькотемпературною частиною діаграм стану, всі легуючі елементи по впливу на поліморфізм титану, діляться на три групи:

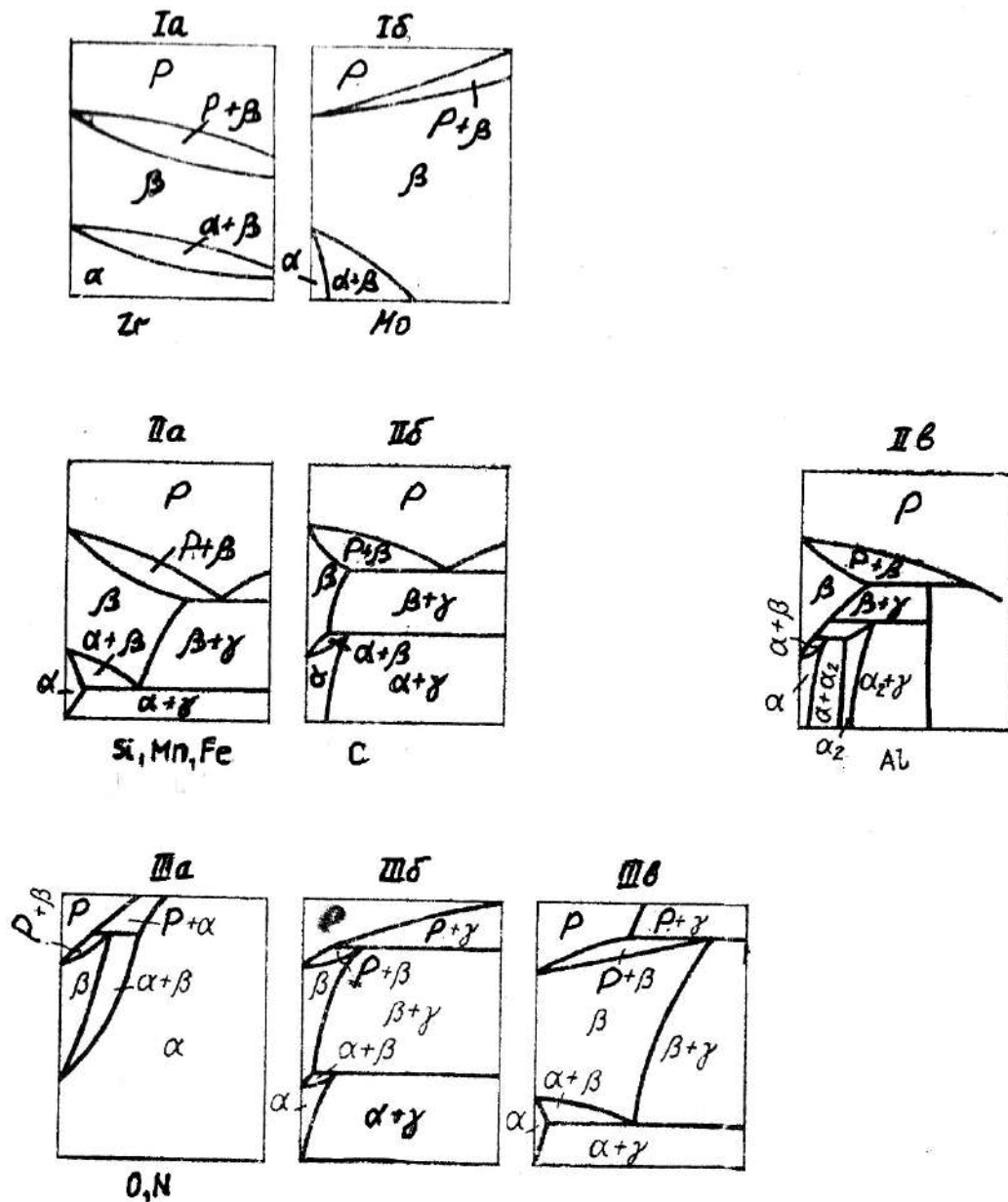


Рисунок 1.7 – Класифікація діаграм стану подвійних систем титану

Перша група представлена α -стабілізаторами – елементами, які підвищують температуру поліморфного перетворення титану (рис. 1.8, а). Із металів до ряду α -стабілізаторів відносяться алюміній, із неметалів – вуглець, азот, кисень.

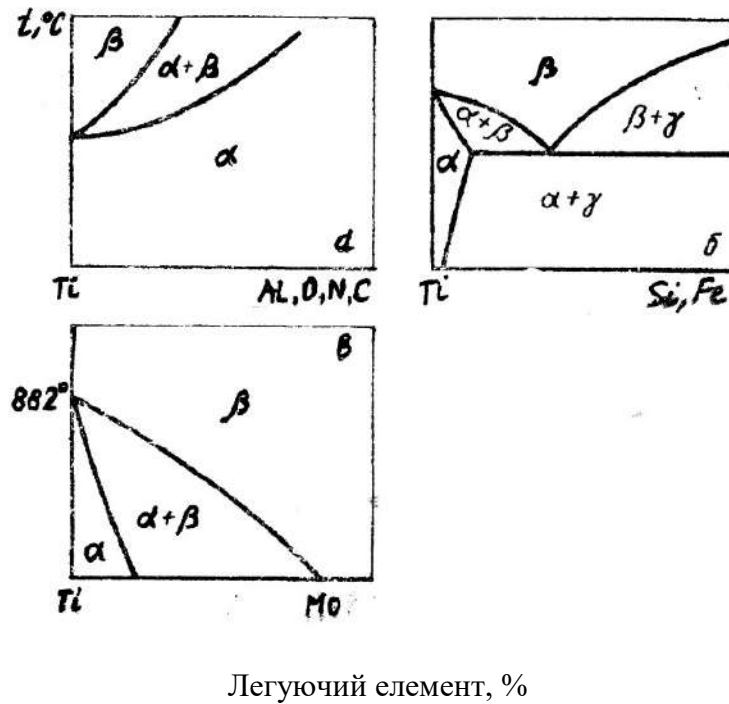


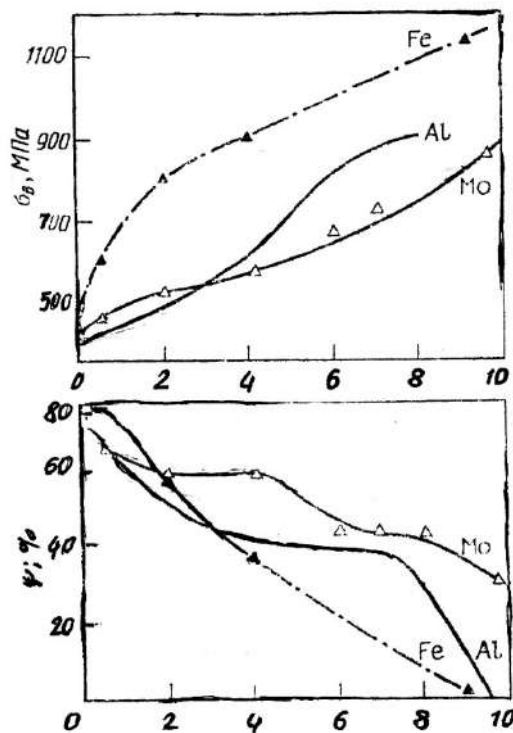
Рисунок 1.8 – Схеми впливу легуючих елементів і домішок на температуру поліморфного перетворення титану

До другої групи входять β -стабілізатори – елементи, які понижають температуру поліморфного перетворення титану. Їх можна розділити на підгрупи. В сплавах титану із елементами першої підгрупи при достатньо низькій температурі відбувається евтектоїдний розпад β -фази $\beta \rightarrow \alpha + \gamma$ (рис. 1.8, б); до ряду таких елементів відносяться кремній, залізо – їх називають евтектоїдоутворювачами β -стабілізаторами. В сплавах титану із евтектоїдоутворювачами β -стабілізаторами, представленими перехідними елементами, β -фаза доволі стійка і залишається тривалий час при температурах нижче евтектоїдної. В сплавах титану із неперехідними елементами β -фази не вдається зафіксувати гартування із температур вище евтектоїдної.

В сплавах титану із елементами другої підгрупи при достатньо високій їх концентрації β -розчин залишається до кімнатної температури, зазнаючи евтектоїдного розпаду (рис. 1.8, в). До числа цих елементів відноситься молібден. Оскільки він утворює безперервний розчин із β -Ti, молібден назвали ізоморфним β -стабілізатором.

Третя група представлена легуючими елементами, які мало впливають на температуру поліморфного перетворення титану. Це цирконій, який називають нейтральним зміцнювачем.

Зміцнення титанових сплавів у області α -розчинів (розчинне зміцнення) залежить від співвідношення розмірів атомів легуючих елементів і титану, розмірного фактора, а також від невідповідності їх модулів зсуву. Титан найбільш сильно зміцнюють такі елементи, як молібден, кремній, залізо, менш слабо – алюміній та порівняно слабо цирконій (рис. 1.9).



Легуючий елемент, % (по масі)

Рисунок 1.9 – Вплив легуючих елементів на механічні властивості подвійних сплавів при кімнатній температурі

Інтенсивність зміцнення, яка знаходиться за допомогою тангенса кута нахилу кривої залежності зміцнювальних характеристик від складу до вісі абсцис, зменшується із збільшенням вмісту всіх легуючих елементів, крім алюмінію. Алюміній в області концентрації 0 – 4% (по масі) зміцнює титан слабше, ніж в інтервалі 4 – 7% (по масі).

Відповідно із правилами Н.С. Курнакова, механічні властивості сплаву системи Ti – Zr, для якого характерний безперервний α -розчин, змінюється в залежності від складу по кривій із максимумом твердості, тимчасового опору розриву й границі текучості при вмісті приблизно 50% (ат.) компонентів.

Згідно правил Н.С. Курнакова, зміцнювальні властивості відпаленого подвійного сплаву титану із β -стабілізаторами повинні підвищуватися по криволінійній залежності в області α -розчину, адитивно в двофазній ($\alpha+\beta$)-області і знову по криволінійній залежності в області β -розчину із максимумом при 50% (ат.) Ti і β -стабілізуючого елемента (рис. 1.10). В дійсності механічні властивості ($\alpha+\beta$)-сплаву не підпорядковуються закону адитивності в зв'язку з тим, що при переході від α - до ($\alpha+\beta$)-структури, зерно сильно подрібнюється, притому зерниста структура часто змінюється пластичною. При переході від $\alpha+\beta$ - до β -структури, зерно знову укрупнюється. Відмічене подрібнення зерна призведе до відхилення значень в порівнянні із отриманими по закону адитивності.

Додаткове зміцнення сплавів із-за зменшення величини зерна можна оцінити за рівнянням Хола-Петча

$$\sigma_s = \sigma_i + \frac{K_y}{\sqrt{D}}, \text{ МПа},$$

де σ_i – напруження внутрішнього тертя в ґратці при переміщенні дислокації, МПа;

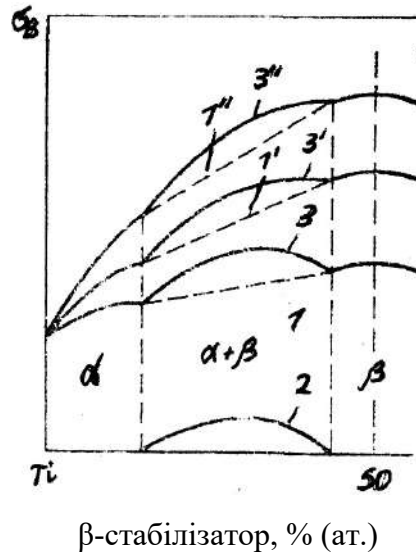
K_y – внесок в загальне зміцнення матеріалу границь зерен та субзерен, МПа*м^{1/2};

D – розмір блоків, м,
яке преобразоване до виду:

$$\Delta\sigma = K(d_2^{-1/2} - d_1^{-1/2}), \text{ МПа}$$

де $\Delta\sigma$ – різниця границь текучості сплаву із величиною зерна d_2 та d_1 .

Для титана $K=0,41 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$, типова величина зерна α - і β -сплавів 0,15 – 0,20 мм. Звідси випливає, що $\Delta\sigma \approx 175\ldots180 \text{ МПа}$, що близько відповідає спостерігаємому додатковому зміцненню.



1, 1', 1'' – у відповідності із законом адитивності; 2 – додаткове зміцнення, обумовлене зміною зерна; 3, 3', 3'' – дійсні закономірності

Рисунок 1.10 – Схема залежності зміцнювальних властивостей відпаленого подвійного сплаву від вмісту β -стабілізаторів при різних властивостях дотичних α - і β -фаз

В залежності від співвідношення зміцнювальних характеристик дотичних α - і β -фаз і величини коефіцієнта K зміна міцності (твердості) $(\alpha+\beta)$ -сплаву в функції від складу може описуватись кривою із максимумом, а також кривою, яка зростає із перегинами або без них (рис. 1.10). В залежності від ступеня подрібнення структури морфології фаз, стану міжфазних границь максимально доповненого зміцненням може зміщуватись в ту або іншу сторону від складу сплаву.

В теперішній час для приблизної оцінки зміцнювальних властивостей зливків титанового сплаву, використовують співвідношення:

$$\sigma_{\sigma} = K_o \sigma_o + K_1 C_1 + K_2 C_2 + \dots + K_i C_i,$$

де σ_{σ} – тимчасовий опір розриву технологічної проби (кованого та відпаленого прутка перерізом 14x14 мм);

σ_o – міцність основи сплаву;

K_o – коефіцієнт зміцнення основи сплаву;

K_1, K_2, K_i – коефіцієнти зміцнення від введення 1% (по масі) легуючих елементів;

C_1, C_2, C_i – вміст легуючих елементів в сплаві.

Під міцністю основи (σ_o) розуміють міцність титанової губки (σ_{Γ}) і зміцнення, обумовлене відходами, які вводяться в шихту ($\sigma_{\text{відх}}$):

$$\sigma_o = \sigma_{\sigma} + \sigma_{\text{відх}} = 0,33HB_{\sigma} + K_{\text{відх}} C_{\text{відх}},$$

де HB_{Γ} – твердість титанової губки, яку використовують;

$K_{\text{відх}}$ – коефіцієнт зміцнення від введення відходів;

$C_{\text{відх}}$ – частка відходів, які вводяться в шихту.

Коефіцієнт зміцнення $K_{\text{відх}}$ складає: для стружки $K_{\text{стр}}=220$ МПа; для кускових відходів $K_{\text{куск}}=60$ МПа; для обрізки $K_{\text{обр}}=40$ МПа.

Зміцнення складно легованого сплаву не складається адитивно із зміцнення, обумовленого введенням окремих компонентів, з'являється також додаткове зміцнення, обумовлене взаємодією легуючих елементів між собою в розчині, а також подрібнення зерна в двофазному сплаві. Ось чому лінійна модель зміцнення неправильна. Доцільно зберегти лінійну модель зміцнення, а всі інші похибки, пов'язані із цим зміцненням, врахувати через коефіцієнт K_o . На основі статистичного аналізу механічних властивостей технологічної проби та хімічного складу зливків, отримане наступне рівняння, за допомогою якого знаходиться ефективність зміцнення титанового сплаву легуючими елементами, МПа:

$$\sigma_s = 1,32\sigma_o + 60C_{Al} + 50C_{Mo} + 200C_{Si}$$

Жароміцність титанових сплавів забезпечується багатокomпонентним легуванням α - і β -розчинів (розчинний механізм зміцнення); ефективно використовувати в цих цілях дисперсійне твердіння поки що не вдається.

Оскільки алюміній сильно підвищує зміцнювальні властивості титану при підвищених температурах (рис. 1.11), він являється неодмінним легуючим елементом жароміцних титанових сплавів. Із збільшення вмісту алюмінію, жароміцність титану підвищується, але пластичність падає. Особливо різке падіння пластичності спостерігається при концентраціях більше 7,0% (по масі) Al із-за утворення надструктури α_2 (див. рис. 1.9), ось чому склад титанових сплавів потрібно вибирати таким, щоб утворені надструктури α_2 було виключено. α_2 – твердий розчин на основі сполучення Ti_3Al . Фаза α_2 представляє собою впорядкований твердий розчин із гексагональною структурою типу Mg_3Cd .

Цирконій підвищує жароміцність титанових сплавів, тому що, забезпечуючи розчинне зміцнення титану (хоча й не велике), не знижує зв'язку. Разом з тим цирконій збільшує розчинність β -стабілізаторів в α -фазі, що створює можливість додаткового зміцнення жароміцного α -сплаву. Сприятливий вплив молібдену та вольфраму на жароміцність пов'язано із великим параметром невідповідності модулів зсуву, а кремнію – із утворенням дисперсійних силіцидів.

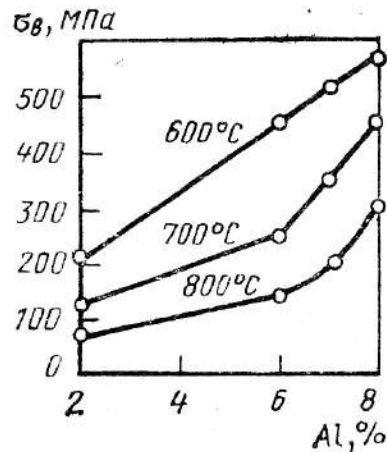


Рисунок 1.11 – Вплив алюмінію на короточасну міцність сплавів Ti – Al при різних температурах [7]

Домішки втілення (азот, кисень та вуглець) знижують технологічність, пластичність, зварюваність, підвищують чутливість титанового сплаву до концентраторів напружень і до холодноламкості, погіршують його термічну стабільність. Термічна стабільність, під якою розуміють можливість сплаву зберігати високі зміцнювальні та пластичні властивості після тривалої дії підвищених температур та напружень, - важлива характеристика жаростійких титанових сплавів. Для оцінки термічної стабільності сплаву, зразки витримують під час певного часу (100 або 1000 годин) при температурах, близьких до робочих (400 – 600°C), а потім охолоджують до кімнатної температури та визначають їх механічні властивості. Після витримки при достатньо високих температурах, сплав втрачає низьку температурну пластичність через перетворення, які проходять в ньому, частіше за все через розпад β -фази та впорядкування α -фази (утворення надструктури α_2). Чим більше температура, із якої починається зниження пластичності при подібних випробуваннях, тим більша термічна стабільність сплаву. Домішки втілення пришвидшують процеси розпаду метастабільних β - та α -фаз і тому понижують термічну стабільність.

Структура і механічні властивості титану залежать від неминуче присутніх в ньому домішок, які розділяють на дві групи: а) які створюють з

титаном розчини впровадження (кисень, азот, вуглець, водень); б) які створюють з титаном розчини заміщення (залізо і кремній). Домішки впровадження значно сильніше впливають на властивості титану, чим домішки заміщення.

Кисень і азот стабілізують α -фазу, підвищуючи температуру поліморфного перетворення, і добре розчиняються в α -титані (див. рис. 1.7, IIIa). В області малих концентрацій кожна сота частка відсотка (по масі) кисню підвищує тимчасовий опір розриву і межу текучості титану приблизно на 12,5 МПа (рис. 1.12). Кисень в інтервалі 0,1-0,5% (по масі) порівняно мало впливає на пластичність. Азот зміцнює титан ще в більшому ступені, чим кисень (див. рис. 1.12). В області малих концентрацій (до 0,2% N) кожна сота частка відсотка (по масі) азоту підвищує тимчасовий опір розриву і межу текучості титану приблизно на 20 МПа. Пластичні властивості титану при введенні азоту зменшуються.

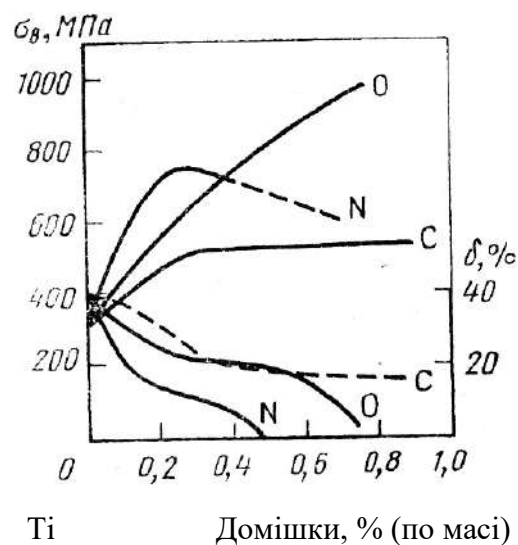


Рисунок 1.12 – Вплив кисню, азоту та вуглецю на механічні властивості титану [7]

Підвищення зміцнювальних характеристик титану при легуванні киснем і азотом пояснюють сильною пружною і хімічною взаємодією розчинених атомів цих елементів з дислокаціями. Азот надає сильнішу зміцнюючу дію в

порівнянні з киснем, тому що енергія взаємодії атомів азоту з дислокаціями в титані більше, ніж для кисню в титані.

Кисень і азот сильно зменшують пластичність титану із-за зміцнення металу при розчиненні цих домішок, а також внаслідок різного їх впливу на параметри c і a гексагональної щільноупакованої ґратки α -титана. При розчиненні кисню і азоту в титані параметр c зростає досить сильно, а параметр a мало. В результаті відношення осей c/a збільшується і наближається до теоретичного значення 1,633, при якому титан втрачає перевагу по пластичності, яку він має перед іншими металами з гексагональною структурою.

Титан утворює з вуглецем стійкий карбід TiC , який плавиться при $3140^{\circ}C$. Розчинність вуглецю в β -фазі невелика, вона складає всього 0,8% (по масі) при $1750^{\circ}C$ і 0,15% (по масі) при $920^{\circ}C$. Вуглець підвищує температуру поліморфного перетворення титану (див. рис. 1.7, Пб). Розчинність вуглецю в α -фазі різко зменшується з пониженням температури. З цієї причини при більше 0,1% C в структурі титану з'являються виділення карбиду TiC .

Вуглець менше впливає на властивості титану, чим кисень і азот. В області малих концентрацій (до 0,3%) одна сота частка відсотка (по масі) вуглецю підвищує тимчасовий опір розриву і межу текучості титану приблизно на 7 МПа, тобто в три рази менш інтенсивно, чим азот. Меншу зміцнюючу дію вуглецю в порівнянні з азотом і киснем пояснюють меншими силами зв'язку атомів вуглецю з дислокаціями в порівнянні з системами $Ti - O$ і $Ti - N$. Якщо концентрація вуглецю перевищує межу розчинності, то вуглець значно знижує пластичність титану із-за виділення карбиду.

Водень розширює область β -фази і звужує область α -фази (рис. 1.13). При температурі $335^{\circ}C$ відбувається евтектоїдний розпад β -фази на α -фазу і гідрид титану γ (γ -твердий розчин на основі TiH_2). Евтектоїдна точка лежить при 44%(ат.) H_2 [1,50% (по масі)]. Розчинність водню в α -титані при евтектоїдній температурі досить велика - 0,18% (по масі) або 7,9% (ат.), але з пониженням температури різко зменшується і складає близько 0,002% (по масі) при

кімнатній температурі. Водень - вельми шкідлива домішка в титані і його сплавах, він різко знижує ударну в'язкість навіть при дуже невеликих його концентраціях із-за виділення гідридів.

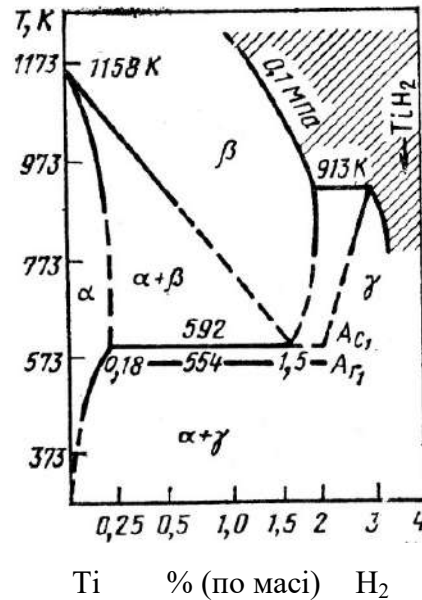


Рисунок 1.13 – Діаграма стану системи титан – водень [7]

Залізо утворює з α -і β -титаном тверді розчини заміщення і стабілізує β -фазу. Максимальна розчинність заліза в α -титані складає менше 0,2% (по масі). З пониженням температури, розчинність заліза зменшується і вже при температурі 500°C стає менше 0,01%.

Залізо значно менше впливає на механічні властивості титану, чим домішки впровадження. Одна сота частка відсотка (по масі) заліза в області малих концентрацій (до 0,5%) підвищує тимчасовий опір розриву і межу текучості титану приблизно на 2 МПа.

У системі титан -кремний утворюється декілька силіцидів, з яких найближчий по складу до титана Ti_5Si_3 . Кремний знижує температуру поліморфного перетворення і при 0,65% (по масі) Si відбувається евтектоїдне перетворення $\beta \rightarrow \alpha + Ti_5Si_3$, що протікає з досить великою швидкістю. Розчинність кремнію в α -титані складає 0,45% (по масі) при 860°C і близько 0,30% (по масі) при 750°C. Кремний впливає на механічні властивості титану приблизно так само, як і залізо. Одна сота частка відсотка (по масі) кремнію в

області малих концентрацій (до 0,5%) підвищує тимчасовий опір розриву і межу текучості титану на 2,6 МПа. При малих концентраціях залізо і кремній майже не впливають на пластичність титану.

2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Характеристика обраного матеріалу

Для виготовлення барабана компресора авіаційного двигуна, було запропоновано титановий сплав ВТ8. Цей сплав задовольняє вказаним вимогам, а саме: тривалість експлуатації 6000 год., працює при $T_{\text{експл}} < 500^{\circ}\text{C}$, $\sigma_B = 1000\text{МПа}$, $\sigma_5 = 10\%$, $\Psi_5 = 30\%$, $K_{\text{СИ}} = 300\text{КДж/м}^2$, $\sigma_{-1} = 530\text{МПа}$ (за 10^7 циклів), $\sigma_{100}^{500} \geq 500\text{МПа}$.

Хімічний склад сплаву ВТ8 наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1. – Хімічний склад сплаву ВТ8 [4]

Матеріал	Масова частка елементів, %									
	Al	Mo	C	Zr	Fe	Si	O ₂	N ₂	H ₂	Ti
ВТ8	5,8 – 7,0	2,8 – 3,8	≤0,10	≤0,5	≤0,3	0,2 – 0,4	≤0,15	≤0,05	≤0,015	≤88

2.2 Дослідження мікроструктури

До початку досліджень, зразки титанового сплаву були піддані попередній підготовці. Спочатку їх шліфували, щоб отримати плоску поверхню зразка. Після цього полірували для подальшого покращення поверхневої якості зразків. Після полірування зразки були готові для подальших досліджень мікроструктури. Наступним етапом було щавлення зразків в спеціально підготовлених розчинах кислот. Цей дозволило виявлення фазовий склад сплаву і визначити їх розподіл в мікроструктурі. Щавлення дозволило відокремити фази та вивчити їхні особливості.

Металографічний мікроскоп МІМ-8М (рис. 2.1) призначений для дослідження мікроструктури металів в світловому полі при прямому та косому освітленні, а також в темному полі і в поляризованому світлі. Для візуального спостереження мікроскоп забезпечений монокулярною та бінокулярною насадками. Набір ахроматичних та апохроматичних об'єктивів і окулярів забезпечують збільшення мікроскопа при візуальному спостереженні від 100х до 1350х.

Джерело світла 1 представляє собою лампу розжарювання К-30 потужністю 170 Вт. За лампою розжарювання розташовується колектор 2, який складається із лінзи з параболічною поверхнею. Колектор змонтований в патрубку, який закріплений на кронштейні освітлювача. Він необхідний для проектування нитки лампи К-30 в площину апертурної діафрагми при спостереженні спостережені об'єктів в світловому полі.

Теплопоглинач 3 являє собою скляну пластину зі скла СЗС-14 і необхідна для запобігання поляризатора від нагрівання. Знімна відкидна лінза 4 може бути включена в систему і виключена з неї; включається відкидна лінза 4 тільки при роботі в темному полі. Світлофільтри 6 з кольорового скла змонтовані в металевому диску.

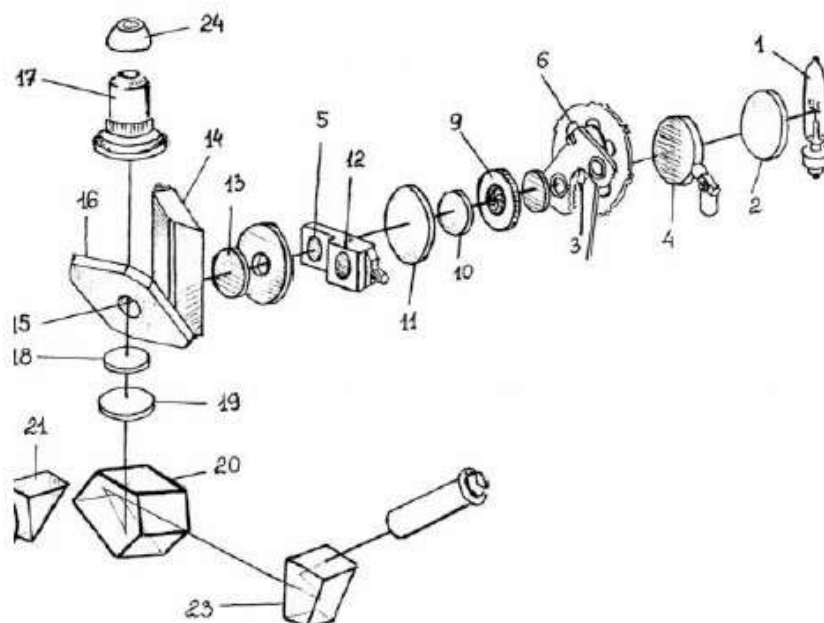


Рисунок 2.1 – Оптична схема мікроскопу МІМ-8М

Зміною діаметру апертурної діафрагми 9 регулюється освітленість об'єкту. Апертурна діафрагма має можливість переміщатися в плоскості, перпендикулярної до осі освітлювача. Це переміщення необхідно для отримання косого освітлення об'єкту. На оправі діафрагми присутній індекс і шкала переміщення. Лінзи освітлювального тубусу 10 і 11 проектує апертурну діафрагму. Польова діафрагма 12 і кільцева діафрагма змонтовані на одній планці. При роботі на мікроскопі польова діафрагма може бути відцентрована відносно поля зору за допомогою двох гвинтів на оправі. Кільцева діафрагма 5 представляє собою скляну пластину з непрозорою центральною частиною і використовується при дослідженні об'єктів в темному полі. Лінза 13 освітлювального тубусу проектує польову діафрагму в безкінечність, а апертурну діафрагму – в площину опорного торця для об'єктів. Призма 14 включається в систему для отримання косого освітлення об'єкту.

Відбивна пластина 15, яка відхиляє світловий пучок на 90° , а також металевий конденсор 24 темного поля з параболічною відбивною поверхнею необхідний для освітлення об'єктів в темному полі.

При роботі в світлому полі об'єктив 17 працює і в якості конденсора. Аналізатор 18, який складається з двох скляних пластинок використовується при спостереженні об'єктів в поляризованому світлі. Аналізатор може обертатися навколо своєї осі в межах $0 - 90^\circ$ і вмикається при роботі в поляризованому світлі одночасно з поляризатором.

Ахроматична лінза 19 візуального тубусу, висувна призма 20 візуального тубусу змонтована одночасно з поляризатором на загальній платі. Нерухома призма 23 візуального тубусу необхідна для придання похилого положення візирною осі тубуса.

Оскільки дослідження відбувалось в світлому полі, то розглянемо принцип дії мікроскопа в такому режимі (рис. 2.2)

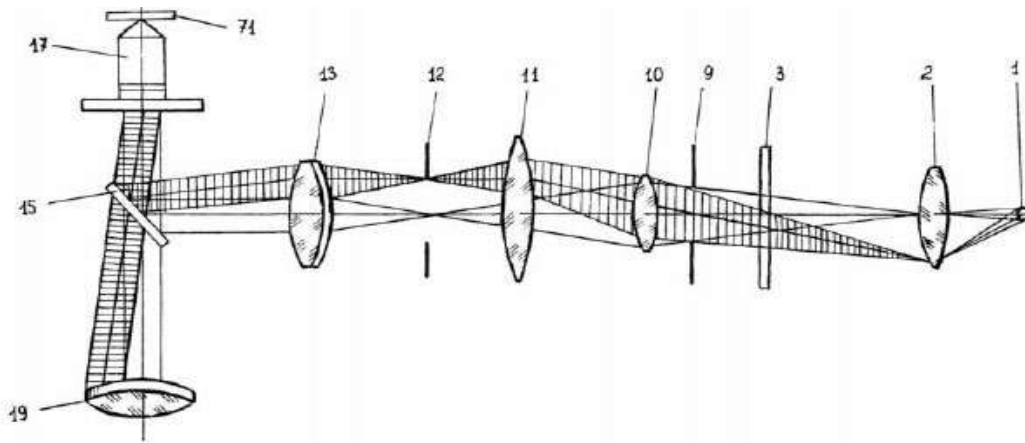


Рисунок 2.2 – Хід променів в мікроскопі при дослідженні в світлому полі

При спостереженні об'єктів в світлому полі колектор 2 зображує джерело світла на апертурній діафрагмі 9. Апертурна діафрагма є системою трьох лінз 10, 11, 13 і відбивальною пластинкою 15 відображається у вихідному об'єктиві 17. Польова діафрагма 12 знаходиться у фокусі третьої лінзи 13 освітлюваного тубусу і зображає її в безкінечність.

Світло, який надходить від лампи К-30 проходить через апертурну і польову діафрагму і падає на відбивальну пластину 15, котра відбиває частину світла на зразок через об'єктив 17, а найбільша частина світла проходить через пластину і не приймає участі в освітленні зразка. Якщо в хід променів вести призму 14 косого освітлення, то потік світла відобразиться нею на зразок через об'єктив.

РОЗРОБКА РЕЖИМІВ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ

3.1 Вибір технології термічної обробки жароміцних титанових сплавів

Для титанових сплавів, а саме для ВТ8, застосовують в загальному наступні види термічної обробки:

- подвійний відпал – нагрів до 920 - 950°C, витримка 1 – 4 год., охолодження на повітрі; потім нагрів при 570 - 600°C, витримка 1 год., охолодження на повітрі;
- ізотермічний відпал – нагрів при 870°C, витримка 1 год., охолодження до 650°C, витримка 2 год., охолодження на повітрі;
- зміцнювальний режим – гартування від 920°C у воді, потім старіння при 550°C напруті 1 – 6 год., охолодження на повітрі;
- ВТМО – гартування у воді після високотемпературної деформації (час розриву між закінченням деформації та гартування не повинен перевищувати 30–40 с), потім старіння при 570°C напруті 2 год., охолодження на повітрі.

Для титанових ($\alpha+\beta$)-сплавів застосовують ізотермічний відпал. Він складається з нагріву сплаву при порівняно високих температурах t_1 , достатніх для зняття нагартованості, до температур t_2 , що забезпечують високу стабільність β -фази (ці температури зазвичай дуженизькі для розвитку інтенсивного возврату і рекристалізації в загартованому металі) і витримки при цій температурі з подальшим на повітрі. Такий відпал забезпечує поєднання досить високої міцності і жароміцності і доброї пластичності.

Зміцнювальна термічна обробка забезпечує свою ефективність тільки при температурах експлуатації не більше 450 °C.

Фазовий склад сплаву ВТ8 змінюється в залежності від температури нагріву та швидкості охолодження (табл. 3.1, 3.2). При пониженні швидкості охолодження в процесі гартування із 1000 °C наряду із α' -фазою фіксується β -фаза (табл. 3.2), а після гартування із 900 °C фіксується α'' -, α - і β -фази.

Таблиця 3.1 – Зміна фазового складу і кількості β -фази в залежності від температури гартування сплаву ВТ8 [5]

Температура гартування, °С	Фазовий склад	Кількість β -фази, %
Після кування	$\alpha+\beta$	9
500	$\alpha+\beta$	-
600	$\alpha+\beta$	-
800	$\alpha+\beta$	-
850	$\alpha+\beta$	18
880	$\alpha+\alpha''+(\beta)$	-
900	$\alpha+\alpha''$	-
950	$\alpha'(\alpha'')+\alpha$	0
1050	α'	0

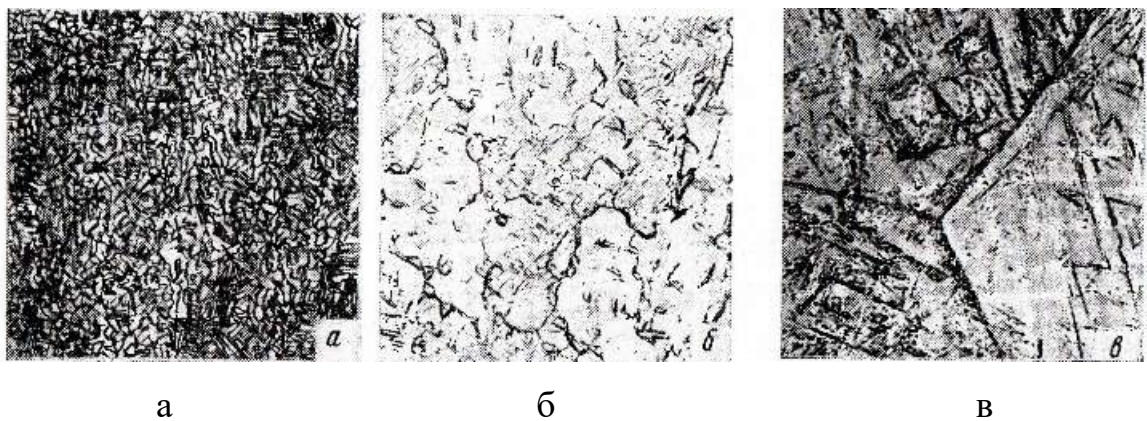
Таблиця 3.2 – Зміна фазового складу в залежності від швидкості охолодження при гартуванні сплаву ВТ8 [5]

Температура гартування, °С	Швидкість охолодження, град/с	Фазовий склад
1000	300 – 1000	α'
	250	α'
	200	$\alpha'+\beta$
	350 – 925	$\alpha''+\alpha$
	300	$\alpha''+\alpha$
	250	$\alpha+\alpha''+\beta$
900		

Після нагріву до 650 – 850 °С швидкість охолодження не надто впливає на часове протистояння розриву. Пластичність деформованого сплаву ВТ8 підвищується, а міцність знижується після нагріву при 850 – 900 °С незалежно від швидкості охолодження. Після нагріву до 950 – 1000 °С із підвищенням швидкості охолодження, часовий опір розриву збільшується, а пластичність падає.

По мірі підвищення температури нагріву під гартування із 900 до 975 °С, часовий опір розриву сплаву підвищується. Найкраще поєднання властивостей досягається після гартування із 950 °С ($\sigma_B=1220$ МПа; $\delta=16,5\%$; $\Psi=50,5\%$). Границя текучості сплаву із підвищенням температури гартування знижується і досягає мінімального значення після гартування із 900 °С, а потім підвищується із подальшим підвищенням температури до 950 – 1000 °С. Після гартування із 1000 – 1200 °С різко падають пластичні властивості, знижується і часовий опір розриву.

Після відпалу при температурах до 800 °С особливих змін в мікроструктурі не спостерігається в порівнянні із структурою після кування. Після гартування із 900 – 950 °С спостерігається зменшення кількості α -фази в порівнянні із структурою деформованого металу. Після гартування із 975 °С в структурі сплаву спостерігаються зерна первинної α -фази на фоні перетворення β -фази. При швидкому охолодженні із 1000 °С мікроструктура представляє α' -мартенсит (рис. 3.1).

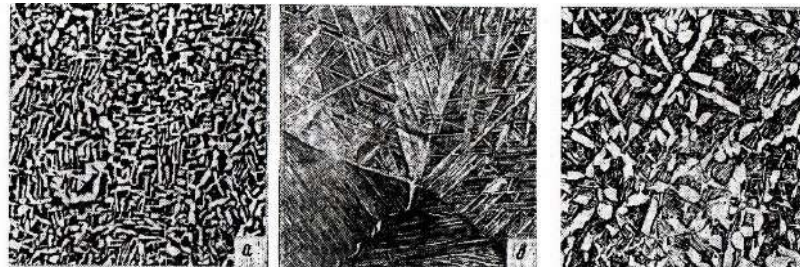


а – 950°С; б – 975°С; в – 1000°С, х500

Рисунок 3.1 – Мікроструктура сплаву ВТ8 після гартування в воду із різних температур

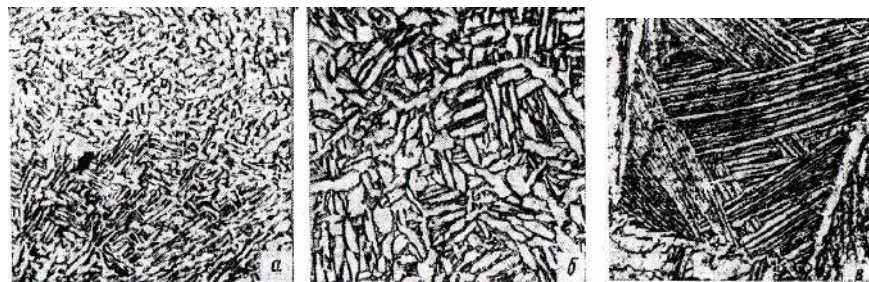
Після охолодження на повітрі із 950 і 975 °С спостерігаються дві структурні складові: α -фаза (світла) та перетворена β -фаза (темна). При підвищенні температури нагріву під гартування із 950 до 975 °С кількість α -фази

зменшується, а кількість α' -мартенситу збільшується. В структурі сплаву ВТ8 після відпалення і охолодження на повітрі α -фази значно менше, ніж після відпалення і охолодження із піччю (рис. 3.2, 3.3).



а б в
а – 950; б – 975; в – 1000, х500

Рисунок 3.2 – Мікроструктура сплаву ВТ8 після охолодження на повітрі із різних температур, °С



а б в
а – 950; б – 975; в – 1000, х500

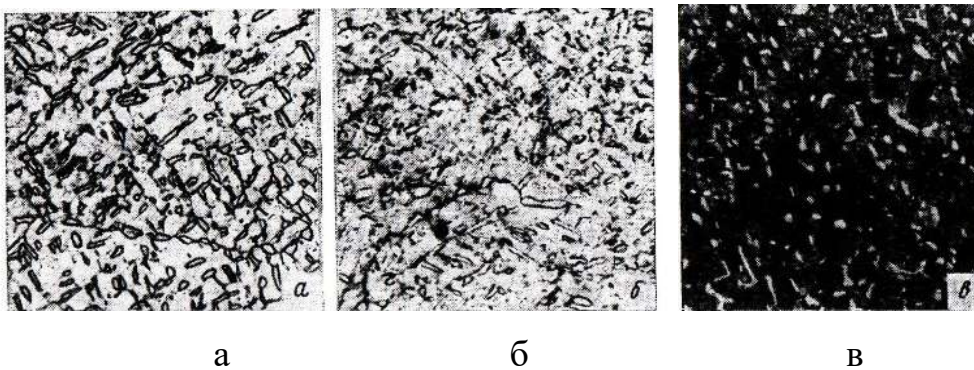
Рисунок 3.3 – Мікроструктура сплаву ВТ8 після охолодження із піччю із різних температур, °С

Чим повільніше охолодження, тим грубіша структура перетворення β -фази, кількість виділень α -фази більше і їх розміри крупніші. Фаза α розташовується в об'ємі вихідних β -зерен і по границям зерен.

Старіння сплаву ВТ8 призведе до підвищення його зміцнювальних властивостей і пониження пластичних із-за розпаду нестабільних фаз. Найбільш висока міцність досягається після старіння при 400 і 500 °С під час 1 години. Помітне знеміцнення спостерігається при температурах старіння 600 °С під час 25 годин. Підвищення температури старіння до 700 °С викликає повне

зміцнення сплаву. Пониження температури нагріву під гартування із 975 до 950 °С майже не впливає на властивості після старіння.

На рисунку 3.4 показана мікроструктура сплаву ВТ8 після гартування із 975 °С і наступного старіння при 400, 500, 600 °С під час 1 години. Після старіння при 400 – 500 °С мікроструктура сплаву майже не відрізняється від мікроструктури після гартування. Після старіння при 600 – 700 °С відрізняється висока протравленість шліфа, що, очевидно, пов'язана із розпадом α'' -фази.



а – 400; б – 500; в – 600, х500

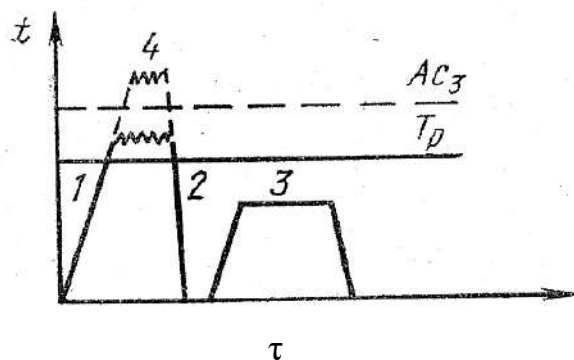
Рисунок 3.4 – Мікроструктура сплаву ВТ8 після гартування в воді із 975 °С і старіння під час 1 години при різних температурах, °С

Вивчення мікроструктури показало, що пониження зміцнювальних властивостей сплаву, загартованого від 975 °С, із підвищення часу старіння при 600 – 700 °С пов'язано із коагуляцією продуктів розпаду метастабільних фаз.

Високотемпературна термомеханічна обробка титанових сплавів (рис. 3.5) полягає в гарячій деформації сплаву в $\alpha+\beta$ - або β -області, і старінні. В результаті, здійснюваного відразу після закінчення гарячої деформації, в металі пригнічуються рекристалізаційні процеси і зберігаються, хоча б частково, особливості структури і тонкої будови гарячедеформованого металу. Старіння сплаву з такою структурою забезпечує підвищені механічні властивості в порівнянні із зміцнюючою термічною обробкою.

Ефективність використання ВТМО для поліпшення комплексу властивостей титанових сплавів пов'язана з їх здатністю не тільки до

деформаційного зміцнення, але і до термічного зміцнення, обумовленого розпадом метастабільних фаз, що фіксуються прискореним охолодженням після завершення гарячої деформації. Тому істотний ефект ВТМО спостерігається тільки у титанових сплавах з достатньою кількістю нестабільної β -фази. З цієї ж причини ВТМО слід проводити при температурах, близьких до $T_{кр}$, після гарту з яких фіксується максимальна кількість β -фази.



1 – нагрів під гартування і деформація; 2 – охолодження у воді; 3 – старіння; 4 – деформація; T_p – температура рекристалізації; A_{c3} – температура $\alpha+\beta/\beta$ -переходу

Рисунок 3.5 – Схема високотемпературної термомеханічної обробки

Термомеханічна обробка з деформацією при температурах 700-800°C не дає істотних переваг у властивостях в порівнянні із стандартним термічним зміцненням, оскільки після цих режимів обробки не утворюється достатньо великої кількості метастабільної β -фази. До того ж з пониженням температури обробки збільшується кількість β -стабілізаторів в β -фазі, у зв'язку з чим підвищується її стабільність і знижується здібність до зміцнення при старінні.

Ефект ВТМО із зростанням ступеня деформації спочатку підвищується у зв'язку із збільшенням щільності дефектів кристалічної будови β -фази, що піддається розпаду при старінні, досягає максимуму в певному інтервалі ступенів деформації, а потім зменшується в результаті розвитку в процесі деформації при більших її ступенях динамічної рекристалізації.

Оптимальним режимом ВТМО титанового сплаву ВТ8 являється деформація на 40 – 70% у верхньому інтервалі температур $\alpha+\beta$ -області (850–920°C) із наступним гартуванням із деформаційного нагріву і старінням.

Розглянувши чотири запропонованих режими, можна зробити висновок, що найоптимальнішим видом термічної обробки є подвійний відпал (рис. 3.6).

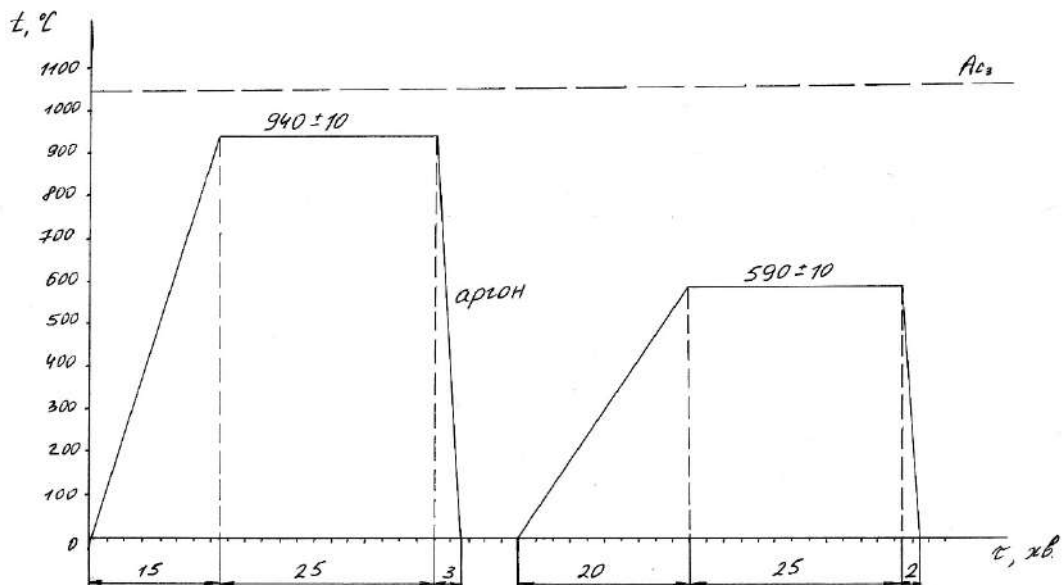
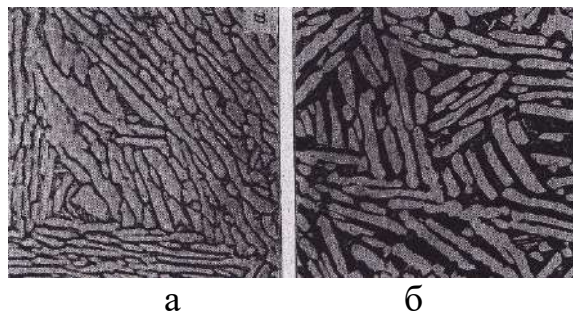


Рисунок 3.6 – Схема подвійного відпалу

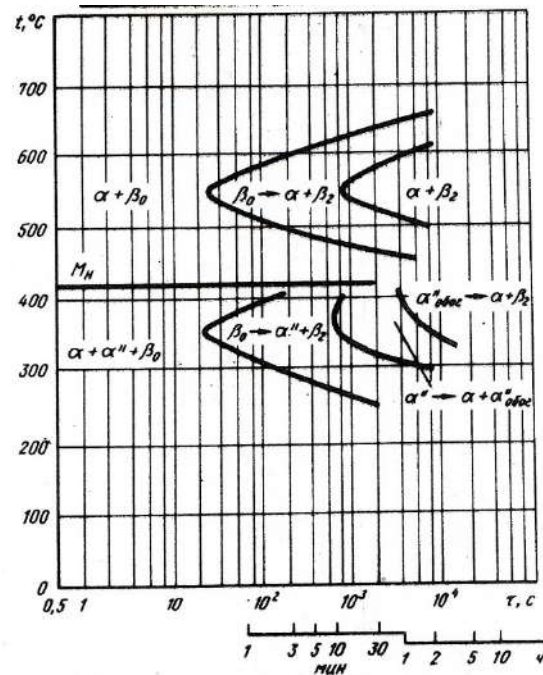
Зважаючи на вказані вимоги, це основний режим, який застосовується для деталей, які тривалий час працюють при температурах до 500 °С. Також після охолодження в сплаві фіксується метастабільна β -фаза, що розпадається на другій ступені нагрівання. Сплав набуває більш високої міцності, пластичність – зменшується (рис. 3.7).



а – ізотермічний відпал; б – подвійний відпал

Рисунок 3.7 – Мікроструктура сплаву ВТ8

В результаті, отримуємо структуру $\alpha+\beta$, що видно із діаграми ізотермічного перетворення (рис. 3.8).



β_0 – метастабільний β -твердий розчин; β_2 – збагачений β -стабілізаторами твердий розчин, який в даних умовах прагне до рівноважного стану

Рисунок 3.8 – Діаграма ізотермічного перетворення [8]

Із рисунка 3.9 можна побачити, що при крупнозернистій структурі тривала міцність і протистояння повзучості знижується. Це пояснюється різким зниженням пластичності титанових сплавів при крупнозернистій структурі.

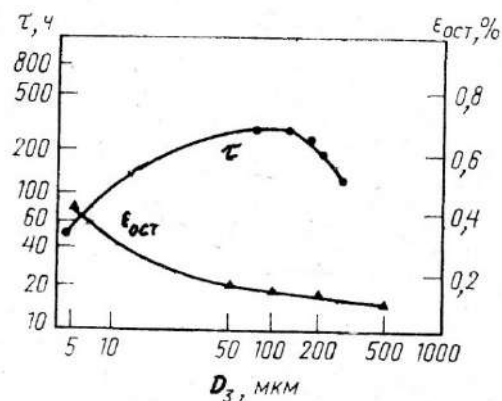


Рисунок 3.9 – Вплив структури на тривалу міцність і протистояння повзучості сплаву ВТ8 при 500°C [5]

3.2 Розробка технології термічної обробки барабана компресора зі сплаву ВТ8

Для подвійного відпалення візьмемо електричну піч із захисною атмосферою, тому що титан схильний реагувати із різними газами, оксидами, а для другого – електричну піч із окисною атмосферою.

СНЗ – 6.12.4/10: ширина робочого простору – 600 мм, довжина робочого простору – 1200 мм, висота робочого простору – 400 мм, максимальна температура – 1000 °С.

Захисна атмосфера складається із інертних газів (аргону та гелію), які очищенні від кисню та парів води.

Маса одного виробу складає:

$$M = V * \rho, \text{ кг}$$

де V – об'єм виробу, см^3 ,

ρ – густина титану, г/см^3

$$V = V_1 + V_2$$

$$V = \frac{1}{3} \pi * H * (R_1^2 + R * R + R_2^2)$$

де V_1 – загальний об'єм барабану, см^3 ,

V_2 – об'єм пустот в барабані, см^3 ,

R_1, R_2 – радіуси барабана, см,

H – висота барабану, см

$$V_1 = \frac{1}{3} * 3,14 * 21,04 * (38,2^2 + 38,2 * 45,84 + 45,84^2) = 116962,09 (\text{см}^3)$$

Вважаючи, що товщина барабану 10 мм, то

$$V_2 = \frac{1}{3} * 3,14 * 11 * (36^2 + 36 * 43 + 43^2) = 53969,5 (\text{см}^3)$$

$$V = 116962,09 - 53969,5 = 62992,59 (\text{см}^3)$$

$$M = 62992,59 * 4,505 = 283781,62 = 283,78 (\text{г}) \approx 0,284 \text{ кг}$$

Зважаючи на розміри печі, кількість ярусів у садці – один, а загальна кількість виробів – 2.

У садці вироби розташовуються на піддонні.

Маса садки складає:

$$M_c = N_{\text{заг}} * M = 2 * 0,284 \approx 0,568 (\text{кг})$$

де $N_{\text{заг}}$ – загальна кількість виробів,

M_c – маса садки, кг

Загальна тривалість нагрівання, визначається за формулою:

$$\tau_{\text{заг}} = \tau_{\text{пр}} + \tau_{\text{в}} + \tau_{\text{ох}}$$

де $\tau_{\text{заг}}$ – загальна тривалість нагрівання, хв.,

$\tau_{\text{пр}}$ – час прогріву до витримки, хв.,

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

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

Згідно із довідниковими та заводськими даними, маємо:

Загальна тривалість нагрівання для першого відпалення ($940 \pm 10^\circ\text{C}$):

$$\tau_{\text{пр}} = 15 \text{ хв.}, \tau_{\text{в}} = 25 \text{ хв.}, \tau_{\text{ох}} = 3 \text{ хв.}$$

$$\tau_{\text{заг}} = 15 + 25 + 3 = 43 (\text{хв.})$$

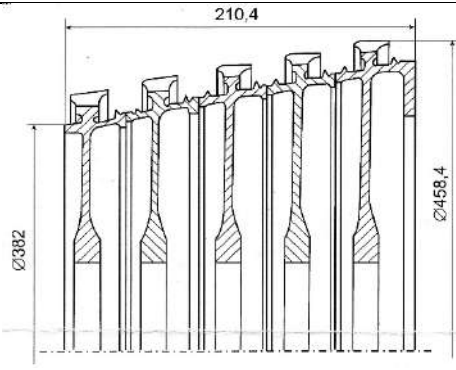
Загальна тривалість нагрівання для другого відпалення ($590 \pm 10^\circ\text{C}$):

$$\tau_{np} = 20 \text{ хв.}, \tau_B = 25 \text{ хв.}, \tau_{ox} = 2 \text{ хв.}$$

$$\tau_{заг} = 20 + 25 + 2 = 47 \text{ (хв.)}$$

В таблиці 3.1 запропонуємо карту технологічного процесу термічної обробки барабана компресора зі сплаву ВТ8.

Таблиця 3.1 – Карта технологічного процесу термічної обробки барабана компресора зі сплаву ВТ8

Ескіз виробу			Технічні вимоги до матеріалу			
			Матеріал	Властивості		Структура
			Титановий сплав ВТ8	$T_{експл} < 500^{\circ}\text{C}$, $\tau_{експл} = 6 \text{ тис. год.}$, $\sigma_B = 1000 \text{ МПа}$, $KCU = 300 \text{ кДж/м}^2$, $\delta_5 = 10\%$, $\Psi_5 = 30\%$, $\sigma_{-1} = 530 \text{ МПа}$ (за 10^7 циклів), $\sigma_{100}^{500} \geq 500 \text{ МПа}$		$\alpha + \beta$
N п/п	Операція	Обладнання (прилади)	Умови нагрівання	Умови охолодження	Назва пристосування, кількість виробів	Умови оброблення та контролю
1	2	3	4	5	6	7
1	Контроль вхідний	Стилоскоп, вимірювальні інструменти				3% від партії. 100% - стан поверхні та розмірів

Продовження таблиці 3.1

2	Подвійний відпал:				Піддон, садка, n=2шт.	Контролюється температура та тривалість прогрівання
2.1	Перший відпал:		$T=940\pm 10^{\circ}\text{C}$			
2.1.1	Прогрівання	СНЗ–6.12.4/10	$\tau_{\text{пр}} = 15 \text{ хв.}$ аргон			
2.1.2	Витримка	СНЗ–6.12.4/10	$t=940\pm 10^{\circ}\text{C}$ $\tau_{\text{в}} = 25 \text{ хв.}$ аргон		Піддон, садка, n=2шт	Контролюється температура та тривалість витримки
2.1.3	Охолодження	СНЗ–6.12.4/10		$\tau_{\text{ох}}=3 \text{ хв.}$	Піддон, садка, n=2шт	Контролюється температура та тривалість охолодження
2.2	Другий відпал:					Контролюється температура та тривалість прогрівання
2.2.1	Прогрівання	СНО–6.12.4/10	$t=590\pm 10^{\circ}\text{C}$ $\tau_{\text{пр}} = 20 \text{ хв.}$		Піддон, садка, n=2шт	
2.2.2	Витримка	СНО–6.12.4/10	$t=590\pm 10^{\circ}\text{C}$ $\tau_{\text{в}} = 25 \text{ хв.}$		Піддон, садка, n=2шт	Контролюється температура та тривалість витримки
2.2.3	Охолодження	СНО–6.12.4/10		$\tau_{\text{ох}}=2 \text{ хв.}$	Піддон, садка, n=2шт	Контролюється температура та тривалість охолодження
3	Контроль вихідний (структура $\alpha+\beta$)	Мікроскоп, УМВ-10			Контролюється $\sigma_{\text{в}}=1000\text{МПа}$, $KCU=300\text{кДж/м}^2$, $\delta_5=10\%$, $\Psi_5=30\%$, $\sigma_{-1}=530\text{МПа}$ (за 10^7 циклів), $\sigma_{100}^{500} \geq 500\text{МПа}$, структура	

Також під час проведення технології термічної обробки важливу роль відіграє розробка контрольних операцій.

Раціональне проведення цих операцій дозволяє попередити появу браку і надає можливість оцінити якість продукції, що обробляється. При цьому особливу увагу слід надати наступним різновидам контролю:

- технологічних параметрів: тривалість та температура окремих операцій; склад атмосфери;
- контроль макро- та мікроструктури виробу, визначення розміру зерна за зломом або за мікроструктурою, розташування інтерметалідної фази, наявності інтерметалідної неоднорідності;
- контроль властивостей на різних етапах технологічного перероблення (твердість, ударна в'язкість, випробування на розтяг, звуження, витривалість та тривалу міцність);
- контроль розмірів та геометрії виробу, зовнішнього стану на наявності тріщин та інших поверхневих дефектів.

3.3 Технологічний контроль, попередження та виправлення дефектів

В поковках, штамповках і інших напівфабрикатах, а також в готових деталях з титанових сплавів зустрічаються різного вигляду дефекти, неприпустимі при використанні деталей у виробі. Ці дефекти не завжди виявляються в зливках і нерідко виявляються в процесі механічної обробки напівфабрикатів, після травлення, а також при контролі остаточно готових деталей. Дослідження дефектів, що зустрічаються в деталях із титанових сплавів, дозволяють розділити їх на три групи: дефекти металургійного, технологічного і експлуатаційного походження.

Дефекти металургійного походження можуть бути зведені до видів:

Неметалеві включення (оксиди, карбіди, нітриди).

Неметалевими включення є світлі блискучі смуги і ділянки, які іноді супроводжуються несуцільністю матеріалу. Ці включення виявляються при виході їх на поверхню в процесі механічної обробки деталей або при травленні шліфів.

Дослідження мікроструктури і локальний хімічний аналіз показали, що включеннями другого вигляду є ділянки, збагачені α -стабілізаторами: киснем, азотом, вуглецем. В процесі деформації в місцях залягання дефектів з'являються рихлість, пори, тріщини, які утворюються внаслідок великої крихкості включень.

Ці дефекти викликаються попаданням в сплави при виплавці зливків сильно окислених шматків губки, які іноді зустрічаються із-за недосконалості методу відбракування; або недостатньо оброблених окислених відходів. Такі дефекти є локальними і випадковими. Вони не завжди виявляються неруйнівними методами контролю.

Включення у вигляді смуг або шарів, що відрізняються від основного матеріалу різним травленням і хімічним складом (включення іншого сплаву).

Включення у вигляді смуг або шарів, що відрізняються від основного матеріалу різним травленням, іноді виявляються при травленні готових деталей. Дефектами є смуги або шари металу іншого складу, чим основний сплав.

Ці дефекти можуть утворюватись в результаті попадання в шихту кускових відходів інших сплавів, підплавлення державки електроду, виготовленої з іншого сплаву.

Хімічна (ліквацийна) неоднорідність — ділянки, збіднені або збагачені легуючими елементами або домішками.

Хімічна неоднорідність є ділянками, збагаченими або збідненими окремими легуючими елементами (алюмінієм, молібденом, хромом і ін.) або збагачені домішками головним чином киснем, азотом, вуглецем. Після травлення на макроструктуру на поверхні різних деталей хімічна неоднорідність виявляється у вигляді різнозеренної смугастості, плямистості.

Для зони різнозернистості характерна голчата мікроструктура з наявністю витягнутих зерен, а для основного матеріалу — типу плетіння корзини.

Результати спектрального аналізу показали, що зона з крупним зерном збіднена легуючими елементами алюмінієм і молібденом, а також в ній відсутній цирконій. Отже, наявність зон з різко вираженою різнозернистістю може викликатися і хімічною неоднорідністю матеріалу по основних легуючих компонентах.

При дослідженні мікроструктури ділянок із структурною неоднорідністю, спостерігаються смуги рівновісної $\alpha+\beta$ -структури або стабілізованою α -фази, що чергуються, на тлі основної структури плетіння корзини або пластинчастої структури з крупними зернами первинної β -фази, а також ділянок пластинчастої структури (β -п'ятен) на тлі основної рівновісної $\alpha+\beta$ -структури.

Ділянки, збагачені α -фазою, слабкіше травляться, чим матриця.

Якщо в початковій заготовці сформувалася неоднорідна структура, пов'язана з аномальним хімічним складом окремих ділянок, то при $\alpha+\beta$ деформації не вдається забезпечити однорідну структуру. Чим ближче температура деформації в $\alpha+\beta$ -області до точки A_{c3} , тим вірогідніше утворення смугастої структури (β -п'ятен). При нижчих температурах деформації в $\alpha+\beta$ -області спостерігається тенденція до збереження структури початкової заготовки у вигляді стовпчастих виділень («макаронна структура») або грубих глобулярних ділянок α -фази усередині зерна, а також по межах зерен первинної β -фази. Ці структури дуже стійкі і для їх усунення потрібна додаткова деформація по спеціальній схемі. Для вирівнювання структури заготовки піддають нагріву в β -області з подальшою деформацією в β - і $\alpha+\beta$ -областях.

Описані дефекти металургійного походження не завжди виявляються існуючими методами контролю якості зливків. Тому необхідно, з одного боку, розробляти досконаліші методи контролю зливків, що виявляють подібні дефекти, а з іншою, ретельніше підбирати, очищати і контролювати відходи, які вводяться при виплавці злитків, з тим, щоб уникнути утворення таких дефектів, а також відбраковувати окислені шматки, що зустрічаються в якісній губці.

За допомогою ультразвукового контролю виявляються неметалеві включення. Другий і третій види дефектів не виявляються цим методом контролю і виявляються тільки при виході на поверхню після травлення на макроструктуру.

На відміну від дефектів металургійного походження, які утворюються при виплавці злитків, технологічні дефекти виникають в процесі переділу зливків, деформації напівфабрикатів, виготовлення деталей. До таких дефектів відносяться шматочки різних сторонніх матеріалів на поверхні, що випадково потрапили при деформації або обробці поверхні, деформаційні тріщини і пори (поверхневі і внутрішні), окислений шар на поверхні, структурна неоднорідність, пов'язана з нерівномірністю перебігу металу при деформації і ін.

У виробництві титанових напівфабрикатів зустрічаються наступні дефекти технологічного походження:

- Випадкові включення шматочків інших металів на поверхні напівфабрикатів. Характеризуються чіткою межею і відсутністю перехідної зони між дефектом і основним металом.
- Поверхневі точкові включення абразиву правильної округлої форми, вони травленню не піддаються. Мікротвердість таких включень порядку 33000 МПа приблизно відповідає твердості карбіду кремнію.
- Внутрішні тріщини, що виявляються в процесі механічної обробки штампування або при контролі готових деталей.

Зустрічаються тріщини, що супроводжуються пористістю матеріалу. Подібні дефекти, як правило, є наслідком деформації заохолодженого матеріалу і розташовуються в місцях переходу від тонкого перетину до масивного при несприятливій формі переходу.

Унаслідок низької теплопровідності і високої хімічної активності титанових сплавів при нагріві, а також здатності утворювати при цьому з киснем тверді розчини на основі α -структури можливе утворення прижогів в процесі механічної обробки і особливо в процесі шліфування і полірування.

Прижоги, утворені в процесі механічної обробки, виявляються при візуальному огляді після слабкого травлення у вигляді світлих плям. Характер прижогів залежить від температури нагріву поверхні (при зіткненні з оброблювальним інструментом) і швидкості охолодження. Прижоги класифіковані на два типи, низькотемпературні і високотемпературні. Прижоги характеризуються зміною тонкої структури, фазового складу, формою дефектних ділянок і глибиною їх розповсюдження.

При короткочасному нагріві до температур, відповідних двофазною $\alpha+\beta$ -області (для $\alpha+\beta$ -сплавів), і швидкому охолодженні мікроструктура прижога представляє структуру загартованого матеріалу з нижчим значенням твердості, чим основний матеріал, і складом β -фази порядку 30—35% замість 17—19% в основному матеріалі. Нагріваючи при поліруванні до температури β -області приводить до появи мартенситної структури, підвищення мікротвердості і зникнення β -фази. При тривалішому нагріві відбувається насичення поверхні киснем, збільшення кількості α -фази і підвищення мікротвердості до 5000 і більш за одиниці.

Прижоги, пов'язані з місцевим збагаченням поверхні киснем, не зникають при низькотемпературному відпалі. У цих місцях можливе утворення сітки мікротріщин.

Тріщини можуть виникати в процесі механічної обробки або під час експлуатації.

Втомне руйнування дисків може мати місце унаслідок утворення тріщин в перемичках отворів балансувань. Злами по перемичках отворів характеризуються яскраво вираженою притертістю, складчастою будовою і свідчать про втомний характер розвитку тріщин. В деяких випадках у осередках тріщин виявляються контактні пошкодження. У отворах з наявністю тріщин контактні пошкодження бувають виражені значно сильніше, ніж в отворах без тріщин. Злами в осередку руйнування зазвичай окислені до темно-сірого кольору.

Статистична обробка матеріалу по руйнуваннях різних деталей показує, що причиною виникнення і розвитку тріщин можуть бути також включення окисленого металу, що має підвищену твердість і крихкість. Таким осередком бували і включення карбіду вольфраму від ріжучого інструменту, а також тугоплавких легуючих елементів від лігатур.

Дефекти деформації (простріли, кувальні тріщини, зони інтенсивного перебігу металу, пористість) в деяких випадках були виявлені лише після руйнування деталей в процесі експлуатації.

Високий ступінь деформації в $\alpha+\beta$ -області і занижені температури деформації викликають високу, а головне, нерівномірні об'ємні залишкові напруження, яке, в поєднанні з експлуатаційними, також може привести до виникнення і розвитку тріщин.

Величина цього напруження настільки велика, що вони не усуваються звичайним відпалом, а згодом можуть привести до передчасного руйнування в процесі термічної або механічної обробки.

Викривлення і тріщиноутворення під дією залишкового об'ємного напруження: спостережуване в окремих випадках викривлення полотна дисків після попередньої механічної обробки або при остаточній механічній обробці під впливом залишкового напруження виражається в утворенні конусності полотна і підвищеному його битті, яке може в 20 разів перевищувати норму. Низькотемпературний відпал помітно знижує рівень поверхневої напруги.

Дослідження залишкового напруження в дисках і заготовках шляхом розрізання їх на ряд кільцевих елементів з подальшою оцінкою деформації по величині зазору по місцю різку (метод кілець) вказує на те, що викривлення, яке утворюється, може бути наслідком відхилення від оптимальної технології виготовлення заготовок дисків (при штампуванні, термічній обробці або рихтуванні).

В процесі механічної обробки іноді спостерігаються тріщини в зоні переходу від полотна до ступиці диска. Тріщини розташовуються зазвичай по колу на відстані 50—58 мм від осі диска, іноді від кільцевих

тріщин розвиваються радіальні тріщини. Виникнення і розвиток таких тріщин відбувається під дією змінних навантажень, про що свідчить характер розвитку тріщин і будова зламів.

Нерідко спостерігається декілька осередків руйнування, причому деякі із них співпадають з дефектами від механічної обробки — ризиками. Наявність багатьох осередків руйнування по колу свідчить про ступінчастий переривистий характер розповсюдження кільцевих тріщин, тоді як в зоні швидшого розповсюдження тріщин (радіальних) галуження тріщини не спостерігалося.

У зламах кільцевих тріщин спостерігалися ступінчасті паралельні вириви в порівнянні з гладким рельєфом зламу радіальних тріщин і зон доламування.

Детальне електроннофрактографічне дослідження зламів в зоні осередків руйнування і подальшого розповсюдження тріщин показало, що в осередку руйнування є плоскі фасетки малопластичного матеріалу разом з пластичним ямковим рельєфом. В мірі зростання тріщини кількість ділянок в зламі з ямковою будовою збільшується, що свідчить про пластичний характер розвитку тріщин.

Руйнування дисків відбувалося на завершальних операціях механічної обробки. Тріщини виявлялися або при візуальному огляді дисків після травлення, або при рентгенівському методі контролю або методом ЛЮМ-А. Оскільки якість матеріалу в описуваних випадках не викликала сумнівів, причиною руйнування слід вважати залишкове напруження у поєднанні з несприятливою формою переходу від полотна до ступиці для даної конструкції диска.

Наявність залишкового об'ємного напруження в дисках була виявлена також у випадках утворення тріщин в процесі напрацювання і подальшому її розкритті при вирізці зразків поблизу осередка розвитку тріщини.

В таблиці 3.2 наведено причини виникнення дефектів та заходи по їх запобіганню.

Таблиця 3.2 – Дефекти термічної обробки

Вид дефекту	Причини виникнення	Заходи по запобіганню
1	2	3
Мала твердість	Відбувається незначна коагуляція α -фази при пониженні температури	Потрібно регулювати температуру термічної обробки
Низька пластичність	Занадто висока кількість водню	Потрібно контролювати максимальну кількість водню. Термічну обробку проводять в захисних атмосферах
Незадовільна термічна стабільність в умовах тривалих витримок при підвищених температурах	Надто висока кількість кисню	Термічну обробку проводять в захисних атмосферах. Потрібно контролювати максимальну кількість кисню
Низька пластичність	Поява мартенситної структури	Потрібно знизити швидкість охолодження

В технологічній карті передбачено два види контролю.

Вхідний контроль:

- хімічний склад – є обов’язковою операцією і перевіряється відповідність матеріалу виробів робочому кресленню. Використовуються експресні методи контролю (спектральний, хроматографічний). Приладом є стилоскоп.

- розмір та геометрія виробів, стан поверхні (на поверхні не повинно бути грубих подряпин, вдавлювань і тріщин).

- мікроструктура шару (рентгеноструктурні, рентгеноспектральні, оптичні мікроскопи).

Вихідний або завершальний контроль – обов’язково перевіряються параметри виробу, які передбачені кресленням. Випробування на розтяг, згин, стиснення проводять на універсальній випробувальній машині (УВМ – 10); за допомогою мікроскопа, перевіряється структура виробу. Контролюється час та температура подвійного відпалу. Контролю піддається процентний вміст захисної атмосфери (прилади непрямого та прямого регулювання атмосфери).

Отже, на основі вивченої довідникової, науково-технічної, навчальної літератури обґрунтовано вибрана технологія термічної обробки. Було розраховано температури та час кожної операції технологічного процесу:

- перший етап подвійного відпалу:

$$t = 940 \pm 10^{\circ}\text{C},$$

$$\tau_{\text{пр}} = 15 \text{ хв.},$$

$$\tau_{\text{в}} = 25 \text{ хв.},$$

$$\tau_{\text{ох}} = 3 \text{ хв.},$$

- другий етап подвійного відпалу:

$$t = 590 \pm 10^{\circ}\text{C},$$

$$\tau_{\text{пр}} = 20 \text{ хв.},$$

$$\tau_{\text{в}} = 25 \text{ хв.},$$

$$\tau_{\text{ох}} = 2 \text{ хв.}$$

Розроблена технологічна карта термічної обробки. Контролю піддається хімічний склад, розмір та геометрія виробів, стан поверхні, структура, атмосфера, температура та час кожної операції технологічного процесу.

3.4 Застосування азотування для підвищення експлуатаційних властивостей виробів з титанових сплавів

Титанові сплави є привабливими кандидатами для аерокосмічної, автомобільної та біомедицинської галузей завдяки багатьом перевагам, серед яких,

зокрема, високе співвідношення міцності до ваги, відмінна стійкість до корозії/окислення, біосумісність та висока втомна стійкість. Однак їх погані трибологічні характеристики, наприклад, високий і нестабільний коефіцієнт тертя, висока швидкість зносу, схильність до задирів, обмежують їх використання. Азотування - це процес поверхневого зміцнення, в якому атоми азоту використовуються для модифікації поверхні, і вже багато років застосовується для покращення зносостійкості титанових сплавів. У традиційних методах азотування, таких як обробка в сольовій ванні, газове азотування та гаряче ізостатичне пресування (ГІП), атоми азоту подаються з рідких, газових або твердих середовищ. При плазмовому азотуванні, також відомому як іонне азотування та азотування тліючим розрядом, активний азот забезпечується іонізованою азотовмісною атмосферою.

Зростаючий інтерес до цього процесу зумовлений його високою ефективністю, економічністю для масового виробництва, відсутністю забруднення та простотою керування процесом. Крім того, йому надають перевагу перед іншими технологіями азотування через можливість застосування за нижчих температур, контроль розмірів, збереження якості поверхні та універсальність для досягнення бажаних властивостей шляхом модифікації параметрів процесу.

Плазмове азотування покращує трибологічні властивості титанових сплавів завдяки утворенню тонкого поверхневого шару, що складається переважно з TiN і Ti_2N , тобто сполученого шару. Азотована мікроструктура також складається з області стабілізованого азотом α -титану, тобто α -корпусу, і зони дифузії азоту (зазвичай глибиною 15-25 мкм) під шаром сполуки. Мікроструктура плазмового азотування тісно корелює зі складом титанової підкладки та параметрами процесу азотування, такими як тривалість, температура, тиск і склад азотувального середовища, серед яких температура має найбільший вплив.

Плазмове азотування титанових сплавів зазвичай проводять в інтервалі температур 700-1100°C протягом 6-80 годин в азотовмісному середовищі (N_2 ,

N_2 -Ar, N_2 -H₂ або N_2 -NH₃). Високі температури, задіяні в процесі, призводять до росту зерен, старіння та мікроструктурних перетворень в титанових підкладках, які знижують втомну міцність та пластичність. Крім того, крихкий характер шару сполуки і α -фази та висока невідповідність жорсткості між шаром сполуки і титановою підкладкою призводять до передчасного зародження руйнування з поверхні. У зв'язку з цим повідомлялося про покращення механічних властивостей при плазмовому азотуванні за нижчих температур. Повільна кінетика азотування титанових сплавів при низьких температурах може бути покращена за рахунок зміни мікроструктури в приповерхневому шарі за допомогою термохімічних (наприклад, обробка лазером і електронно-променеве плавлення) і механічних (наприклад, механічне зношування і зміцнення) процесів попередньої обробки. В результаті збільшується глибина і твердість дифузійного шару, таким чином, покращується несуча здатність плазмово азотованих поверхонь.

Плазмове азотування титанових сплавів призводить до утворення на поверхні шару сполуки, який складається переважно з δ -фази TiN з ГЦК кристалічною структурою та Ti₂N, ϵ -фази, з тетрагональною кристалічною структурою. TiN стабільний в широкому діапазоні вмісту азоту, TiN_x ($0,43 < x < 1,08$), і має типову твердість 2500 HV. Ti₂N стабільний у невеликому складі ~33,3 ат.% N і має максимальну твердість 1500 HV. У дослідженнях плазмового азотування Raveh та ін. шар сполуки складався з шару TiN поверх суміші випадково орієнтованого полікристалічного TiN і високоорієнтованого Ti₂N. Вони також повідомили про скупчення дрібних (50-100 Å) осадів, що складаються з елементів Al, V, Cr і Fe, під шаром сполуки. Шар сполуки має типову товщину 1-4 мкм і може містити сліди Ti₄N_{3-x}, TiN_{0,26} і TiO₂ на додаток до TiN і Ti₂N.

Під шаром покриття утворюється область стабілізованого азотом α -титану, тобто α -фаза і зона дифузії азоту, яка формується за рахунок інтерстиціального твердого розчину атомів азоту в структурі титану. Утворення α -кристалічної фази з типовою твердістю 800-1000 HV є несприятливим через її негативний

вплив на пластичність і втомну міцність титанових сплавів. При азотуванні $\alpha + \beta$ і β -титанових сплавів при високих температурах (зазвичай вище 800°C) α -частина утворює безперервний шар α -Ті під шаром сполуки, як показано на рисунку 3.10; однак, при більш низьких температурах ($< 800^{\circ}\text{C}$) під шаром покриття були виявлені грубі і стовпчасті α -стабілізовані зерна. Аналогічно, під час плазмового азотування α -титанових сплавів може утворюватися α -кристалічна фаза, однак її важче розрізнити, якщо тільки осадження гідридів у підкладці не створює контрасту з α -кристалічною фазою.

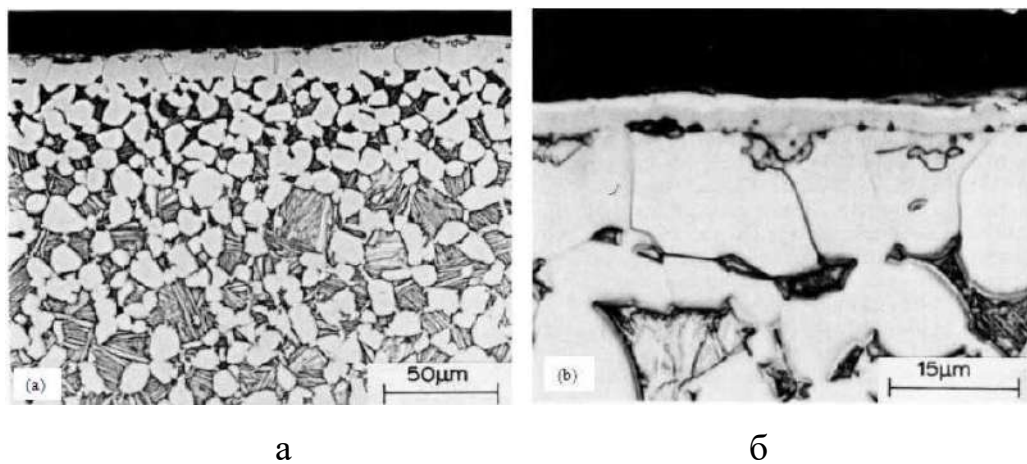


Рисунок 3.10 - Оптичні мікрофотографії сплаву Ti-6Al-4V після плазмового азотування в азоті протягом 3 годин при 1000°C , що демонструють утворення α -фази під шаром покриття при (а) малому збільшенні та (б) великому збільшенні

Атоми азоту зміцнюють дифузійну зону з профілем, який має максимум біля поверхні і поступово зменшується до об'єму. Глибина дифузії азоту залежить від параметрів процесу, а також фазового складу титанових сплавів через різні межі розчинності та швидкості дифузії азоту в α - і β -титані. Азот дифундує втричі швидше в β -Ті порівняно з α -Ті, але має обмежену розчинність у β -фазі. Дослідження, проведене Ільїним та ін., показало, що додавання α -стабілізуючих елементів, таких як Al, сповільнює дифузію азоту в сплавах α -титану. І навпаки, β -титанові сплави мали неглибоку зону дифузії через

недостатню розчинність азоту в β -фазі. Більша глибина дифузійної зони була досягнута в сплавах $\alpha + \beta$ Ti, які мають поєднання високої розчинності та дифузійної здатності азоту.

Вплив параметрів процесу плазмового азотування на мікроструктуру та властивості титанових сплавів вивчався рядом дослідників. За даними да Сілви та ін. склад поверхні плазмового азотування Ti-6Al-4V був дуже складною функцією параметрів азотування, наприклад, часу, температури, складу газової суміші і тиску, серед яких температура мала найсуттєвіший вплив. Рентгеноструктурні дослідження плазмово азотованих поверхонь показали, що тиск азотуючих газів має незначний вплив на мікроструктуру азотованих поверхонь, однак збільшення парціального тиску азоту в суміші призводить до переважної орієнтації Ti_2N і сприяє утворенню TiN. Вони інтерпретували, що зсув, який спостерігався у відбитках β -Ti XRD, відповідав спотворенням решітки в цій фазі і, ймовірно, залишковим деформаціям, індукованим азотуванням. Крім нітридів титану TiN і Ti_2N , вони також повідомили про рентгенівські відбиття V_2O_5 , орторомбічного TiO_2 і нітриду ζ - Ti_4N_3 -х з дефіцитом азоту в шарах сполуки, утворених за певних умов азотування. Yildiz та ін. виявили, що час і температура азотування прямо корелюють з твердістю і шорсткістю поверхні, товщиною шару сполуки, вмістом TiN в шарі сполуки і глибиною дифузійної зони. Вони також повідомили, що атоми Al з підкладки Ti-6Al-4V мають тенденцію до сегрегації під шаром сполуки і утворюють шар, збагачений Al, який перешкоджає дифузії азоту всередину під час плазмового азотування. Наявність збагаченого Al шару під шаром покриття підтвердили й інші дослідники.

Дослідження авторів щодо оптимізації параметрів процесу плазмового азотування були спрямовані на запобігання утворенню α -фази та мікроструктурних змін у титанових підкладках, які негативно впливають на деякі механічні властивості, наприклад, втомну міцність. Обробка плазмовим азотуванням проводилась на промисловій установці, що складається з джерела живлення постійного струму та консолі керування, камери азотування та

основи, гідравлічної підйомної системи для підйому камери з основи, системи вимірювання температури, системи вакуумування, системи подачі газу, входу/виходу та манометрів.

Титанові зразки розміщували в геометричному центрі катодної клітки, щоб уникнути поширених проблем, пов'язаних з плазмовим азотуванням на постійному струмі, таких як пошкодження дугою, порожнистий катод і ефект окантовки. Плазмове азотування проводили при різних температурах (500-800°C), тривалості (4-87 годин) і тиску (67-533 Па) в сумішах N_2/Ar і/або N_2/H_2 з вмістом азоту від 1,5% до 75%. Після кожної обробки плазмовим азотуванням проводили мікроструктурні та хімічні аналізи, а зразки піддавали аналітичній мікроскопії.

Морфологію поверхні та мікроструктуру поперечного перерізу азотованих сплавів досліджували на растровому електронному мікроскопі (PEM) FEI Quanta 200 FieldEmissionGun (FEG).

Мікроструктура плазмово азотованого Ti-6Al-4V складалася з шару покриття товщиною 1,9 мкм на поверхні, за яким слідувала зона дифузії азоту глибиною 44,4 мкм (рис. 3.11), що складається з тонкого шару сполуки ($1,9 \pm 0,5$ мкм) і глибокої ($44,4 \pm 5,6$ мкм) дифузійної зони. Дифузійна зона була виділена шляхом розчинення дрібних рекристалізованих β -частинок всередині α -зерен (оскільки азот є α -стабілізуєчим елементом) і підтверджена вимірюваннями мікротвердості за глибиною профілю. Комбінований шар складався з нітридів Ti_2N , TiN і $TiN_{0.3}$.

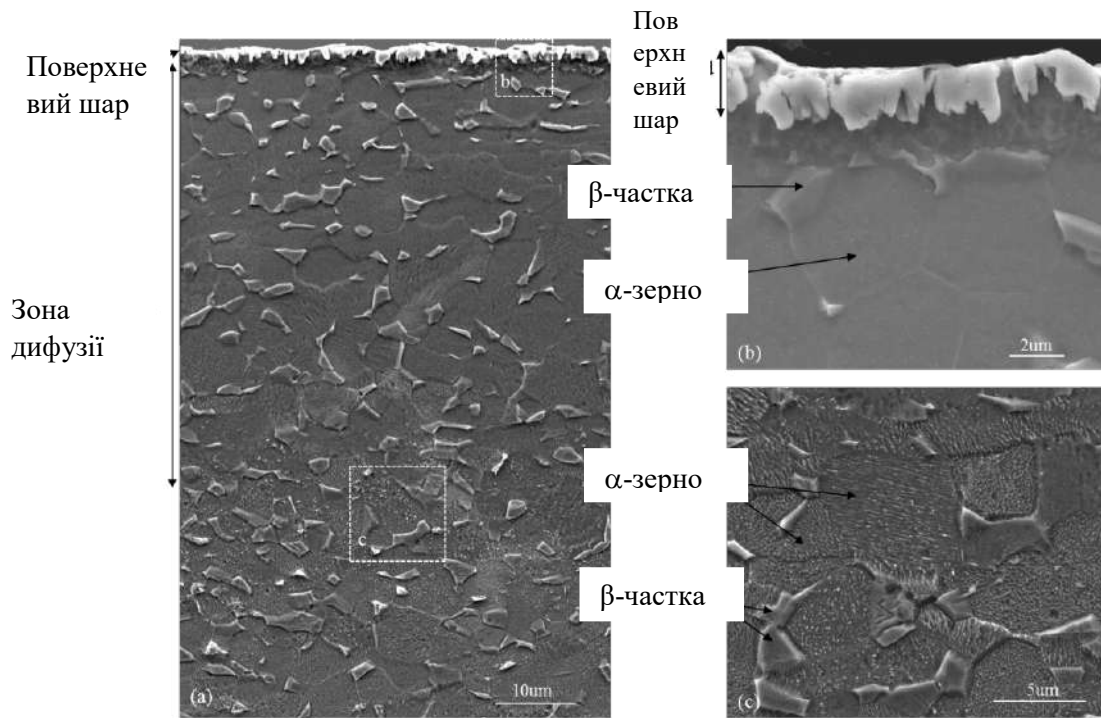


Рисунок 3.11 - Типові зображення поперечного перерізу мікроструктури плазмово азотованого Ti-6Al-4V при 600°C

Плазмово азотований Ti-10V-2Fe-3Al мав шар покриття товщиною 0,5 мкм, що складався з TiN, Ti₂N, V₂N, з можливістю присутності Fe₈N. Нітрид ванадію, про який рідко повідомляється в літературі, спостерігався вздовж меж зерен нітриду титану, можливо, через швидшу дифузію ванадію вздовж меж зерен (що діють як шляхи короткого замикання) при температурі азотування.

Глибина дифузії азоту була підтверджена профілями мікротвердості в залежності від глибини завдяки зміцнюючому ефекту твердого розчину міжвузлових атомів азоту в структурі титану. Профілі мікротвердості були отримані методом мікроіндентування при максимальному навантаженні 245 мН. Глибока зона дифузії азоту (35 ± 5 мкм) в Ti-10V-2Fe-3Al після 8-годинної обробки (рис. 3.12) пояснюється високим вмістом β-фази в сплаві з високою дифузійною здатністю азоту. Тривале напilenня поверхні перед азотуванням у цьому дослідженні також прискорило дифузію азоту завдяки утворенню декількох дислокацій всередині α-зерен. Також повідомлялося, що розпилення Ar+H₂ збільшує кінетику азотування у залізних сплавах, забезпечуючи легкі шляхи дифузії для азотних проміжків і усуваючи властиві поверхневі оксиди.

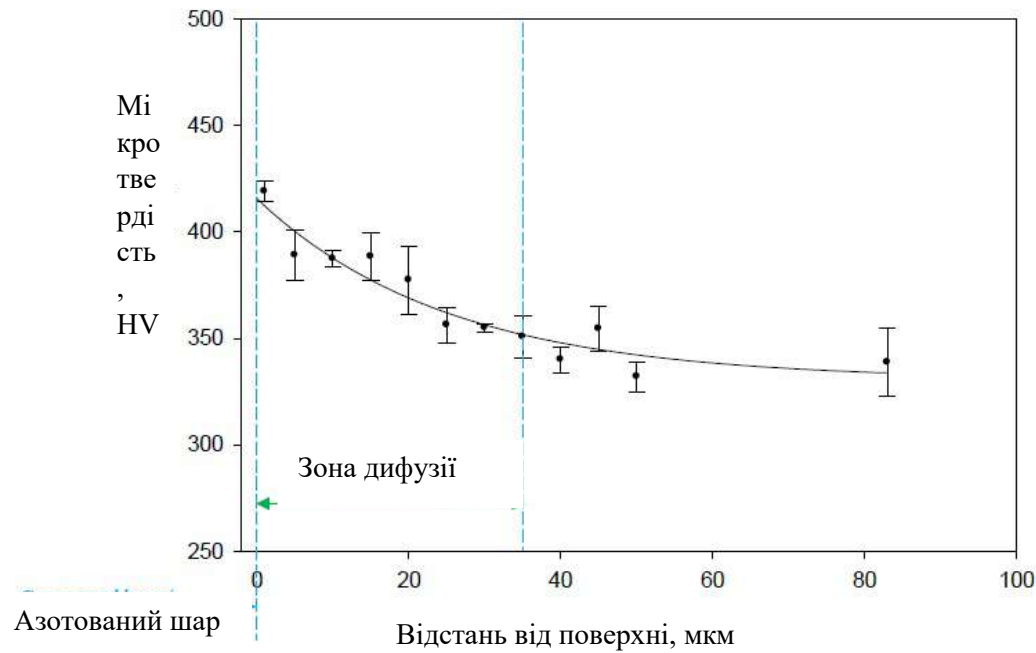


Рисунок 3.12 - Профіль мікротвердості за глибиною плазово азотованого титанового сплаву

Отже було встановлено, що плазове азотування покращує триботехнічні властивості титанових сплавів, зокрема зносостійкість і коефіцієнт тертя. Формування тонкого шару нітридів титану на поверхні зменшує адгезію і знос, покращуючи тим самим тривалість служби матеріалу в умовах тертя. Однак, високі температури, застосовані при азотуванні, можуть вплинути на мікроструктуру сплаву, що вимагає подальшої оптимізації процесу для досягнення оптимального балансу між механічними та триботехнічними властивостями.

Останні досягнення в галузі плазового азотування титанових сплавів зосереджені на розробці низькотемпературних (600°C або менше) методів обробки, а також на підвищенні довготривалої міцності азотованих поверхонь шляхом осадження твердих поверхневих покриттів, таких як алмазоподібний вуглець і нітридні покриття PVD/CVD. Крім того, зміна мікроструктури поверхні шляхом термохімічної та механічної попередньої обробки також успішно застосовується для підвищення ефективності азотування під час низькотемпературного плазового азотування титанових сплавів.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ І НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

В розділі надані основні заходи з охорони праці, при термічній обробці титанових сплавів.

4.1 Аналіз потенційних небезпек

В процесі аналізу, було встановлено наступні можливі небезпеки.

Можливість ураження електричним струмом. Основними причинами є порушення правил з електробезпеки, зокрема допуск до виконання робіт осіб, які не пройшли навчання та перевірку знань з електробезпеки, або несправності енергоспоживаючого обладнання, які можуть призвести до електричних травм або до летальних наслідків.

Небезпеки, які пов'язані з невиконанням вимог ергономіки стосовно організації робочого місця, зокрема недостатності площі на одне робоче місце або нераціональне розташування обладнання.

Небезпеки, які пов'язані з підготовкою зразків-свідків або матеріалу для подальшого проведення досліджень, зокрема можливість отримання механічних травм при нарізці заготовок на відрізному станку, проведенні шліфувально-полірувальних операцій та визначенні хімічного складу вихідного матеріалу.

Небезпеки, які пов'язані з виконанням термічної обробки, зокрема негативний вплив теплового випромінювання при гартуванні та можливість отримання хімічних опіків внаслідок необережного поводження з травильними розчинами, або небезпека ушкодження органів зору внаслідок хибного вибору світлофільтрів мікроскопу.

Можливість отримання механічних травм при випробуванні механічних, експлуатаційних властивостей дослідницьких зразків.

Небезпеки, які пов'язані з обробкою результатів досліджень з використанням ПК, зокрема ушкодження кістково-м'язового апарату внаслідок довготривалої роботи в однотипній позі.

Незадовільні метеорологічні параметри повітряного середовища в приміщенні, внаслідок неефективної роботи систем опалення та повітрообміну.

Незадовільне освітлення робочих місць, внаслідок виходу з ладу джерел освітлення, що може призвести до погіршення зору та зниження працездатності.

Можливість загоряння в наслідок порушення правил пожежної безпеки, порушень правил зберігання легкозаймистих речовин, або коротких замикань, що може призвести до пожежі.

Небезпеки, які пов'язані з умовами праці у надзвичайних ситуаціях, зокрема порядок проведення аварійно-рятувальних та інших невідкладних робіт.

4.2 Заходи по забезпеченню техніки безпеки

Основними заходами захисту від можливості ураження електричним струмом є:

- організаційні заходи: до виконання робіт допускаються особи не молодше 18 років, які пройшли навчання та перевірку знань з електробезпеки, та отримали відповідну ДНАОП 1.1.10-1.01-2000 «Правила безпеки експлуатації електроустановок споживачів», групу з електробезпеки (2 група - при напрузі 2000 В. 3 група при напрузі більше 3000 В). Експлуатацію та ремонт електрообладнання повинен здійснювати тільки спеціально

підготовлений персонал. Для кожного виду обладнання повинні бути складені схеми нормування роботи та роботи в аварійних ситуаціях.

- технічні заходи: усі не ізольовані струмопровідні елементи електрообладнання повинні бути надійно огорожено суцільними огороженнями, зняття або відкриття, яких можливе тільки за допомогою спеціальних пристроїв; розташування струмоведучих ланцюгів виконується на недоступній висоті (при напрузі до 1000 В - не менше 3,5 м; при напрузі більше 1000 В - не менше 6 м); обов'язковим є наявність захисного заземлення з опором не більше 4 кОм.

Для виключення негативного впливу факторів, пов'язаних з ергономічністю робочого місця технолога ГОСТ 12.2.032-78 «Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования». Передбачено:

- конструкція та взаємне розташування елементів робочої зони, повинні відповідати характеру роботи, а також антропометричним, фізіологічним та психологічним особливостям технолога;

- як правило, основним приладдям в робочих зонах технолога є комп'ютерний стіл та стілець. Для оптимізації негативних наслідків синдрому статичного навантаження, площа комп'ютерного стола повинна забезпечувати зону повного досягнення. Для запобігання тунельного синдрому, кут згину руки в лікті має бути прямим, оптимальна висота клавіатури відносно поверхні стола не більше 30 мм, при куті підйому від 2 до 15°. Комп'ютерна «миша» не повинна розташовуватися на краю стола, щоб долоня при роботі звисала. Робочий стілець або крісло повинно мати підлокітники, бути поворотним та регульованим за висотою та кутом нахилу спинки.

Для уникнення механічних травм при виготовленні зразків до випробування необхідно виконувати вимоги інструктажів з охорони праці при роботі на металообробному обладнанні згідно ДНАОП 1.1.10-1.04-01 «Правила безпечної роботи з інструментом і пристосуваннями», ГОСТ 12.3.028-82 «Процесс обработки абразивными и эльборовыми инструментом» зокрема, установка абразивних кіл на верстатах повинна проводитися тільки спеціально

проінструктованими наладчиками, використання абразивних кіл з дефектами заборонено, абразивні кола повинні мати штамп або наклейку про випробування, порядковий номер кола і підпис особи, відповідальної за випробування, біля кожного верстата необхідно вивісити табличку із зазначенням допустимої роботи колової швидкості використовуваних кіл і частоти обертання шпинделя верстата в хвилину, при обертанні абразивного кола, виступаючі кінці шпинделя і кріпильні деталі захистити захисними кожухами, підручники повинні мати достатній за величиною майданчик для стійкого положення оброблюваного виробу. Зазор між краєм підручника і робочою поверхнею шліфувального круга повинен бути не більше 3 мм. Використовувати індивідуальні засоби захисту, зокрема для виключення травмування органів зору передбачено застосування захисних окулярів. Для запобігання термічних опіків при виконанні пробних гартувань передбачено використання індивідуальних засобів захисту, зокрема рукавиці спеціальні ГОСТ 12.4.010-75.

Для попередження хімічних опіків передбачено використання індивідуальних засобів захисту, зокрема гумових рукавиць ГОСТ 20010-93, фартухів ГОСТ 12.4.029-76, захисних окулярів ГОСТ 12.4.013-85.

При визначенні мікроструктури важливе значення має якість підготовленої до досліджень поверхні. Після шліфування та полірування використовують метод травлення в суміші азотної кислоти та етилового спирту. Для запобігання ураження органів зору при визначенні мікроструктури обов'язковим є екранування зони сканування захисним екраном. На оптичному мікроскопі необхідно обирати світлофільтр, який є оптимальним для повного збільшення. При точному наведенні на фокус, обертати мікрометричний гвинт тільки на пів оберту.

Для запобігання механічних травм в процесі випробування на механічні властивості передбачено виконання інструкцій з техніки безпеки, які стосуються конкретно дослідницького обладнання.

Для запобігання механічних травм в процесі механічних випробувань на інсталяції УСП-CS503 фірми Instron передбачено триступеневу систему захисту:

- для запобігання зриву зразка внаслідок перекосів або зношування захватів передбачені центруючі та вирівнюючі втулки;
- для виключення похибок при випробуванні, інсталяція має електронну систему управління та гідравлічний привод, що дає змогу програмувати режим випробування та не допускати максимальне навантаження на конструкцію інсталяції, що може призвести до руйнування та аварійної ситуації.
- усі електричні кабелі екрановані спеціальними кожухами, що дає можливість уникнути ураження електричним струмом.

4.3 Заходи по забезпеченню виробничої санітарії та гігієни праці

Заходи щодо забезпечення виробничої санітарії та гігієни праці для приміщення (дослідницької лабораторії, конструкторського бюро, офісу, тощо) обладнаного ПК з ВДТ розроблені відповідно до вимог Державних санітарних норм та правил «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу», МЮУ 06.05.2014 р. за № 472/25249, ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні стандартні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин» і НПАОП 0.00-7.15-18 «Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями».

За характером трудової діяльності виділено три професійні групи, згідно з ДК 003:2010 «Національний класифікатор України. Класифікатор професій»: група А - робота зі зчитування інформації з екрана з попереднім запитом; група

Б - робота з введення інформації; група В - творча робота в режимі діалогу із ПК.

Перша категорія тяжкості й напруженості роботи на ПК визначається за рівнем навантаження за робочу зміну: для групи А - по сумарному числу зчитувальних знаків (до 20000), для групи Б - по сумарному числу зчитувальних або знаків, що вводяться (до 15000); для групи В - за сумарним часом безпосередньої роботи на ПК (до 2,0 год). При 8-годинній робочій зміні й роботі на ПК регламентовані перерви варто встановлювати через 2 години від початку зміни й через 2 години після обідньої перерви тривалістю 15 хвилин кожна. При 12-годинній робочій зміні регламентовані перерви повинні встановлюватися в перші 8 годин роботи аналогічно перервам при 8-годинній робочій зміні, а протягом останніх 4 годин роботи, незалежно від категорії й виду робіт, щогодини тривалістю 15 хвилин. Тривалість безперервної роботи на ПК без регламентованої перерви не повинна перевищувати 2 години. Регламентовані перерви й мікропаузи доцільно використовувати для виконання комплексу вправ і гімнастики для очей, пальців рук, а також масажу, які наведені у Державних санітарних правилах і нормах роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин».

Всі професійні користувачі ПК повинні проходити обов'язкові попередні медичні огляди при надходженні на роботу, періодичні медичні огляди з обов'язковою участю терапевта, невропатолога й окуліста, а також проведенням загального аналізу крові й ЕКГ.

Для забезпечення задовільних параметрів повітряного середовища робочого простору (температура, вологість, швидкість переміщення повітряних мас) обов'язковими є природна вентиляція, загально обмінна штучна вентиляція, та кондиціонування приміщення згідно ГОСТ 2.2.137-96 «Оборудование для кондиционирования воздуха и вентиляции. Общитребования безопасности», СНиП 2.04.05-91 «Отопление, вентиляция и

кондиционирован не», ГОСТ 30646-99
 «Кондиционеры центральные общего назначения. Общие технические условия»,
 ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ «Общие санитарно-гигиенические требования к
 воздуху рабочей зоны».

Провести розрахунок надходжень теплоти від сонячної радіації через світлопрозорі огороження, штучного освітлення та виділення теплоти людьми. Обґрунтувати вибір найбільш економічного кондиціонера та розрахувати час охолодження приміщення за його допомогою.

Визначити надходження теплоти в приміщення о 10 год (до полудня). Орієнтування будівлі на північний-захід. Площа приміщення складає - 30 м², висота - 5 м. Площа тіні - 0,3 м², площа скління – 2,0 м². Вікна без сонцезахисних пристроїв. Атмосфера району – незабруднена (чисте скло). Кількість робочих місць 5: кількість чоловіків – 3, кількість жінок – 2. Освітлення здійснюється за допомогою люмінесцентних ламп, загальна потужність яких в приміщенні складає 1,5 кВт.

Розв'язання:

Визначаємо значення розсіяної сонячної радіації о 10 год, що надходить до приміщення, розташованого в м. Запоріжжі (47°49' півн. ш.) за СНиП 23-01-99 «Строительная климатология»: $q_{в.р.} = 54 \text{ ккал}/(\text{год} \cdot \text{м}^2)$.

Для світлового прорізу, який знаходиться в тіні або при затіненні світлового прорізу зовнішніми сонцезахисними конструкціями (відкосами пройому) кількість теплоти розраховується:

$$q_1 = q_{в.р.} \cdot K_1 \cdot K_2 = 54 \cdot 0,9 \cdot 1 = 48,6 \text{ ккал}/(\text{год} \cdot \text{м}^2).$$

де K_1 - коефіцієнт, який враховує затінення скелення світлових прорізів перепахотами та забруднення атмосфери = 0,9;

K_2 - коефіцієнт, який враховує забруднення скла = 1.

Загальна кількість теплоти, яка надходить до приміщення через віконний проріз:

$$Q_{\text{с.пр.}} = q_1 \cdot F_p \cdot K_{\text{відн}} = 48,6 \cdot 0,3 \cdot 0,85 = 12,393 \text{ ккал/год}$$

де F_p - площа заповнення світлового прорізу, яка опромінюється розсіяною сонячною радіацією = 0,3 м²;

$K_{\text{відн}}$ - коефіцієнт відносного проникнення сонячної радіації через заповнення світлового прорізу = 0,85.

Загально прийнято, що частина енергії, яка витрачається на освітлення, переходить в теплоту, яка нагріває повітря приміщення.

Виділення теплоти від штучного освітлення:

$$Q_{\text{осв.}} = 860 \cdot n \cdot N_{\text{осв.}} = 860 \cdot 0,5 \cdot 1,5 = 645 \text{ ккал/год}$$

де n - коефіцієнт переходу електричної енергії в теплову; для люмінісцентних ламп = 0,5;

$N_{\text{осв.}}$ - сумарна потужність джерел освітлення = 1,5 кВт.

Виділення теплоти та вологи людьми залежить від кількості енергії, яку вони витрачають при роботі, та температури повітря в приміщенні. Жінки виділяють в середньому 85%, а діти – 75% від тепла, яке виділяють чоловіки. Кількість теплоти яку виділяють чоловіки, при температурі повітря в приміщенні 25°C = 55 ккал/год . Отже:

$$Q_{\text{л}} = 55 \cdot 3 + 55 \cdot 2 \cdot 0,85 = 259 \text{ ккал/год}$$

Загальна кількість теплоти в розрахункову годину, яку необхідно відвести за допомогою кондиціонування, визначається сумою теплоти джерел тепло надходження і визначається за формулою:

$$Q_{\text{заг}} = Q_{\text{с.пр.}} + Q_{\text{осв.}} + Q_{\text{л}} = 12,39 + 645 + 259 = 916,39 \text{ ккал/год}$$

Вибір кондиціонера здійснюється в першу чергу за його розрахунковою потужністю та розмірами приміщення. Рекомендований діапазон потужності кондиціонера має максимально наближатися до розрахованого значення загальних теплонадходжень в приміщення.

Висновок: Оскільки площа приміщення складає 30 м², то найбільш доцільним є використання кондиціонера типу HITACHI RAS-10JH4 з холодопродуктивністю 1150 ккал/год. Знаходимо час, необхідний для охолодження приміщення за допомогою цього кондиціонера:

$$\tau = C \cdot \gamma \cdot V \cdot (t_{\text{вид}} - t_{\text{норм}}) / 3600 \cdot 1,163 \cdot Q_{\text{конд}}$$

$$\tau = 1000 \cdot 1,2 \cdot 150 \cdot (25 - 22) / 3600 \cdot 1,163 \cdot 916,39 = 0,15 \text{ год}$$

де C - масова теплоємність припливного повітря = 1000 Дж/(кг·°C);

γ - густина припливного повітря = 1,2 кг/м³;

V - об'єм приміщення = $S \cdot h = 150$ м³;

$t_{\text{вид}}$ - температура повітря, що видаляється з приміщення = 25 °C;

$t_{\text{норм}}$ - нормована (оптимальна) температура в приміщенні, яку необхідно досягти шляхом кондиціонування = 22°C).

$$Q_{\text{конд}} = (-5 \dots +15)\% Q_{\text{заг}}$$

Вибір системи освітлення залежить від зорових робіт і визначається за Державними будівельними нормами України ДБН В.2.5-28-2006 «Природне і штучне освітлення», ГОСТ 12.2.007.13-2000 ССБТ «Лампыэлектрические. Требованиябезопасности», ГОСТ МЭК 60598-2-2-2002 «Светильники. Часть 2. Частныетребования. Раздел 2. Светильникивстраиваемые».

При цьому враховується вимога, що при виконанні в приміщеннях робіт I-III, IVa, IVб, IVв, Va розрядів слід застосовувати систему комбінованого освітлення. Використання системи загального освітлення передбачено при технічній неможливості або недоцільності влаштування місцевого освітлення при узгодженні з органами державного санітарного нагляду. При комбінованому освітленні доля загального повинна складати не менше 10%.

4.4 Заходи з пожежної безпеки

Для забезпечення пожежної безпеки в приміщенні лабораторного типу передбачено використання первинних засобів пожежогасіння, до яких відносяться вогнегасники різного призначення та системи автоматичного пожежосповіщення та пожежогасіння.

Розробку заходів з пожежної безпеки починають з аналізу речовин і матеріалів, що використовуються при роботі на об'єкті, з метою визначення класу можливої пожежі (А, В, С, D, F, E) згідно ДСТУ EN 2:2014 «Класифікація пожеж» (EN 2:1992, EN 2:1992/A1:2004, IDT та категорії його пожежної небезпеки, відповідно до вимог ДСТУ Б В.1.1-36:2016 «Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою» та СНиП 2.09.02-85* «Производственные здания». Тобто указати до якої категорії виробництва з пожежної небезпеки (А, Б, В, Г, Д) належить об'єкт (дослідницька лабораторія, конструкторське бюро, дільниця, підстанція, цех, тощо).

Відповідно до категорії виробництва з пожежної небезпеки і вимог ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги», указати ступінь вогнестійкості приміщення об'єкта (дослідницької лабораторії, конструкторського бюро, дільниці, підстанції, цеху, тощо).

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

Показати відповідність обладнання, силових і освітлювальних мереж об'єкту (дослідницької лабораторії, конструкторського бюро, офісу, дільниці,

підстанції, цеху, тощо), вимогам пожежної безпеки, згідно вимог НПАОП 40.1-1.32-01 «Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок».

Показати наявність засобів виявлення загорянь і пожеж згідно вимог ДБН В.2.5-56:2014 «Системи протипожежного захисту»:

- автоматичних сигналізаторів про пожежу;
- системи пожежної сигналізації;

З огляду на пожежну небезпеку виробництва, передбачити систему пожежного водопостачання або автоматичного пожежогасіння та первинні засоби пожежогасіння (вогнегасники різних видів) відповідно до вимог «Правил експлуатації та типових норм належності вогнегасників», затверджених наказом МВСУ 15.01.2018 № 25 та зареєстрованих в МЮУ 23.02.2018 р. за № 225/31677.

Виходячи з аналізу речовин та матеріалів, які використовуються при роботі у дослідницькій лабораторії обладнаному ПК з ВДТ:

- згідно ДСТУ EN 2:2014 «Класифікація пожеж» (EN 2:1992, EN 2:1992/A1:2004, IDT) у приміщенні дослідницької лабораторії обладнаний ПК з ВДТ можлива пожежа класів – А (що супроводжується горінням твердих матеріалів) та Е (горіння електроустановок, що перебувають під напругою до 1000 В);

- відповідно до вимог ДСТУ Б В.1.1-36:2016 «Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою», воно належить до категорії «Д» з пожежної небезпеки – простір у приміщенні, у якому перебувають тверді горючі речовини та матеріали, тому відповідно до вимог ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги» воно має II ступінь вогнестійкості.

В дослідницької лабораторії встановлена система пожежної й охоронної сигналізації «Сигнал-ВКб», яка забезпечує виявлення теплових і димових ознак пожежі і місця виникнення пожежі з точністю до місця розміщення датчика.

Вибір типу та визначення необхідної кількості вогнегасників виконується згідно з залежністю від протипожежної здатності вогнегасників обмежувальної площі дії, класу пожежі в захисному приміщенні.

4.5 Заходи по забезпеченню безпеки у надзвичайних ситуаціях

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

З особливостей небезпечних аварій слідуює: захисні заходи і, перш за все, прогнозування, виявлення і періодичний контроль за змінами обстановки, оповіщення персоналу підприємства повинні проводитися з надзвичайно високою оперативністю.

Згідно з Кодексом цивільного захисту України забезпечення захисту населення і територій від НС покладено на Єдину державну систему цивільного захисту (ЄДСЦЗ), яка є сукупністю суб'єктів забезпечення цивільного захисту (ЦЗ), котрі здійснюють реалізацію державної політики у сфері цивільного захисту.

Суб'єктами забезпечення цивільного захисту в межах своїх повноважень є:

- Рада національної безпеки і оборони України;
- Кабінет Міністрів України;
- центральний орган виконавчої влади, який забезпечує формування та реалізує державну політику у сфері цивільного захисту (нині це Державна служба України з надзвичайних ситуацій – ДСНС);

- інші центральні органи виконавчої влади;
- місцеві державні адміністрації;
- органи місцевого самоврядування;
- суб'єкти господарювання;
- громадяни України.

Загальне керівництво ЄДСЦЗ здійснює Кабінет Міністрів України. Безпосереднє керівництво діяльністю ЄДСЦЗ покладається на спеціально уповноважений центральний орган виконавчої влади з питань цивільного захисту (ДСНС). Діяльність ДСНС спрямовується і координується Кабінетом Міністрів України через Міністра оборони України.

ЄДСЦЗ базується на функціональних та територіальних підсистемах цивільного захисту та їх ланках, підпорядкованих ДСНС. Кожна підсистема має координуючі органи, постійні органи управління, сили та засоби, матеріальні ресурси, системи оповіщення тощо.

Таким чином, в Україні реалізований територіально-виробничий принцип цивільного захисту: у кожній територіальній одиниці відповідно до адміністративно-територіального поділу країни (область, район, місто, селище) є свій територіальний підрозділ ЦЗ. Паралельно в усіх сферах життєдіяльності населення, на кожному виробництві (підприємстві, установі, організації) функціонує відповідний виробничий підрозділ ЦЗ.

Режим функціонування єдиної системи цивільного захисту у межах конкретної території встановлюється залежно від існуючої або прогнозованої обстановки, масштабу надзвичайної ситуації за рішенням відповідно Кабінету Міністрів України.

Режим повсякденного функціонування єдиної системи цивільного захисту встановлюється за умов нормальної виробничо-промислової, радіаційної, хімічної, біологічної (в тому числі бактеріологічної), сейсмічної, гідрогеологічної та гідрометеорологічної обстановки, за відсутності епідемій, епізоотій, епіфітотій.

Режим підвищеної готовності єдиної системи цивільного захисту встановлюється в разі істотного погіршення виробничо-промислової, радіаційної, хімічної, біологічної (у тому числі бактеріологічної), сейсмічної, гідрогеологічної та гідрометеорологічної обстановки, за наявності загрози виникнення надзвичайної ситуації.

Режим надзвичайної ситуації єдиної системи цивільного захисту встановлюється в разі виникнення та під час ліквідації наслідків надзвичайної ситуації.

5 ЕКОНОМІКО-ОРГАНІЗАЦІЙНА ЧАСТИНА

5.1 Актуальність теми з позиції маркетингу

В сучасних умовах ринку газотурбінних двигунів спостерігається стійкий ріст попиту через збільшену потребу в енергії та зменшення викидів. Постійно зростають вимоги до ефективності та екологічної безпеки таких двигунів. Виробники знаходяться під тиском постійного удосконалення конструкцій та технологій виготовлення деталей, зокрема з використанням титанових сплавів. За дослідженням Precedence Research глобальний ринок газотурбінних двигунів перебуває в стані зростання. Здійснене дослідження вказує на те, що цей ринок очікується зростати впродовж прогнозованого періоду з 2023 по 2032 рр. Причиною такого росту є зростання використання газотурбінних двигунів в різних секторах, включаючи енергетику, авіацію, нафтову та газову промисловість, а також морський транспорт. Також, згідно з дослідженням, ринок газотурбінних двигунів свідчить про зростання інтересу до зелених та екологічно чистих рішень, що включає в себе використання газотурбінних двигунів, що працюють на природному газі та інших екологічно чистих паливних матеріалах. Це може свідчити про тенденцію до більш сталого та екологічно чистого виробництва та енергетики.

Сучасний ринок газотурбінних двигунів став більш конкурентним і вимогливим. З позиції маркетингу, актуальність удосконалення термічної обробки деталей з титанових сплавів виявляється у наступних аспектах:

- підвищення конкурентоспроможності: вдосконалення технологій термічної обробки може дозволити виробникам виготовляти більш ефективні та надійні деталі, що створює конкурентні переваги на ринку газотурбінних двигунів.

- зменшення витрат: удосконалення методів термічної обробки може допомогти знизити витрати на матеріали та енергію, що важливо з точки зору економіки виробництва.

- збільшення тривалості служби: покращення якості та тривалості служби деталей газотурбінних двигунів дозволяє зменшити витрати на їх заміну та обслуговування, що є важливим аргументом для покупців.

З позиції маркетингу, впровадження нових технологій термічної обробки може стати ключовим чинником в успішному впровадженні на ринок газотурбінних двигунів, що відповідає сучасним вимогам до продуктивності, надійності та ефективності.

5.2 Послідовний аналіз

В даній роботі виконали аналіз напрямків застосування продукції та вигоди для споживачів (табл. 5.1). Надано цілісне уявлення про зміст ідеї та можливі базові потенційні ринки, в межах яких потрібно шукати групи потенційних клієнтів.

Таким чином, запропонована технологія дозволить отримати значні конкурентні переваги на ринку транспортних засобів та енергетичного обладнання.

Виконаний аналіз характеристики потенційного ринку (табл. 5.2).

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.

Таблиця 5.1 – Опис ідеї

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для споживачів (користувачів)
Розробка та впровадження технології термічної обробки барабана компресора зі сплаву ВТ8 для підвищення його міцності, стійкості до термічних навантажень та покращення ефективності роботи.	Авіаційна промисловість - Виготовлення авіаційних двигунів Енергетичний сектор - Виробництво енергетичних турбін. Морський транспорт - Виробництво суднових компресорів та газотурбінних двигунів. Промисловість - Використання в процесах компресії та стиснення газів та робочих середовищ.	Підвищення тривалості служби компресора. Зменшення необхідності в ремонті та обслуговуванні. Покращення теплоефективності та зниження витрат на паливе. Відповідність нормам безпеки та нормативам екології

Таблиця 5.2 – Попередня характеристика потенційного ринку

Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	2
Головні конкуренти	Підприємства, що пропонують різні види термічної обробки в Україні та зарубіжні компанії
Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає з огляду на попит на підвищення

	ресурсу та ефективності ГТД.
--	------------------------------

Кінець таблиці 5.2

1	2
Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Потрібні інвестиції в обладнання та сертифікацію
Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	1. Стандартизація процесів термообробки 2. Вимоги виробників авіадвигунів до якості деталей

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 довговічності та ефективності авіаційних двигунів	Виробники літаків Виробники двигунів Енергетичні підприємства Ремонтні підприємства	Виробники потребують стандартизації, фокусуються на якості. Ремонтні та енергетичні підприємства - гнучкі обсяги за	Твердість, зносостійкість, ерозійна стійкість, опір втомному руйнуванню, ціна

		нижчими цінами.	
--	--	-----------------	--

Таким чином, існують різні вимоги та поведінка основних груп потенційних клієнтів на ринку термообробки деталей ГТД.

Виконаний аналіз SWOT- аналіз середовища реалізації інноваційного проекту. Результати аналізу приведені в табл. 5.4.

Таблиця 5.4 – SWOT- аналіз

Сильні сторони:	Слабкі сторони:
Розроблена технологія термічної обробки сплаву ВТ8 є новаторською і може забезпечити конкурентну перевагу на ринку. Зростаючий попит на надійні та ефективні компресори для різних галузей промисловості та енергетики.	Розробка нової технології та її впровадження може потребувати значних інвестицій. Реалізація проекту може зайняти більше часу, ніж планувалося, що може вплинути на конкурентоспроможність на ринку.
Можливості:	Загрози:
Зростаючий ринок компресорів та термічної обробки створює можливість для збільшення обсягів продажів та прибутку. Відповідність стандартам і нормативам забезпечить доступ до більш широкого ринку. Розроблена технологія може відповідати екологічним вимогам і попиту на енергоефективні рішення.	Наявність інших гравців у сегменті компресорів та термічної обробки може збільшити конкуренцію на ринку. Зміни в законодавстві або нормативах можуть вплинути на вимоги до продукту та виробничих процесів. Економічні коливання можуть вплинути на здатність клієнтів до інвестицій у нові технології.

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

Це дозволяє визначити пріоритетні сегменти ринку та розробити адресну маркетингову стратегію для просування технології азотування з урахуванням специфіки цільових груп споживачів.

Виконана ідентифікація стейкхолдерів, виконана їх пріоритизація та побудована Карта стейкхолдерів, яка дозволить візуалізувати картину взаємозв'язків стейкхолдерів. З метою відображення взаємозв'язків стейкхолдерів на Kartі виокремлено три концентричних області, в яких розміщено всіх зацікавлених осіб інноваційного проекту за можливостями впливу на них ініціатора проекту.

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
Виробники газотурбінних двигунів для енергетичних станцій	Висока	50 000 шт. на рік	висока	Потребує сертифікації, конкуренція
Виробники газотурбінних двигунів для авіаційної промисловості	висока	10 000 шт. на рік	Висока	високі стандарти безпеки та якості
Виробники	помірна	50 000 шт. на	помірна	високі

Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
газотурбінних двигунів для морського транспорту		рік		стандарти безпеки

Область внутрішніх стейкхолдерів – область повноважень/відповідальності ініціатора. Внутрішні зацікавлені сторони знаходяться в прямій підлеглих ініціатора, що дозволяє використовувати досить прості методи адміністрування проекту (рис. 5.1).



Рисунок 5.1 - Карта стейкхолдерів

Під час виконання даної роботи залучено такі трудові ресурси: науковий керівник, старший науковий співробітник, який здійснює безпосередній контроль і приймає участь в усіх етапах дослідження, інженер дослідник відповідальний за проведення експериментів, обробку та аналіз результатів, та лаборант, що приймає участь в дослідженні. До їх обов'язків входить забезпечення технічної бази дослідження, налаштування та допомога в експлуатації обладнання, попередній аналіз результатів, консультації.

Визначили витрати на оплату праці з урахуванням балансу робочого часу одного працівника. Витрати за цією статтею складаються із планового фонду зарплати усіх категорій працівників, які задіяні у проведенні досліджень (табл. 5.6).

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	16000	20	3200	19200	230400	50768
Провідний інженер	1	14000	20	2800	16800	201600	44432
Інженер-технолог	2	12000	20	4800	16800	201600	44432
Лаборант	1	9000	20	1800	10800	129600	28560
Разом	5	6300	-	12600	-	763200	168192

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
Захисний газ	м ³	500	280	140000
компресор	шт	10	15000	150000
Тара	шт	10	2000	20000
Масло	л	500	50	25000
Реактиви для аналізу	комплект	3	5000	15000
Витратні матеріали	-	-	-	10000
Разом	-	-	-	360000

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
1	2	3	4	5
Електропостачання	кВт·год	2500	5,5	13750
Водопостачання	м ³	10	128	1280
Теплопостачання	Гкал	5	1850	9250
Сертифікація	послуга	1	65000	65000
Разом	-	-	-	89280

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

Таблиця 5.9 – Розрахунок амортизації

Обладнання	Кількість	Вартість, грн	Загальна вартість, грн	Річна амортизація, грн
Піч СНЗ	1	5 000 000	5 000 000	1000 000
Твердомір	2	65 000	130 000	26 000
Мікроскоп	1	250 000	250 000	50 000

Обладнання	Кількість	Вартість, грн	Загальна вартість, грн	Річна амортизація, грн
Комп'ютер	3	32 000	96 000	19 200
Разом	-	-	5 476 000	1 095 200

Враховано основне устаткування: піч, твердоміри, мікроскоп та комп'ютери. Загальна річна сума амортизації складає 1 095 200 грн.

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	763 200
ЄСВ	168 192
Матеріальні витрати	360 000
Вартість послуг	89 280
Амортизація обладнання	1 095 200
Виробнича собівартість	2 475 872
Адміністративні витрати (20%)	495 174,4
Повна собівартість	2 971 046,4

Розрахунок економічного ефекту виконувався на основі того, що порівнювався економічний ефект від застосування запропонованої технології в порівнянні з серійною технологією термічної обробки (табл. 5.11).

Таблиця 5.11 - Порівняння технологій термічної обробки без деталізації матеріалів

Параметр	Розроблена	Стандартна
----------	------------	------------

	технологія	технологія
Якість продукції	Вища	Середня
Продуктивність	Вища	Середня
Витрати на енергію	Зменшені на 30%	В середньому
Загальні виробничі витрати	Зменшені на 15%	В середньому

Розроблена технологія має нижчу собівартість порівняно зі стандартною термообробкою та забезпечує подовження ресурсу роботи деталей ГТД. Тому економічний ефект тут буде виражатися як в економії на кількості замін деталей протягом строку служби двигуна, так і в зниженні витрат на електроенергію та загальних виробничих витрат.

ВИСНОВКИ

В роботі було проведено аналіз різноманітних джерел, включаючи довідникову, науково-технічну та навчальну літературу, що дозволило мені обґрунтовано вибрати оптимальну технологію термічної обробки. Були проведені розрахунки оптимальних температурних режимів та часу для кожного етапу технологічного процесу, зокрема для двоетапного відпалу.

На першому етапі температура була встановлена на рівні $940 \pm 10^{\circ}\text{C}$, з часом прогріву 15 хвилин, утримання 25 хвилин та охолодження 3 хвилини. Другий етап відпалу передбачав температуру $590 \pm 10^{\circ}\text{C}$, з часом прогріву 20 хвилин, утримання 25 хвилин та охолодження 2 хвилини.

Розроблена технологічна карта термічної обробки детально описує всі аспекти процесу. Особливу увагу приділено контролю за важливими параметрами, як хімічний склад матеріалів, розміри та геометрія виробів, стан поверхні, структура матеріалу, атмосфера в процесі обробки, а також точне дотримання температурних режимів і часу на кожному етапі обробки. Це дозволить забезпечити високу якість готових виробів.

У розділі з охорони праці проведено аналіз потенційних небезпек під час термічної обробки та запропоновано організаційні і технічні заходи для їх усунення. До них належать: ефективне використання засобів індивідуального захисту, строге дотримання правил електро- та пожежної безпеки, оптимізація систем вентиляції, наявність первинних засобів для гасіння пожеж, а також облаштування аварійних шляхів для евакуації. Впровадження цих заходів забезпечить значне зниження ризиків, пов'язаних із впливом небезпечних та шкідливих факторів на працівників під час роботи.

Проведено дослідження ринку газотурбінних двигунів і визначено перспективність застосування термічної обробки виробів ГТД з точки зору

маркетингу. Проведено розрахунок економічної ефективності застосування даної технології.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Шерлыгин Н.А., Шахвердов В.Г. Конструкция и эксплуатация авиационных газотурбинных двигателей / Н.А. Шерлыгин, В.Г. Шахвердов. - Москва: Машиностроение, 1969. - 371 с.
2. Sydor, P.Y. Effect of hot deformation and heat treatment of VT-8 alloy on its endurance / P.Y. Sydor // Materials Science. - 1996. - № 32. - P. 592–597.
<https://doi.org/10.1007/BF02539072>
3. Борисова Е.А., Бочвар Г.А., Брун М.Я., Глазунов С.Г., Колачев Б.А. Титановые сплавы. Металлография титановых сплавов / Е.А. Борисова, Г.А. Бочвар, М.Я. Брун, С.Г. Глазунов, Б.А. Колачев. - Москва: Металлургия, 1980. - 464 с.
4. Imayev, V.M., Gaisin, R.A., Gaisina, E.R., Imayev, R.M. Microstructure, processing and mechanical properties of a titanium alloy Ti-20Zr-6.5Al-3.3Mo-0.3Si-0.1B / V.M. Imayev, R.A. Gaisin, E.R. Gaisina, R.M. Imayev // Materials Science and Engineering: A. - 2017. - № 696. - P. 137-145.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.04.056>
5. Lütjering G., Williams J.C. Titanium (engineering materials and processes) / G. Lütjering, J.C. Williams. - Berlin: Springer-Verlag, 2003.
6. Колачев Б.А., Ливанов В.А., Елагин В.И. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. Учебное пособие для вузов. Изд. 2-е, испр. и доп. / Б.А. Колачев, В.А. Ливанов, В.И. Елагин. - Москва: Металлургия, 1981. - 416 с.
7. Kolachev, B.A., Livanov, V.A., Bukhanova, A.A. et al. Variation of the mechanical properties with the hydrogen content of the heat-treated alloy VT8 / B.A. Kolachev, V.A. Livanov, A.A. Bukhanova et al. // Metallurgical Science and Heat Treatment. - 1968. - № 10. - P. 700–703.
<https://doi.org/10.1007/BF00652843>

8. Myslyvchenko, O.M., Bondar, A.A., Tsyganenko, N.I. et al. Influence of Heat Treatment on the Microstructure and Physico-mechanical Properties of Titanium Alloy of the Ti–Nb–Mo system / O.M. Myslyvchenko, A.A. Bondar, N.I. Tsyganenko et al. // Materials Science. - 2021. - № 56. - P. 481–490. <https://doi.org/10.1007/s11003-021-00454-0>
9. Yu Y., Hui S.X., Ye W.J., Xiong B.Q. Mechanical properties and microstructure of an $\alpha+\beta$ titanium alloy with high strength and fracture toughness / Y. Yu, S.X. Hui, W.J. Ye, B.Q. Xiong // Rare Metals. - 2009. - № 28(4).
10. Azgomi, N., Tetteh, F., Duntu, S.H. et al. Effect of Heat Treatment on the Microstructural Evolution and Properties of 3D-Printed and Conventionally Produced Medical-Grade Ti6Al4V ELI Alloy / N. Azgomi, F. Tetteh, S.H. Duntu et al. // Metallurgical and Materials Transactions A. - 2021. - № 52. - P. 3382–3400. <https://doi.org/10.1007/s11661-021-06310-9>
11. Ivasishin, O.M., Markovsky, P.E. Enhancing the mechanical properties of titanium alloys with rapid heat treatment / O.M. Ivasishin, P.E. Markovsky // JOM. - 1996. - № 48. - P. 48–52. <https://doi.org/10.1007/BF03222998>
12. Yu, W., Zhou, J., Yin, Y. et al. Effects of heat treatments on microstructures of TiAl alloys / W. Yu, J. Zhou, Y. Yin et al. // International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials. - 2022. - № 29. - P. 1225–1230. <https://doi.org/10.1007/s12613-021-2252-z>
13. Edrisy, A., Farokhzadeh, K. Plasma Nitriding of Titanium Alloys // Plasma Science and Technology / ed. Tetsu Mieno. – Rijeka: IntechOpen, 2016. – Ch. 4. <https://doi.org/10.5772/61937>
14. Gas Turbine Market Size, Share and Growth Analysis Режим доступа: <https://www.precedenceresearch.com/gas-turbine-market>