

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

Інженерно-фізичний факультет  
(повне найменування факультету)

Кафедра «Фізичне матеріалознавство»  
(повне найменування кафедри)

## Пояснювальна записка

до дипломного проекту (роботи)  
бакалавра  
(ступінь вищої освіти)

на тему Розробка технологічних режимів термічної обробки лопаток компресора із титанового сплаву VT8

(назва теми)

Виконав(ла): студент(ка) IV курсу, групи ІФз-210сп

Спеціальності 132 «Матеріалознавство»  
(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)  
Прикладне матеріалознавство

КУДРЕВСЬКИЙ Євген Андрійович  
(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

Керівник ТКАЧ Дар'я Володимирівна  
(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

Рецензент СОТНІКОВ Євген Георгійович  
(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний університет «Запорізька політехніка»

**Факультет Інженерно- фізичний**

**Кафедра Фізичне матеріалознавство**

Ступінь вищої освіти бакалавр

**Спеціальність 132 «Матеріалознавство»**

(код і найменування)

Освітня програма (спеціалізація) Прикладне матеріалознавство

(назва освітньої програми (спеціалізації))

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри «Фізичне матеріалознавство»  
**Вадим ОЛЬШАНЕЦЬКИЙ**

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ року

**З А В Д А Н Н Я**

**НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)**

Кудревський Євген Андрійович

(ПРІЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Розробка технологічних режимів термічної обробки лопаток компресора із титанового сплаву VT8

керівник проекту (роботи) ст. викладач ТКАЧ Дар'я Володимирівна

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

затвержені наказом закладу вищої освіти від « 16 » травня 2024 року №228

2. Строк подання студентом проекту (роботи) \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Лопатки компресора,

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

1. Характеристика та умови експлуатації виробів, вимоги до матеріалу.
2. Номенклатура виробів і маршрутна технологія їх виготовлення.
3. Характеристика матеріалів виробів.
4. Розробка режимів і технологій термічної обробки.
5. Технічний контроль, попередження та виправлення дефектів.
6. Охорона праці та безпека життєдіяльності
7. Спеціальна частина.

## 6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	ПРИЗВИЩЕ, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання

7. Дата видачі завдання « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ року.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту ( роботи )	Примітка
1	Характеристика та умови експлуатації виробів, вимоги до матеріалу		
2	Номенклатура виробів і маршрутна технологія їх виготовлення		
3	Розробка режимів і технологій термічної обробки		
4	Технічний контроль, попередження та виправлення дефектів		
5	Охорона праці та безпека життєдіяльності		
6	Спеціальна частина		

Студент(ка)

\_\_\_\_\_ Євген КУДРЕВСЬКИЙ  
( підпис ) (Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Керівник проекту (роботи)

\_\_\_\_\_ Дар'я ТКАЧ  
( підпис ) (Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 73 с., 9 табл., 19 рис., 3 дод., 23 джерел.

### ТЕХНОЛОГІЧНІ РЕЖИМИ, МАРШРУТНА ТЕХНОЛОГІЯ, ТЕРМІЧНА ОБРОБКА, ЛОПАТКИ КОМПРЕСОРА

Мета роботи – обґрунтування вибору матеріалу та технології режимів термічної обробки для лопаток компресора.

Описано характеристика та умови експлуатації виробів, а також вимоги до матеріалу. Розроблена маршрутна технологія режимів термічної обробки виробів. Зважаючи на технологічні вимоги було обґрунтовано вибір матеріалів для виробу. Описано характеристика обраного матеріалу, а точніше сплаву ВТ-8. Описаний технічний контроль, попередження і виправлення дефектів. Розроблено техніку безпеки на виробництві.

## ЗМІСТ

Вступ.....	6
1. Характеристика та умови експлуатації виробів, вимоги до матеріалу.....	8
1.1 Конструкція і умови експлуатації лопаток компресора.....	8
1.2 Основні дефекти що виникають при експлуатації.....	13
1.3 Характеристики матеріалів.....	16
1.4 Обґрунтування вибору матеріалу.....	23
1.5 Характеристика обраного матеріалу.....	25
2. Номенклатура виробів і маршрутна технологія їх виготовлення.....	32
2.1 Номенклатура виробів.....	32
2.2 Маршрутна технологія виготовлення тіл кочення вольниць.....	33
3. Розробка режимів і технологій термічної обробки.....	34
4. Технологічний контроль, попередження та виправлення дефектів.....	43
5. Безпека життєдіяльності фахівця та охорона праці.....	46
5.1 Аналіз потенційних небезпек.....	46
5.2 Заходи забезпечення безпеки.....	47
6. Спеціальна частина.....	55
6.1 Стабілізуюча термічна обробка титанових сплавів.....	55
6.2 Фазові перетворення в титанових сплавах після гартування і старіння.....	56
6.3 Зміцнювальна термічна обробка сплаву VT8.....	60
Висновки.....	64
Перелік джерел посилань.....	65
Додаток А Ескіз лопатки, номенклатура, хімічний склад та властивості сталей.....	68
Додаток Б Графік та технологічна карта термічної обробки лопатки компресора зі сталі VT8.....	69
Додаток В Дефекти термічної обробки.....	73

## ВСТУП

Титанові сплави відіграють ключову роль у сучасній авіаційній та космічній промисловості завдяки їх винятковим механічним властивостям, високій корозійній стійкості та здатності витримувати високі температури. Серед цих сплавів особливо виділяється сплав ВТ8 (Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo), який широко використовується для виготовлення критично важливих компонентів, зокрема лопаток компресорів.

Лопатки компресора є одними з найбільш навантажених елементів авіаційних двигунів, тому їх якість і надійність безпосередньо впливають на ефективність і безпеку експлуатації всього агрегату.

Одним з найважливіших етапів виробництва лопаток компресора зі сплаву ВТ8 є термічна обробка, яка дозволяє досягти необхідних механічних властивостей та забезпечити тривалу і безпечну експлуатацію. Технологія термічної обробки включає в себе кілька стадій, таких як загартування, відпуск, дифузійний відпал та можливу поверхневу обробку, кожна з яких має свої особливості і впливає на кінцеві характеристики виробу.

Для сплаву ВТ8 найбільш оптимальними методами термічної обробки є подвійний відпал та ізотермічний відпал.

Подвійний відпал - це процес термічної обробки металів і сплавів, який включає два етапи нагрівання та охолодження. Цей метод використовується для поліпшення механічних властивостей матеріалу, усунення внутрішніх напружень і поліпшення однорідності структури.

Ізотермічний відпал - це процес термічної обробки, під час якого матеріал нагрівається до певної температури, а потім витримується за цієї температури протягом тривалого часу, після чого повільно охолоджується. Ізотермічний відпал особливо ефективний для досягнення рівномірної структури і механічних властивостей.

Метою даної дипломної роботи є обґрунтування вибору матеріалу та технології режимів термічної обробки для лопаток компресора зі сплаву ВТ8.

# 1. ХАРАКТЕРИСТИКА ТА УМОВИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ВИРОБІВ, ВИМОГИ ДО МАТЕРІАЛУ

## 1.1 Конструкція і умови експлуатації лопаток компресора

Розглянемо умови експлуатації виробів з титанових сплавів на прикладі робочої лопатки компресора.

Лопатки рухової установки, а також лопатки турбіни і компресора є одним з найбільш важливих компонентів рухової установки.

Компресор складається з ротора і диска, до якого прикріплені лопатки.

Робочі лопатки газової турбіни є відповідальними деталями газотурбінного двигуна, від надійної роботи яких залежить надійність роботи двигуна в цілому. Робочі лопатки забезпечують перетворення енергії газового потоку в механічну роботу турбіни. Зусилля, що виникають на лопатках, через диск передаються на вал.

Ескіз лопатки із жароміцних сплавів представлений на рис. 1.1

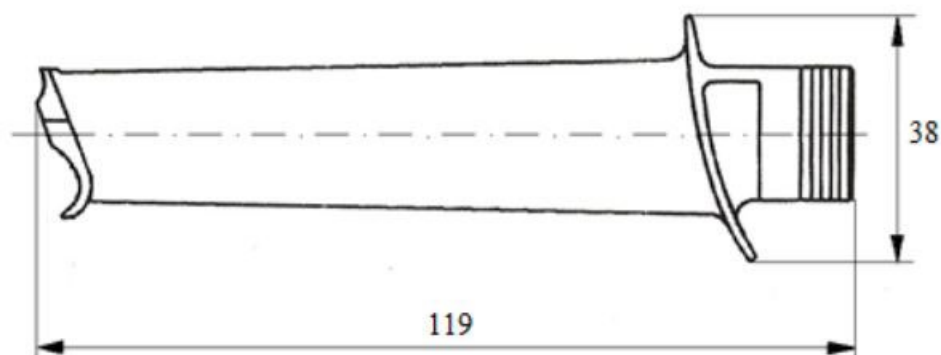


Рисунок 1.1 – Ескіз лопатки ( $L=119\text{мм}$ ;  $b=38\text{мм}$ ;  $h=10\text{мм}$ ) [22]

Лопатки компресора зі сплаву ВТ8 експлуатуються в надзвичайно важких умовах. Вони повинні витримувати високі температури, які можуть досягати до 600°C. У таких умовах матеріал повинен зберігати свою міцність і стійкість до деформацій. Завдяки високій термостійкості ВТ8, лопатки не втрачають своїх властивостей і забезпечують стабільну роботу компресора.

Крім температурних навантажень, лопатки компресора піддаються значним механічним навантаженням. Вони працюють при високих обертах, що створює центробіжні сили, які намагаються розірвати лопатки. ВТ8 завдяки своїй високій міцності успішно протистоїть цим силам, забезпечуючи довговічність і надійність роботи компресора.

З урахуванням складних умов експлуатації і ключової ролі цих лопаток у компресорі, конструкція, матеріали та технології виготовлення висуваються перед ними особливо жорсткі вимоги. Робочі лопатки компресорів повинні відповідати наступним основним вимогам:

- Аеродинамічна ефективність: Профільна частина лопаток повинна мати оптимальні аеродинамічні характеристики для забезпечення ефективного стиснення газу.
- Механічна міцність: Конструкція та матеріали лопаток повинні забезпечувати високу механічну міцність для опірності проти статичних і динамічних навантажень.

Помітно, що експлуатація лопаток в компресорах насичена численними викликами та умовами, що ставлять перед ними вимоги до міцності, стійкості та ефективності.

Матеріал лопатки має відповідати таким характеристикам:  
експлуатація – 5тис.год.,  $T_{\text{експ}} \leq 500^\circ\text{C}$ ,  $\sigma_B = 1000 \text{ МПа}$ ,  $\delta = 10\%$ ,  $\psi = 30\%$ ,  
 $KCU \geq 20 \text{ Дж/см}^2$ ,  $\sigma_{-1} = 530 \text{ МПа}$ ,  $\sigma_{0,2/1000}^{450} = 235 \text{ МПа}$ ,  $\sigma_{1000}^{450} = 620 \text{ МПа}$ .

Розміри лопаток компресора розрізняються по довжині. Це пов'язано з тим, що швидкість потоку стисненого повітря не змінюється, тиск збільшується, а обсяг зменшується. Таким чином, лопатки першого ступеня більше, ніж лопатки останнього ступеня.



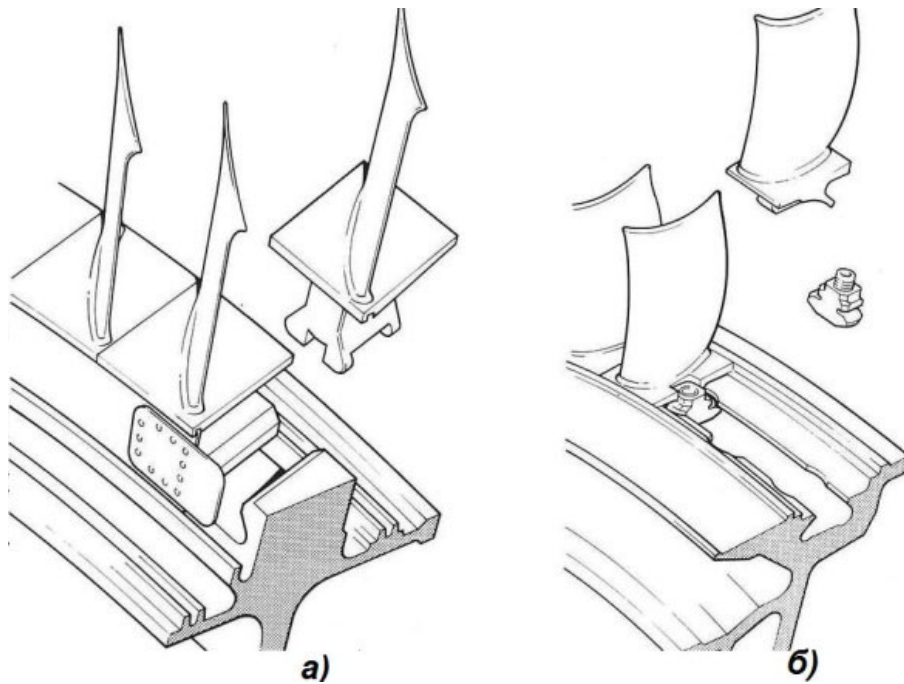
Рисунок 1.2 –Робоча лопатка компресора [2]

Перо лопатки - це спеціально розроблена повітряна поверхня, за допомогою якої лопатковий агрегат здійснює обмін енергією. Це обов'язковий елемент лопаті турбомашини. У будь-якої лопатки є 2 сторони. Опукла поверхня називається гребнем, а увігнута - борозенкою. У багатьох джерелах вони називаються розвантажувальною стороною і стороною тиску відповідно. Перша низхідна ріжуча кромка називається входом, а остання низхідна ріжуча кромка називається виходом.

Замок призначений для кріплення тіла лопатки до ротора або диска статора. В осьових компресорах ГТД і ГТУ найбільшою популярністю користуються замки типу "ластівчин хвіст" з поздовжніми і поперечними пазами.

У першому випадку канавка, в яку вставляється лопать, орієнтована під невеликим кутом уздовж осі обертання ротора (рис. 1.3 а).

У другому в корпусі по периметру диска вирізається паз (рис. 1.3 б).



а - з вертикальними порізами; б- горизонтальними порізами

Рисунок 1.3 - Замок "ластівчин хвіст" з вертикальними і горизонтальними порізами (а - з вертикальними порізами; б- горизонтальними порізами) [2]

У деяких випадках потужності блокування "ластівчин хвіст" недостатньо для утримання лопаті на початковій ступені компресора, особливо на ступені вентилятора ГТД. В цьому випадку використовуються замки типу "ялинка" (рис. 1.4). Кількість ярусів "ялинки" тут зазвичай дорівнює 2...3. Подібні замки використовуються для осьових турбін в аерокосмічних або енергетичних цілях. Кількість зубчиків на " ялинці " може досягати 5 штук.

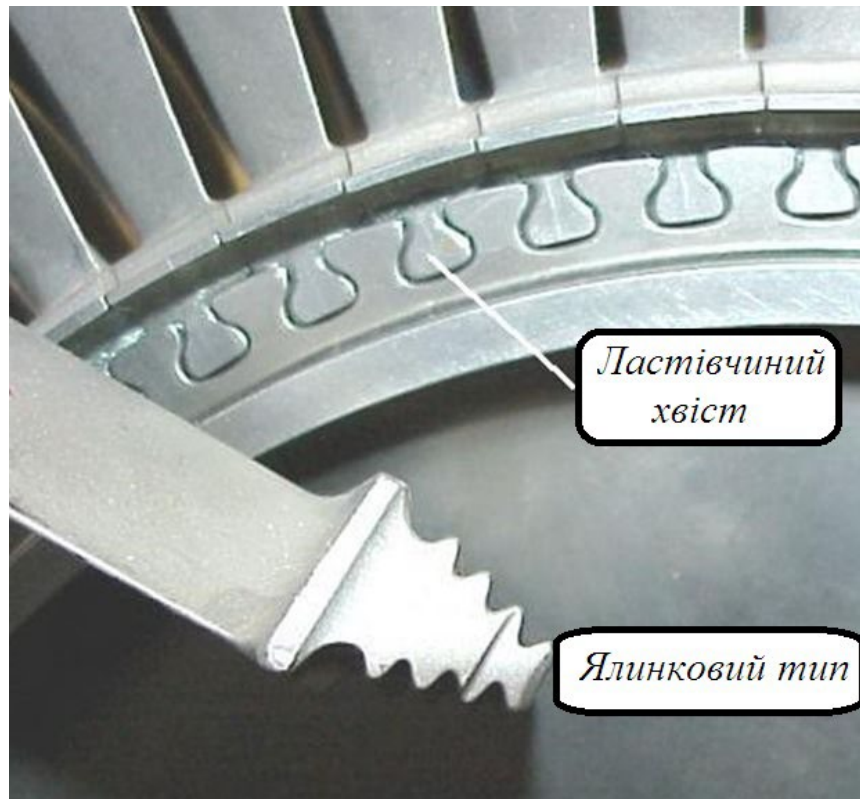


Рисунок 1.4 - Порівняння замків ялинкового типу та "ластівчин хвіст" [4]

Набір лопаток, прикріплених до краю диска або його кільцевого кожуха, називається коронкою лопатки (рис. 1.5).

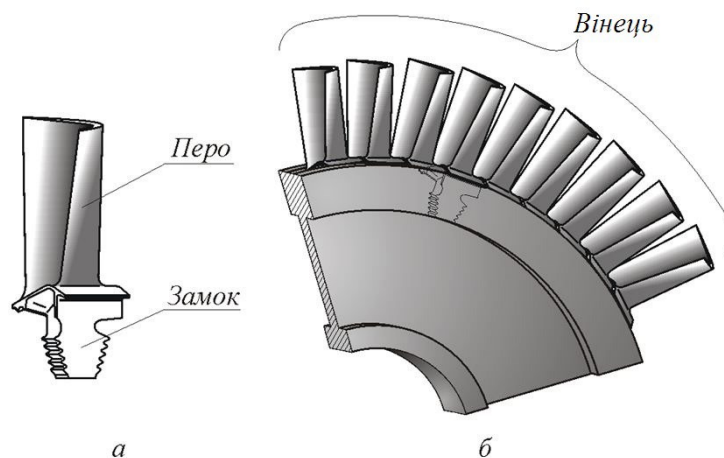


Рисунок 1.5 - Коронка лопаткової машини [5]

Корона може бути рухомою і нерухомою. Лопаті, прикріплені до диска, які з'єднані з приводним валом, утворюють рухому корону лопатей, звану гребним

гвинтом. Нерухома лопатка, прикріплена до корпусу, утворює направляючий вузол в компресорі і вузол сопла в турбіні.

Іноді в радіальних турбомашинах (так званих закритих колесах) використовується перев'язаний гребний гвинт (рис. 1.6).



Рисунок 1.6 - Закрите робоче колесо відцентрового компресора [5]

## 1.2 Основні дефекти що виникають при експлуатації

Значний відсоток відмов двигунів пов'язаний із руйнуванням лопаток компресора. Основними причинами руйнування лопаток компресора є:

- високий рівень втоми;
- недостатня конструктивна міцність лопатки;
- ерозійне зношування лопаток;
- пошкодження лопаток сторонніми предметами, які потрапляють у повітряний тракт;
- корозійне пошкодження поверхні лопатки;
- виробничі дефекти.

Руйнування лопатки компресора призводить до помпажу, підвищення рівня вібрацій та погіршення характеристик двигуна. Висока змінна напруги, що виникає при резонансному коливанні лопатки за основним тоном (іноді за вищими тонами), викликає утворення втомних тріщин. Втомні руйнування відбуваються не миттєво, що зумовлює поступове накопичення дефектів у кристалічних ґратах і обмежує швидкість поширення тріщин. При достатній величині втомних тріщин відбувається миттєве тендітне руйнування лопатки ("долом").

В даний час інструментально визначити рівень втоми неможливо, тому лопатки замінюються, як тільки виявляється втомна тріщина. Розвиток тріщин починається найчастіше з вихідних кромek, рідше з вхідних. Іноді вони виникають на спинці і корит лопатки біля комлевої частини, ближче до замку. При руйнуванні титанових лопаток компресора на лопатках турбіни утворюється наліт розплавленого металу як світлих плям, що є ознакою пошкодження в оцінці технічного стану. На двигуні, де має місце втомне руйнування лопатки зазвичай спостерігається істотний розкид напруги при резонансних коливаннях лопаток [23]:

$$\frac{\sigma_{Pmax}}{\sigma_{Pmin}} = 3.5/4.5 \quad (1.1.1)$$

на справних лопатках:

$$\frac{\sigma_{Pmax}}{\sigma_{Pmin}} = < 1.5 \quad (1.1.2)$$

Тому відношення  $\sigma_{max}/\sigma_{min}$  розглядається поряд з максимальною напругою  $\sigma_{max}$  як діагностичний параметр. Оцінка напруги здійснюється за допомогою тензодатчиків або шляхом безконтактних вимірювань:

- дискретно-фазовий метод;
- голографічний метод.

Ерозійне зношування лопаток призводить до зменшення їх хорди і товщини, до зниження втомної міцності, а також до зниження ККД компресора і погіршення інших основних характеристик двигуна. Ушкодження та знос лабіринтних ущільнень збільшує осьовий зазор, що знижує ККД та запас стійкості компресора.

Найбільшим ушкодженням при ерозії зазнають вхідна та вихідна кромки, верхня частина лопаток ротора та статора. При попаданні в повітряний тракт сторонніх предметів особливо пошкоджується передня кромка. Вибіони, що утворюються, можуть бути центром зародження втомних тріщин. До корозійного зносу схильні, в основному, сталеві та алюмінієві лопатки. Глибина корозійного ураження досягає 0,2 - 0,4 мм і носить, найчастіше, міжкристалічний осередковий характер. Розвитку пошкоджень сприяють пропали і напруги, що розтягуються в поверхневих шарах.

Корозійні ушкодження зменшують межу витривалості на 10 – 30%. Руйнуванню лопаток компресора при експлуатації сприяють виробничі дефекти. Найбільш важко виявляються припали поверхні та розтягуючі залишкові напруги, що виникають при механічній обробці. Порушення геометрії профілю біля кромки, відсутність радіусів біля жолобників і низька якість поверхні, знижують межу витривалості більш ніж на 20%. Руйнування замків лопаток компресора носить, переважно, втомний характер. Цьому сприяє фреттинг-корозія (корозія тертя), що руйнує поверхневі шари металу у місцях контакту.

Класифікація дефектів поверхні пера лопаток після штампування показала, що їх можна представити у вигляді п'яти груп:

- Виступи (горби на поверхні);
- Лунки (ямки, вм'ятини);
- Підвищена шорсткість;
- Виразки;
- Точкове світіння люмінофора при контролі ЛЮМ1-ІВ.

### 1.3 Характеристика матеріалів виробів

Вибір матеріалу повинен враховувати переваги і недоліки матеріалів в залежності від діапазону температур та оптимальних функціональних характеристик.

Для виробництва лопаток 1 рівня компресора використовуються якісні матеріали. Для компресорних лопаток 1 рівня, в сучасних ГТД, використовуються, титанові сплави (BT3-1, BT9, BT8).

Підвищення міцності титанових сплавів може бути досягнуто легуванням, зміцнюючою термообробкою, а також властивості сплаву будуть залежати від структури, отриманої в процесі пластичної деформації.

В залежності від впливу на поліморфізм титану всі легуючі елементи поділяють на три основні групи.

До першої групи належать елементи, що сприяють розширенню  $\alpha$ -області. Ці елементи –  $\alpha$ -стабілізатори (Al, Ga, V, C, N, Zn), вони підвищують температуру поліморфного перетворення (рис. 1.7).

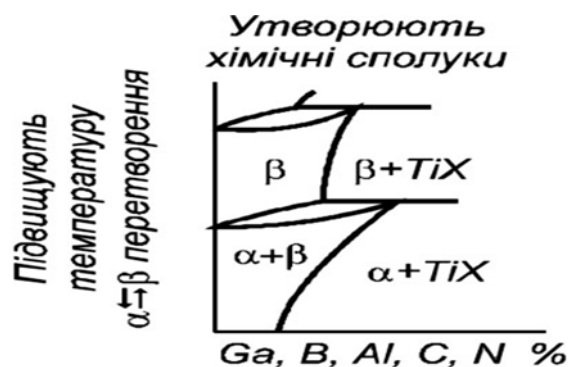


Рисунок 1.7 – Вплив елементів першої групи на поліморфізм титану [6]

Друга група елементів –  $\beta$ -стабілізатори (Mo, V, Mn, Cr, Fe, Ni, Si, Ta, Co, Nb).

Ці елементи знижують температуру поліморфного перетворення, збільшують обсяг  $\beta$  -області (рис. 1.8).

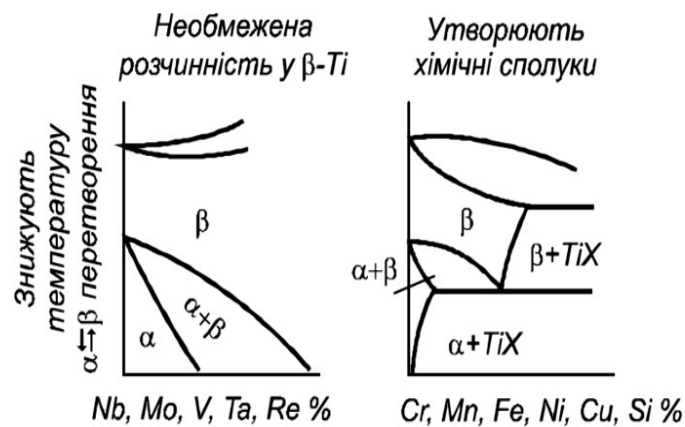


Рисунок 1.8 – Вплив елементів другої групи на поліморфізм титану [6]

До третьої групи відносять нейтральні елементи, що не впливають на температуру поліморфного перетворення: Hf, Zr, Sn, Ge. Титан легують наступними елементами: Al, Mo, Mn, Cr, Sn, Zr, Nb, V.

Хімічний склад сплавів наведено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1. Хімічний склад титанових сплавів VT3-1, VT8, VT8M-1 % [22]

Марка сплава	Al	Mo	Zr	Fe	Si	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	C	Cr
VT3-1	5,2-6,8	2,0-3,0	≤0,5	0,2-0,7	0,15-0,35	≤0,18	≤0,015	≤0,05	≤0,1	1,5-2,5Cr
VT8	5,8-7,0	2,8-3,8	≤0,5	≤0,3	0,2-0,4	≤0,15	≤0,015	≤0,05	≤0,1	-
VT8M-1	4,8- 6,0	3,5- 4,5	0,3-1,5	-	0,08- 0,25	-	-	-	-	0,5- 1,5

VT3-1 – деформівний  $\alpha+\beta$ -сплав мартенситного типу.

VT-8 – деформівний  $\alpha+\beta$ -сплав мартенситного типу.

VT8M-1– деформівний  $\alpha+\beta$ -сплав мартенситного типу.

Сплав VT3-1 - жароміцний титановий сплав системи Ti-Al-Mo-Cr-Fe-Si - деформівний. За структурним класом в рівноважному стані відноситься до двофазних, має структурою  $\alpha+\beta$ . Такі сплави здатні зміцнюватися термічною обробкою. В загартованому стані відноситься до мартенситного класу. Обмежена

зварюваність. Деталі з цього сплаву працюють при температурі до 400°C (6000 год) і до 450°C (2000 годин).

Сплав VT8 - жароміцний титановий сплав системи Ti-Al-Mo-Si, із структурою  $\alpha+\beta$ . Титановий сплав, що легований алюмінієм, ізоморфними  $\beta$ -стабілізаторами та евтектоїдоутворювачами (неперехідними елементами).

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

Сплав VT8-M1 – деформівний жароміцний титановий сплав системи Ti-AlMo-Zr-Si відноситься до двофазних  $\alpha+\beta$ -сплавам мартенситного класу. Використовується для виготовлення великогабаритних зварних і збірних конструкцій літальних апаратів.

На рис. 1.9 показано вплив легуючих елементів та домішок на межу міцності.

Алюміній (Al) - широко поширений у природі і доступний елемент,  $\alpha$ -стабілізатор, розширює область існування  $\alpha$ -Ti. Алюміній суттєво зміцнює  $\alpha$ -фазу при кімнатній температурі та збільшує термічну стабільність  $\beta$ -фази. Щільність алюмінію значно менша за щільність титану, і тому введення алюмінію знижує щільність сплавів і підвищує їх питому міцність. Крім того, зі збільшенням вмісту

алюмінію підвищується жароміцність та опір повзучості, а також зменшується схильність до водневої крихкості.

Проте концентрацію алюмінію слід обмежувати, так як занадто висока його концентрація (більше 7%) призводить до появи в структурі сплаву крихкої та твердої фази – інтерметаліду  $TiAl_3$ .

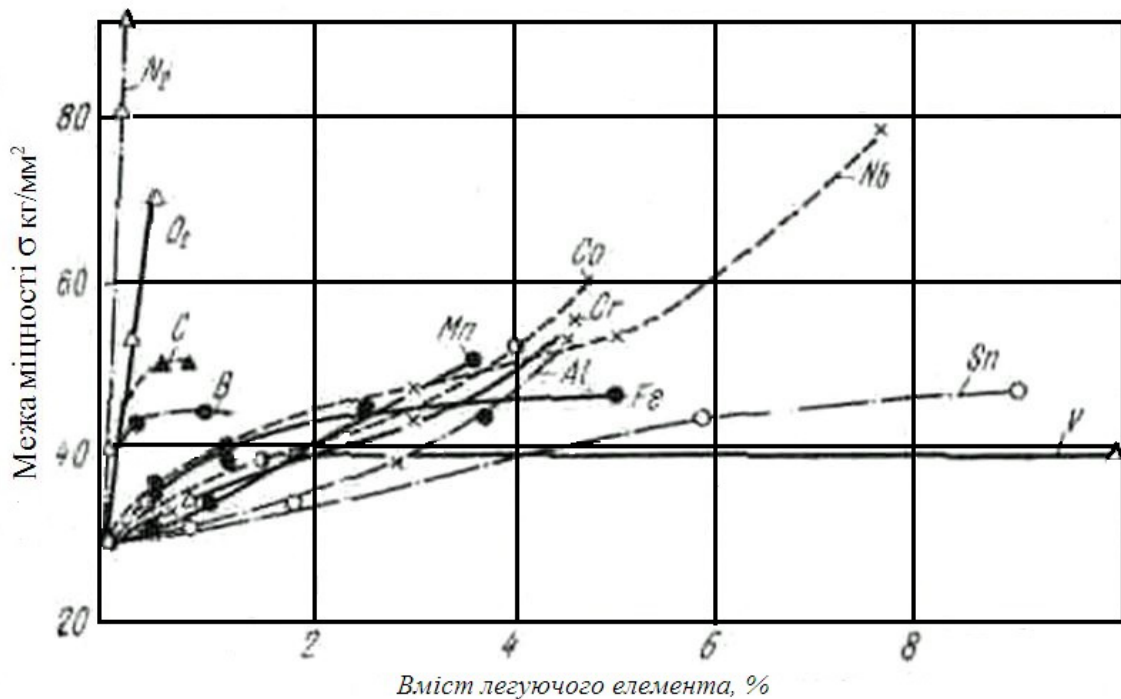


Рисунок 1.9 – Вплив легуючих елементів та домішок на межу міцності [24]

Молибден (Mo) -  $\beta$ -стабілізуючий ізоморфний легуючий елемент. Знижує температуру поліморфного перетворення титану, розширює сферу існування  $\beta$ -твердого розчину. Необмежено розчиняється в  $\beta$ -Ti. Підвищує характеристики міцності сплаву і жароміцність.

Цирконій (Zr) – нейтральний елемент. Мало впливає на температуру поліморфного перетворення. Розчиняється в  $\alpha$ - і  $\beta$ -фазах, сприяючи підвищенню міцності і жароміцності сплаву.

Структура та механічні властивості титанового сплаву залежать від неминуче присутніх у ньому домішок. Ці домішки поділяють на дві групи:

а) утворюють з титаном розчини впровадження (кисень, азот, вуглець, водень);

б) утворюють з титаном розчини заміщення (залізо та кремній).

Домішки застосування значно сильніше впливають властивості титану, ніж домішки, заміщення (див. рис. 1.9).

Кисень стабілізує  $\alpha$ -фазу і підвищує температуру поліморфного перетворення. Кисень добре розчиняється в силітані. Атоми кисню, що впроваджуються в октаедричні порожнечі решітки частинок титану, сильно спотворюють її, і тому кисень істотно підвищує межу міцності, межу плинності, і твердість. В області малих концентрацій [до 0,2%] кожна сота частка відсотка кисню підвищує межу прочитання та плинності титану приблизно на 1,25 МПа. Однак при досить високому вмісті кисню сплав стає настільки крихким, що відбувається падіння межі міцності та плинності. Кисень сильно знижує пластичні властивості титану в області малих концентрацій (до 0,1%), в інтервалі 0,1—0,5% порівняно мало впливає на пластичність, але при великих вмістах (більше 0,7%) титан повністю втрачає здатність до пластичного деформування.

Азот, як і кисень, стабілізує  $\alpha$ -фазу сильно підвищуючи температуру існування двофазної області ( $\alpha + \beta$ ). Максимальна розчинність азоту в  $\alpha$ -фазі становить 6,8%; зі зниженням температури розчинність азоту сильно зменшується. Азот зміцнює титан ще більшою мірою, ніж кисень (рис. 1.9). В області малих концентрацій (до 0,2%) кожна сота частка відсотка (за масою) азоту підвищує межу міцності та плинності титану в середньому на 2 МПа.

Пластичні властивості титану при введенні азоту зменшуються і при вмісті більше 0,2% (за масою) настає тендітна руйнація.

Підвищення міцності та твердості при введенні в титан кисню та азоту пояснюється спотворенням решітки через впровадження атомів цих елементів у міжвузля. Більша зміцнююча дія азоту пояснюється тим, що азот сильніше спотворює грати титану, ніж кисень, введений у тих же кількостях.

Кисень і азот сильно зменшують пластичність титану через зміцнення металу при розчиненні цих домішок і внаслідок різного їх впливу на параметри з ГПУ решітки  $\alpha$ -титану. При розчиненні кисню і азоту в титані параметр зростає досить сильно, а параметр дуже мало. У результаті співвідношення осей  $c/a$  збільшується і наближається до теоретичного значення 1,633, при якому титан втрачає свою перевагу в пластичності, яку має перед іншими металами з гексагональною структурою.

Титан утворює з вуглецем дуже стійкий карбід  $TiC$ , який плавиться за  $3140^{\circ}C$ . Розчинність вуглецю в  $\beta$ -фазі невелика, вона становить лише 0,8%. При зниженні температури розчинення вуглецю в  $\beta$ -фазі зменшується і при  $920^{\circ}C$  становить всього 0,15%.

Вуглець підвищує температуру поліморфного перетворення  $Ti_{\alpha} \leftrightarrow Ti_{\beta}$ , але цей ефект значно менший, ніж у системах титан—кисень та титан—азот. Розчинність вуглецю в  $\alpha$ -фазі порівняно невелика, вона становить 0,48% при температурі перитектоїдної реакції і різко зменшується зі зниженням температури. З цієї причини при вмісті більше 0,1% у структурі титану з'являються виділення карбідів.

Вуглець менше впливає на властивості титану, ніж кисень та азот. Міцності властивості титану підвищуються до 0,3%, після чого практично не залежать від вмісту вуглецю. У сфері малих концентрацій (до 0,3%) одна сота частка відсотка з підвищує межу міцності і межу плинності титану приблизно 0,7МПа, тобто, втричі менш інтенсивна, ніж азот. Якщо концентрація вуглецю перевищує межу розчинності, то значно знижується пластичність титану через виділення карбідів.

Водень розширює область  $\beta$ -фази та звужує область  $\alpha$ -фази. Розчинність водню в  $\alpha$ -титані досить велика (0,18%), але зі зниженням температури різко зменшується.

Водень — дуже шкідлива домішка у сплавах титану, оскільки він призводить до передчасного руйнування деталей. Він різко знижує ударну в'язкість титану навіть за дуже невеликих концентрацій (воднева крихкість).

Різде зниження ударної в'язкості пояснюється малою розчинністю водню в  $\alpha$ -титані при низьких температурах, в результаті чого в титані вже при дуже малих концентраціях водню утворюються вторинні виділення гідридів титану  $TiH_2$ . Гідриди виділяються переважно вздовж площин ковзання та двійникування.

Пластинчаста форма виділень гідридної фази та їх орієнтації всередині зерен є причиною значного зниження ударної в'язкості титану в присутності водню. Руйнування поширюється по поверхні розділу між гідридною фазою і матрицею. Гідридні пластинки є джерелом тріщин Гіффітса, які розвиваються при додатку напруги через слабе зчеплення між виділенням та основною фазою та внаслідок відмінностей у їх пружних та пластичних властивостях. Утворення та поширення тріщин, що виникають біля гідридів, полегшується внутрішніми розтягуючими напругами, які є у кінців гідридних виділень через більший питомий об'єм гідридів порівняно з основним металом.

Залізо стабілізує  $\beta$ -фазу ( $\beta$ -евтектоїдний елемент), різко знижуючи температуру існування  $\alpha+\beta$ -області. Залізо утворює з  $\alpha$ - та  $\beta$ -титаном тверді розчини заміщення. Максимальна вартість заліза в  $\alpha$ -титані складає менше 0,2%. Зі зниженням температури розчинення заліза зменшується і вже при температурі 500° С стає менше 0,01%. При температурі 590°С в системі Ti—Fe відбувається евтектоїдне перетворення  $\beta \leftrightarrow \alpha+TiFe$ , яке практично не реалізується через малу швидкість евтектоїдного розпаду.

Залізо значно менше впливає на механічні властивості титану, ніж домішки впровадження, проте найсильніший зміцнювач серед  $\beta$ -евтектоїдних елементів. Одна сота частка відсотка заліза в області малих концентрацій [до 0,5%] підвищує межу міцності та межу плинності титану приблизно на 0,2 МПа.

У системі титан—кремній утворюється кілька силіцидів, з яких найближчий за складом до титану  $Ti_5Si_3$ . Кремній знижує температуру поліморфного перетворення. Розчинність кремнію в  $\alpha$ -титані становить 0,45% при 860°С і близько 0,30% при 750°. Кремній впливає на механічні властивості титану приблизно так само, як залізо. Одна сота частка процента (за масою) кремнію в

області малих концентрацій (до 0,5%) підвищує межу міцності та межу плинності титану на 0,26 МПа.

У ряді випадків кремній навмисно вводять у титанові сплави як легуючі елементи, оскільки він суттєво підвищує їхню жароміцність.

Механічні властивості титанових сплавів наведено в таблицях 1.2 – 1.4

Таблиця 1.2. - Механічні властивості титанових сплавів (у відпаленому стані) [8]

Марка сплаву	$t_{\text{окспл}}$ , °C	К-кість годин	$\sigma_{\text{в}}$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta_5$ , %	$\psi$ , %
BT3-1	450	2000	$\geq 1000$	$\geq 930$	10	30( $\psi_5$ )
BT20	450	6000	$\geq 932$	$\geq 920$	10	30( $\psi_5$ )
BT8	450	6000	$\geq 1100$	$\geq 950$	12	54

Таблиця 1.3 - Механічні властивості сплавів BT3-1, BT20, BT8 при підвищених температурах [8]

Марка сплаву	$t$ , °C	$\sigma_{\text{в}}$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta_5$ , МПа	$\psi$ , МПа
BT3-1	400	800	630	15	55( $\psi_5$ )
	450	750	600	17	63( $\psi_5$ )
BT20	400	1110	985	18	43( $\psi_5$ )
	450	1045	915	14	38( $\psi_5$ )
BT8	400	820	650	12	54
	450	800	-	12	55

Таблиця 1.4 – Границі повзучості і тривалої міцності титанових сплавів [8]

Марка сплаву	$\sigma_{100}$ , МПа		$\sigma_{0,2/100}$ , МПа	
	450°C	500°C	450°	500°C
BT20	600	400	300	200
BT3-1	610	400	280	50
BT8	700	500	-	-

#### 1.4 Обґрунтування вибору матеріалу

Як видно з таблиць 1.1 – 1.4 сплав ВТ8 є оптимальним вибором для виготовлення лопаток компресора завдяки своїм відмінним механічним властивостям, високій термічній стійкості та стійкості до корозії. У порівнянні зі сплавами ВТ20 та ВТ3-1, ВТ8 забезпечує кращу загальну продуктивність та надійність в умовах високих температур і механічних навантажень, що робить його незамінним матеріалом для критично важливих компонентів компресорів.

Таблиця 1.5 – Питома міцність титанових сплавів [8]

Марка сплаву	t, °C	Питома міцність, МПа·см <sup>3</sup> /Г
ВТ20	450	133
	500	111
ВТ8	450	177,8
	500	166,7
ВТ3-1	450	166,7
	500	148,9

Серед титанових сплавів найкращі властивості мають сплави ВТ8 і ВТ3-1. Проте порівнюючи характеристики жароміцності найкращими властивостями володіє сплав ВТ8 (таблиця 1.3, рис. 1.10).

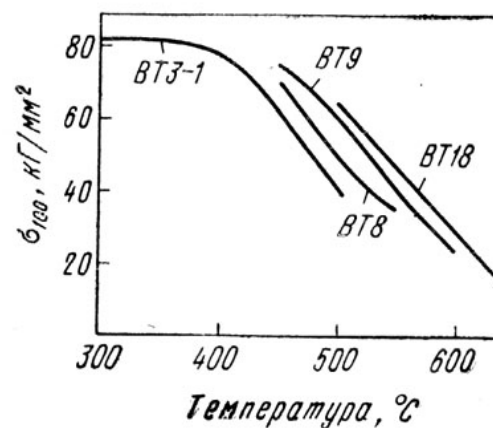


Рисунок 1.10 – Вплив температури на тривалу міцність титанових сплавів [8]

У нашому випадку, для лопаток першого рівня компресора застосовується титановий сплав ВТ-8 (див. таблицю 1.1).

## 1.5 Характеристика обраного матеріалу

Для виготовлення лопаток компресора обрано матеріал VT8. Цей сплав відносять до титанових ( $\alpha + \beta$ )-сплавів їх структура наведена на рисунку 1.11.

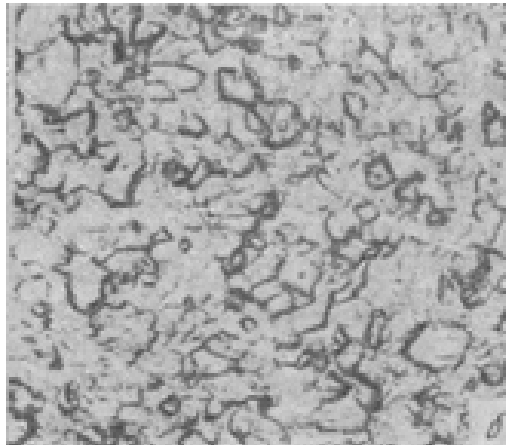


Рисунок 1.11 - Мікроструктура титанових ( $\alpha + \beta$ )- сплавів [16]

Розглянемо вплив компонентів на структуру та властивості матеріалу.

Легування, змінюючи області стабільного існування фаз, робить можливим існування при кімнатній температурі не лише  $\alpha$  але і  $\beta$  - фази. Кількість залишкової  $\beta$ -Фази збільшується відповідно до збільшення кількості легуючих елементів, що стабілізують  $\beta$ -фазу.

Забруднення титану домішками  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $Fe$ ,  $Cl_2$ ,  $Mg$ ,  $C$ ,  $Si$ ,  $Ni$ ,  $H_2$  навіть у невеликій кількості призводить до того що  $\alpha$ -Ті при  $\beta \rightarrow \alpha$  перетворенні в процесі повільного охолодження утворюється у формі пластин, по межах яких у вигляді дрібних частинок розташована друга фаза, яка являє собою  $\alpha$ -фазу іншого, ніж матриця, легування.

Молибден утворює із  $\beta$ -модифікацією титану безперервний ряд твердих розчинів при вмісті 11% підвищує  $\sigma_b$  при кімнатній і підвищених температурах, не утворює інтерметалідів.

Залізо та кремній обмежено розчиняються як у  $\beta$ - так і у  $\alpha$ -модифікаціях титану та при вмісті більшу за межу розчинності утворюють з титаном інтерметалідні сполуки. При охолодженні з  $\beta$ -області розпад  $\beta$ -твердого розчину на  $\alpha$  + інтерметаліди. Si у кількості (0,15 -0,35)% підвищує жаростійкість і жароміцність.

Алюміній переважно розчиняється в  $\alpha$ -фазі . Відбувається зниження густини ,підвищення питомої міцності, міцності ,жароміцності , зберігає достатньо велику пластичність та утворює інтерметалід  $Ti_3Al$ .

Цирконій вводять для підвищення жароміцності , міцності і водночас пластичності.

Особливістю двофазних сплавів є сильна залежність їх структури від швидкості охолодження після гарячої деформації. Це пов'язано з поліморфним перетворенням в результаті якого в процесі всього охолодження відбувається зміна кількісного співвідношення і складу фаз. Тому процес формування структури деформованих двофазних сплавів можливо розділити на два етапи: формування структури під впливом деформації і формування її в результаті охолодження після деформації.

При швидкому охолодженні перетворення сплавів проходить за мартенситним механізмом. Як ізоморфні, так і евтектоїдоутворюючі  $\beta$ -стабілізатори знижують температуру мартенситного перетворення у титані . На рисунку 1.12 наведена залежність температури мартенситного перетворення титанових сплавів від вмісту  $\beta$ -стабілізаторів.



Рисунок 1.12 – Залежність температури мартенситного перетворення титанових сплавів від вмісту  $\beta$ -стабілізаторів [16]

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

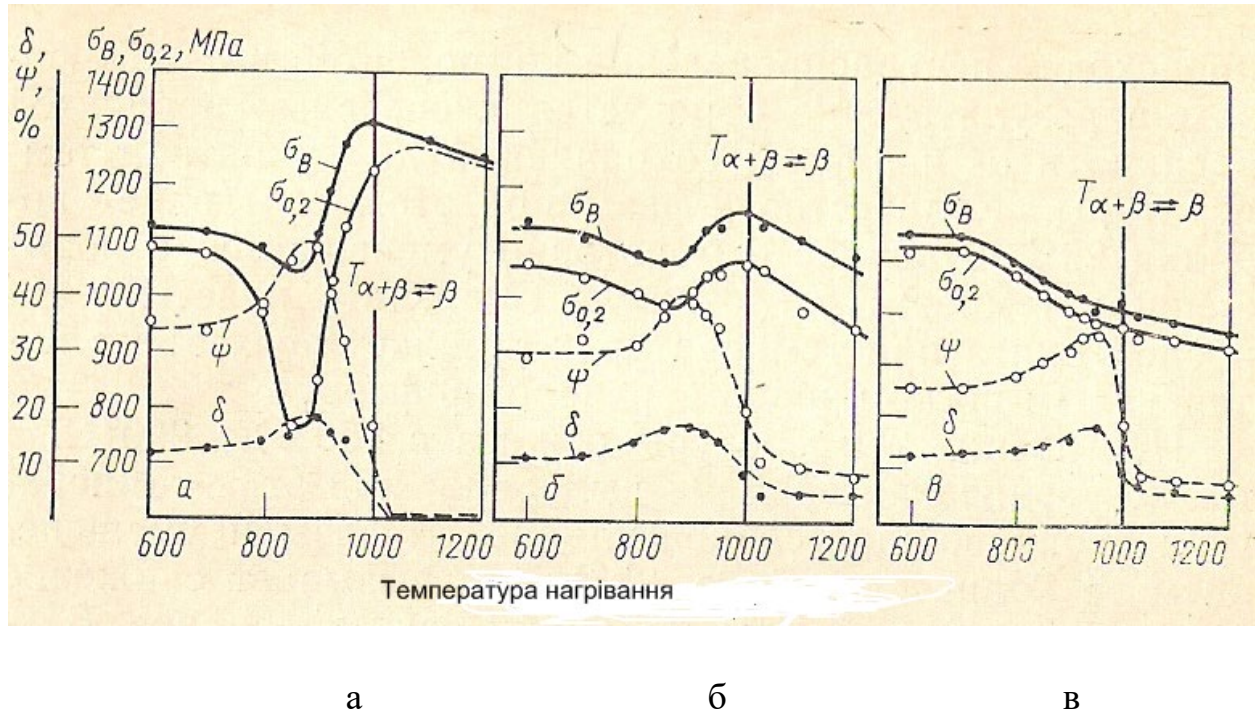
Деформований жароміцний титановий сплав ВТ9 системи Al-Ti-Mo-Zr-Si відносять до двофазних ( $\alpha + \beta$ )- сплавів мартенситного класу. Для напівфабрикатів використовують таку термічну обробку: подвійний відпал (нагрівання  $950-970^{\circ}\text{C}$ , витримка 1-4 години, охолодження на повітрі, потім нагрівання  $530^{\circ}\text{C}$ , витримка 6 годин, охолодження на повітрі). Сплав після відпалу при температурі  $750-850^{\circ}\text{C}$  з наступним охолодженням на повітрі містить 8-10%  $\beta$ - фази, решта  $\alpha$ - фаза. Наступний нагрів  $530^{\circ}\text{C}$  і витримка 6 годин майже не змінює характер мікроструктури сплаву.

Після відпалу при  $950^{\circ}\text{C}$  з охолодженням на повітрі кількість  $\beta$ - фази складає 9%.

Зміна швидкості охолодження після нагріву до  $950^{\circ}\text{C}$   $\beta$ - фази призводить до помітної зміни фазового складу. З підвищенням температури нагріву з 870 до  $950^{\circ}\text{C}$  спостерігається зменшення кількості  $\beta$ - фази і збільшення кількості  $\alpha$ '-

фази внаслідок перетворення  $\beta \rightarrow \alpha'$  в процесі охолодження, а після термічної обробки із  $\beta$ -області фіксуємо  $\alpha'$  фаза .

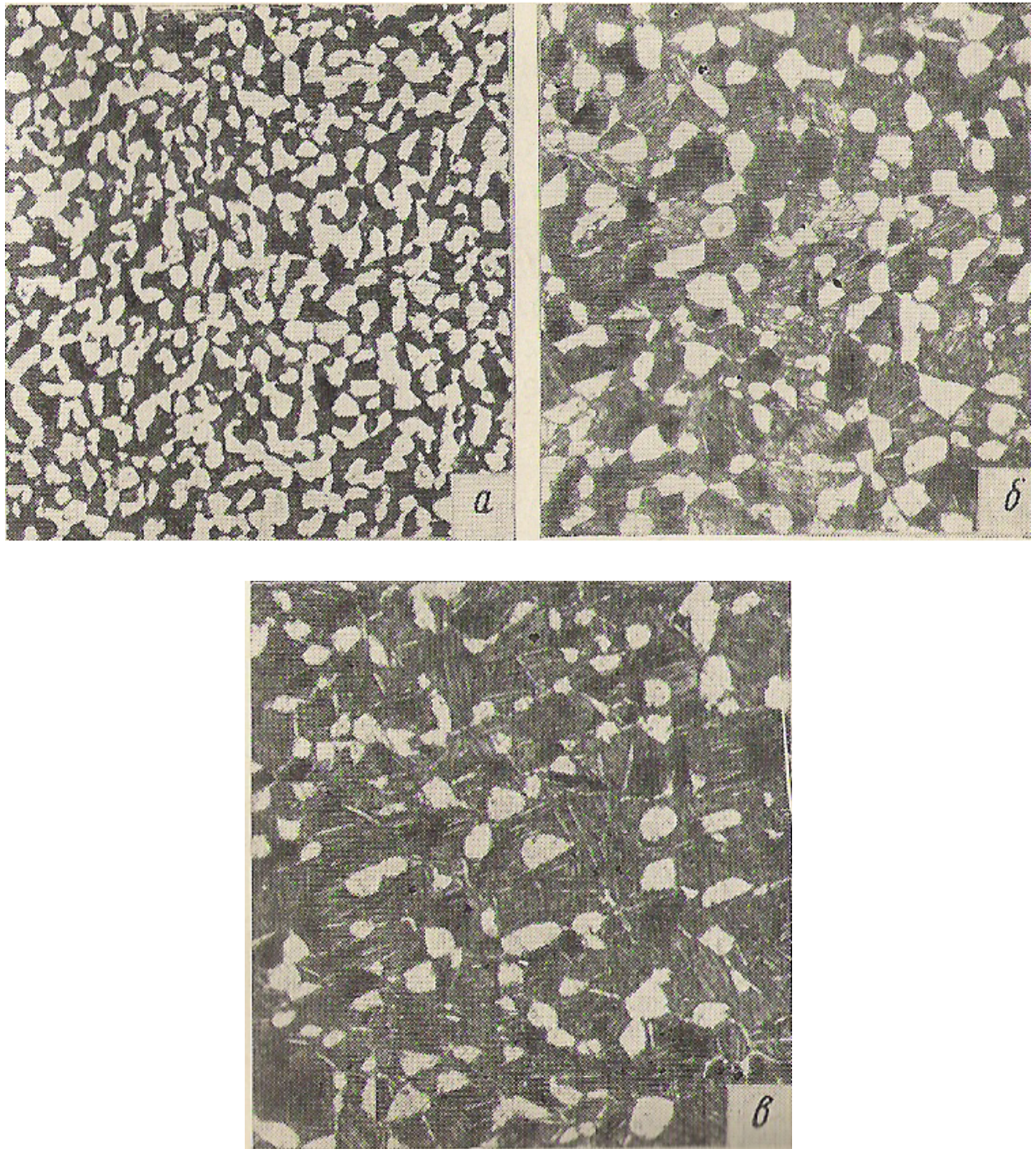
На рисунку 1.13 наведена залежність механічних властивостей сплаву від температури нагріву і швидкості охолодження.



а – охолодження у воді; б – охолодження на повітрі; в – охолодження в пічці

Рисунок 1.13 - Залежність механічних властивостей сплаву від температури нагріву і швидкості охолодження (а – охолодження у воді; б – охолодження на повітрі; в – охолодження в пічці) [16]

При підвищенні температури відпалу з 950 до 990<sup>0</sup>С ,а також зменшення часу витримки при цих температурах супроводжується коагуляцій  $\alpha$ - фази і зменшенням її кількості, що відповідає зниженню міцності і підвищенню ударної в'язкості сплаву ВТ9. На рисунку 1.14 наведено мікроструктуру сплаву в залежності від температури першого ступеня відпалу.



а – температура 950<sup>0</sup>С; б – температура 970<sup>0</sup>С; в – температура 990<sup>0</sup>С

Рисунок 1.14 -Мікроструктура сплаву в залежності від температури першого ступеня відпалу (а – температура 950<sup>0</sup>С; б – температура 970<sup>0</sup>С; в – температура 990<sup>0</sup>С) [16]

В оптичному мікроскопі не виявляється впливу додаткового нагріву при 530<sup>0</sup>С протягом 6 годин на зміну мікроструктури. Електронографічне

дослідження мікроструктури сплаву ВТ9 після подвійного відпалу в залежності від часу витримки при 530 °С показало, що в процесі нагріву при 530°С протягом 4-6 годин відбувається розпад  $\beta$  – фази і утворення більш дисперсних продуктів розпаду  $\alpha$  і  $\beta$  – фази.

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

Фазовий склад  $\alpha+\beta$ -сплавів, співвідношення та рівень дисперсності фаз, а отже, і комплекс фізико-механічних властивостей можуть істотно змінюватися залежно від режиму термообробки в температурному інтервалі двофазної області.

На рисунку 1.15 зображено діаграму ізотермічного перетворення сплаву ВТ8.

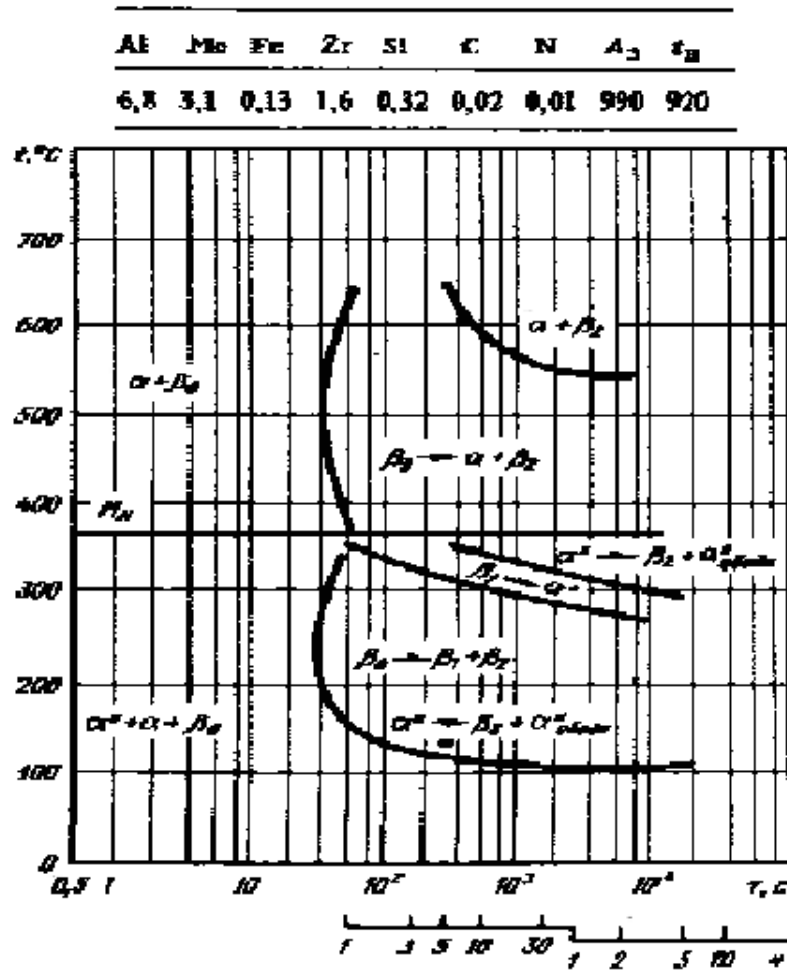


Рисунок 1.15 – Діаграма ізотермічного перетворення сплаву VT8 [8]

Використовуючи діаграму ізотермічного перетворення маємо структуру після першого відпалу  $\alpha + \beta + \beta_m$  (при охолодженні частково відбувається перетворення  $\beta \rightarrow \alpha$ ); при 2 відпалюванні відбувається перетворення  $\beta_m \rightarrow \alpha + \beta_{\text{стаб}}$ .

Перший відпал характеризується відсутність або необов'язковість фазових перетворень при його проведенні. Другий відпал заснований на фазових перетвореннях і тому роблять при температурах вище і нижче температури ( $\alpha \rightarrow \beta$ ) переходу.

## 2.МАРШРУТНА ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ВИРОБІВ

### 2.1 Номенклатура виробів

Для розробки технології термічної обробки виробів, вибору обладнання для виробничого підрозділу необхідно мати дані про форму, розміри, масу та основні вимоги до матеріалу. Ці дані наведені табл. 2.1

Таблиця 2.1.1 – Номенклатура виробів [22]

Назва виробу	Матеріал виробу	Маса виробу, кг	Розміри виробу, мм			Вимоги до матеріалу
			<i>l</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	
Лопатка1(права)	ВТ8	0,45	119	38	10	$KCU \geq 20 \text{ Дж/см}^2$ , $\sigma_B \geq 1000 \text{ МПа}$ , $\delta \geq 10\%$ , $\psi = 30\%$
Лопатка1(ліва)	ВТ8	0,45	119	38	10	$KCU \geq 20 \text{ Дж/см}^2$ , $\sigma_B \geq 1000 \text{ МПа}$ , $\delta \geq 10\%$ , $\psi = 30\%$
Лопатка2(права)	ВТ8	0,6	143	40	10	$KCU \geq 20 \text{ Дж/см}^2$ , $\sigma_B \geq 1000 \text{ МПа}$ , $\delta \geq 10\%$ , $\psi = 30\%$
Лопатка2(ліва)	ВТ8	0,6	143	40	10	$KCU \geq 20 \text{ Дж/см}^2$ , $\sigma_B \geq 1000 \text{ МПа}$ , $\delta \geq 10\%$ , $\psi = 30\%$

### 2.2 Маршрутна технологія виготовлення лопатки компресора

Маршрутна технологія являє собою рух заготовок по цехам та відділенням підприємства, в ній зазначають технологічні операції, які можуть повторюватися, але мати різні призначення, режими та забезпечувати зміну форми, розмірів, шорсткості поверхні, мікроструктури та властивостей.

Схема маршрутної технології виготовлення лопатки компресора наведена в табл. 2.2

Таблиця 2.2 – Схема маршрутної технології виготовлення лопатки компресора [23]

<b>№ опер.</b>	<b>Назва операції</b>	<b>Цех (дільниця), в якому виконується операція</b>	<b>Призначення операції</b>
1	Вхідний контроль	Заготівельна дільниця ковальсько-штампувального цеху	Контроль хімічного складу, механічних властивостей, макроструктури, мікроструктури, відсутність дефектів поковок
2	Порізка заготовок	Заготівельна дільниця ковальсько-штампувального цеху	Одержання мірних заготовок
3	Штамповка (гаряча)	Ковальсько-штампувальний цех	Отримання деталі з листового проката
4	Попередня механічна обробка	Механічний цех	Надання необхідної форми, розмірів, видалення газонасиченого шару
5	Додаткова термічна обробка	Термічне відділення механічного цеху	Гартування та старіння проводиться для отримання заданих механічних властивостей
6	Механічна обробка	Механічний цех	Правка, зачистка
7	Термічна обробка	Термічний цех	Отримання необхідної структури, що забезпечує задні властивості
8	Контроль	Лабораторія термічного відділення	Контроль розмірів, геометрії, структури, твердості, механічних властивостей, наявності поверхневих дефектів
9	Вихідний контроль	Контрольна дільниця механічного цеху	Контроль форми, розмірів, властивостей матеріалу

### 3. РОЗРОБКА РЕЖИМІВ І ТЕХНОЛОГІЙ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ

Технологія термічної обробки – складова частина технологічного процесу виготовлення металевого виробу, яка забезпечує отримання необхідної структури, механічних та експлуатаційних властивостей, якості цього виробу тощо.

Основні операції технологічного процесу:

До лопаток компресора було висунуто такі вимоги:

експлуатація – 5 тис. год.,  $T_{\text{експ}} \leq 500^\circ\text{C}$ ,  $\sigma_{\text{в}} = 1000 \text{ МПа}$ ,  $\delta = 10\%$ ,  $\psi = 30\%$ ,  $KCU \geq 20 \text{ Дж/см}^2$ ,  $\sigma_{-1} = 530 \text{ МПа}$ ,  $\sigma_{0,2/1000}^{450} = 235 \text{ МПа}$ ,  $\sigma_{1000}^{450} = 620 \text{ МПа}$ .

Термічна обробка лопатки зі сплаву ВТ8.

Задані властивості можна отримати за допомогою подвійного відпалу  $920\text{-}950^\circ\text{C}$ , витримка 1-4 год, повітря, підігрів  $570\text{-}600^\circ\text{C}$ , витримка 1 год, повітря.

Перший відпал проводиться при температурах нижче і вище температури рекристалізації і підрозділяється за цільовим призначенням і природі протікання процесів на зворот 1 та 2 роду. Зворот 1, або відпочинок, застосовують для зняття або зменшення залишкових напружень, що утворилися після механічної обробки гнучких зварних та інших технологічних операцій. Температура відпалу в цьому випадку призначають на  $150\text{-}200 \text{ C}$  нижче температури рекристалізації. Зворот 2 роду використовують для створення полігонізації структури після гарячої або холодної пластичної деформації. У процесі звороту 2 роду дислокації перерозподіляються і шикуються в стінки одна під одною. Кожна така стінка виконує роль малокутової границі. Зворот може відбуватися як при нагріванні деформованого металу, так і безпосередньо в ході гарячої деформації.

Другий відпал заснований на процесах фазових перетворень і використовуються для підвищення міцносних характеристик або поліпшення характеристик пластичності складнолегованих титанових сплавів.

До допоміжних операцій слід віднести операції, які не пов'язані зі зміною температури та структури, в даному випадку це можуть бути:

- очищення поверхні від окалини( машини, для промивання деталей);
- рихтування (механічна обробка ,наприклад для отримання відповідної шорсткості;
- видалення окалин, отримання необхідних розмірів);
- контрольні операції (проводяться для перевірки хімічного складу; властивостей; розмірів; структури за допомогою мікроскопу).

Розрахунок часу нагрівання

Для розрахунку загальної тривалості перебування виробів в печі (нагрівачому пристрої) користуються формулою [3]:

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

де  $\tau_{\text{техн}}$  – тривалість технологічної витримки хв.;

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

$\tau_{\text{в}}$  – час витримки для вирівнювання температури по поперечному перерізу ;

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

Для визначення часу нагріву ( $\tau_{\text{н}}$ ) можна використовувати методику приблизного розрахунку. Ця методика базується на тому, що садка металу складається з простих за формою виробів при нескладному їх розташуванні в один або декілька шарів із забезпеченням певних відстаней між виробами та без урахування негативного впливу нерухомих прошарків нагрівального середовища. Тоді тривалість нагрівання визначається за формулою [3]:

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

Основні значення для розрахунку:

$S$  – характеристичний розмір виробу, мм ( $19/2=9,5$  мм);

$k$  – коефіцієнт форми;

$f$  – коефіцієнт розташування виробів у нагрівальному пристрої, який впливає на тривалість нагрівання;

$L_{л}$  – коефіцієнт легування сталі, хв/мм.

$L_{спл}$  розраховується за формулами [3]:

$$L_{ст} \cdot \lambda_{ст} / c_{ст} = L_{спл} \cdot \lambda_{спл} / c_{спл} \quad (3.3)$$

$$L_{спл} = L_{ст} (c_{спл} \cdot \lambda_{ст} / c_{ст} \cdot \lambda_{спл}) \quad (2) \quad (3.4)$$

Де  $c$  – теплоємність, кДж/(кгК)

$\lambda$  – теплопровідність, Вт/(мК)

$$L_{спл} = L_{ст} c_{спл} \cdot \lambda_{ст} / c_{ст} \cdot \lambda_{спл} = 0,96(0,98 \cdot 29,3 / 0,670 \cdot 21,3) = 1,93$$

Розрахуємо необхідний час для нагрівання:

$$\tau_{н} = S \cdot k \cdot f \cdot L_{л} = 6,47 \cdot 2,0 \cdot 2,0 \cdot 1,93 = 49,94 \text{ хв.}$$

Час витримки при нагрівання  $\tau_{в}$ , хв., при заданій температурі можна вважати таким що дорівнює часу, який отримується із розрахунку 1,5...2хв/мм умовного перетину, за умови їх нагрівання в електричних пристроях . Час витримки відомий, за довідником [27]

$\tau_{в}$  - час витримки при нагрівання,  $\tau_{в} = 240$ хв.

Охолодження після відпалу проводиться на повітрі, і буде відбуватися протягом:

$$\tau_{ох} = (950 - 20) / 5^{0C} / c = 186 \text{ хв.}$$

Таким чином загальний час, що було затрачено:

$$\tau_{\text{заг}}=49,94+ 240+186=475,94\text{хв.}$$

Розрахуємо час, що було витрачено на другий нагрів до температури 570-600°C:

$$L_{\text{Л}}=2,15(0,816*27,2/16,3*0,77)=3,8$$

$$\tau_{\text{н}} = S*k*f*L_{\text{Л}} =6,47*2,0*2,0*3,8=98,34\text{хв.}$$

Час витримки при нагрівання тв, хв., при заданій температурі можна вважати таким що дорівнює часу витримки відомого за довідником [27]

$$\tau_{\text{в}} = 300\text{хв.}$$

Охолодження після відпалу проводиться на повітрі, і буде відбуватися протягом:

$$\tau_{\text{ох}} = (600-20)/5^{0\text{C}}/\text{c}=116\text{хв.}$$

Таким чином загальний час, що було затрачено:

$$\tau_{\text{заг}} =116+300+ 98,34=514,34\text{хв.}$$

Графік термічної обробки наведено на рис. 3.1.

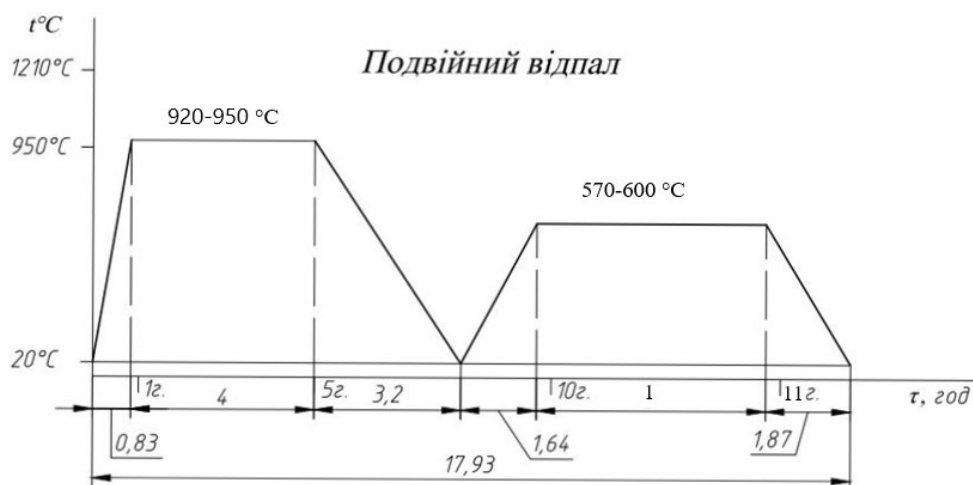


Рисунок 3.1 - Графік термічної обробки робочої лопатки зі сплаву ВТ8

Таблиця 3.1 - Технологічна карта процесу [23]

Ескіз виробу	Технічні умови		
	Марка сплаву	Властивості	Структура
	ВТ8	експлуатація – 5 тис. год., $T_{\text{експ}} \leq 500^{\circ}\text{C}$ , $\sigma_{\text{в}} = 1000$ МПа, $\delta = 10\%$ , $\psi = 30\%$ , $KCU \geq 20 \text{ Дж/см}^2$ , $\sigma_{-1} = 530$ МПа, $\sigma^{450}_{0,2/1000} = 235$ МПа, $\sigma^{450}_{1000} = 620$ МПа.	$\alpha + \beta$

Продовження табл. 3.1

№	Назва операції	Обладнання	Режим нагрівання: t, τ, середовище та його витрати.	Режим охолодження: середовище, його тиск, температура; склад; витрати; тривалість, хв.	Назва пристосування кількість, шт.	Умови обробки та контролю
1	Вхідний контроль	Стилоскоп, штангенциркуль, мікрометр.				Хімічний склад, розміри, відсутність поверхневих дефектів гострих країв.
2	Перший відпал					
2.1	Нагрівання	СНЗ - 8.16.5/10	tп=20°C; tк=980±5°C ;Захисне середовище - аргон τн=49,94хв		Піддон 91шт	Температура нагрівання ,тривалість нагрівання, кількість виробів в садці, середовище.

Продовження табл. 3.1

2.2	Витримка	СНЗ - 8.16.5/10	Тв=980±5° С; тв=240хв; Захисне середовище - азот;		91	Температура, тривалість витримки, кількість виробів, маса садки, середовище.
2.3	Охолодження	Стіл		Voх=5°С/ с до t=20°С. тох=192х в. повітря;		Температура початкова кінцева тривалість та швидкість охолодження.
3	Контроль	ТШ, металографічний мікроскоп МІМ-7				Контроль твердості та номера зерна, кількості β-фази
4	Другий відпал					
4.1	Нагрівання	СНЗ - 8.16.5/10	Тп=20°С; Тк=580±5° С; Захисне середовище - азот; тн=98,34хв		91	Температура нагрівання тривалість нагрівання, кількість виробів всадці, середовище.
4.2	Витримка	СНЗ - 8.16.5/10	Тв=580°С; тв=300хв; Захисне середовище - азот;		91	Температура, тривалість витримки, кількість виробів, маса садки, середовище.

Продовження табл. 3.1

4.3	Охолодження	Стіл		$V_{ох}=5-^{\circ}C/хв$ до $t=20^{\circ}C$ . $t_{ох}=112х$ в; повітря		Температура початкова та кінцева, тривалість та швидкість охолодження.
5	Контроль вихідний	ТШ, металографічний мікроскоп МІМ-7				Контролюються: структура, $T_{експ} \leq 500^{\circ}C$ , $\sigma_b = 1000$ МПа, $\delta_5 = 10\%$ , $\psi_5 = 30\%$ , КСУ=300 кДж/м <sup>2</sup> , $\sigma_{-1} = 520$ МПа, $\sigma^{450}_{0,2/1000} = 400$ МПа, $\sigma^{450}_{1000} = 670$ МПа..

Розробимо схему садки. Садка – це сукупність виробів, які одночасно перебувають в печі. Вироби розташовуються в садці регулярно на певній відстані один від одного. В даний тип печей вироби завантажуються на піддонах. Розміри лопаті становлять: висота (h) – 10мм, ширина (b) – 38мм, довжина (l) – 119мм. Маса однієї лопатки – 0,6 кг.

Розрахуємо кількість виробів, що розташуватимуться по ширині робочого простору [3] :

$$n_{ш} = Ш / (b + b/2) = 800 / (40+40/2) = 13 \text{ виробів} \quad (3.6)$$



та по довжині:

$$n_{\partial} = D / (1 + l/2) = 1600 / (143 + 143/2) = 7 \text{ виробів} \quad (3.7)$$

Таким чином, на кожному піддоні розташовується 13 виробів по ширині, з відстанню між виробами рівною половині ширини деталі, а по довжині розташовується 7 виробів, з відстанню між ними рівною половині довжини деталі.

Загальна кількість:

$$n_{\Pi} = n_{\text{ш}} \cdot n_{\text{Д}} = 13 \cdot 7 = 91 \quad (3.8)$$

Тобто на кожному ярусі буде розташовано 91 лопатка компресора.

Згідно зі схемою в першому ярусі розташовують 91 виріб. Кількість ярусів:

$$N_{\text{я}} = H / (h + h/2) = 500 / (10 + 10/2) = 33 \text{ яруси} \quad (3.9)$$

Таким чином в печі розміщується 33 яруси і тоді одночасно в печі будуть оброблятися вироби, кількість яких можна розрахувати за наступною формулою [3]:

$$n_{\text{заг}} = n_{\Pi} \cdot N_{\text{я}} = 91 \cdot 33 = 3003 \text{ шт} \quad (3.10)$$

Визначимо масу садки:

$$M_{\text{с}} = n_{\text{заг}} \cdot M_{\text{Д}} = 3003 \cdot 0,6 = 1800 \text{ кг} \quad (3.11)$$

## 4. ТЕХНІЧНИЙ КОНТРОЛЬ, ПОПЕРЕДЖЕННЯ ТА ВИПРАВЛЕННЯ БРАКУ

Якість продукції формується в процесі усього циклу виробництва і в зв'язку з цим виникає необхідність в управлінні якістю.

Таким чином, контроль якості термічної обробки є важливим засобом вдосконалення технологічного процесу.

Відповідно до ГОСТ7342-79 технічним контролем називається перевірка відповідності процесі, що визначають якість продукції і їх результатів технічним вимогам. Таким чином, об'єктом контролю є початкові матеріали, технологічні процеси термічної обробки, а також якість готової продукції. Контроль має бути систематичним, досить точним і надійним.

Брак при термічній обробці може стати наслідком наявності в готових виробах або напівфабрикатах дефектів чисто металургійного походження (волосовина, усадкова раковина, надмірна ліквация), дефектів гарячої або холодної пластичної деформації і, нарешті, наслідком порушення діючої технології термічної обробки.

Якість термічної обробки може характеризуватися мікроструктурою металу, механічними, фізичними, технологічними і іншими спеціальними властивостями.

Контроль здійснюється відповідно до технічних умов (ТУ), в яких перераховані об'єкти, що підлягають перевірці, контрольовані характеристики і методичні засоби контролю, відсоток контролю від партії, садки, розкид, що допускається, у властивостях, а також відповідно до ГОСТу. Контроль може бути вибіркоvim і стовідсотковим.

У багатьох випадках великий вплив на експлуатаційну стійкість готових виробів робить стан поверхні, наявність шорсткості. Поверхневі дефекти значною мірою знижують довговічність виробів, що піддаються в процесі експлуатації знакозмінним навантаженням. Усе це, природно, вимагає дуже ретельного контролю стану поверхні.

Основною умовою відвертання браку при термічній обробці є суворе дотримання технологічного процесу, який повинен встановлюватися на підставі досвідчених і літературних даних.

Контроль якості диску компресора з титанового сплаву та робочої лопатки турбіни із жароміцного сплаву проводиться таким чином:

- після проведення повного циклу термічної обробки проводиться вимір твердості;
- термооброблені і витончені піддаються ультразвуковому контролю;
- механічні і жароміцні властивості перевіряються на зразках, які вирізані в тангенціальному напрямі на 100 %;
- після механічної обробки лопатки піддаються контролю геометрії, контролю методом кольорової дефектоскопії.

Види браку робочої лопатки зі сплаву ВТ8 причини і способи попередження приведені в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 -Дефекти робочої лопатки зі сплаву ВТ8 [23]

Назва операції	Вид дефекту	Причини виникнення	Заходи щодо запобігання	Заходи по усуненню
1	2	3	4	5
Відпал	1.Тріщина	1.1.неметалеві включення, та інші концентратори напружень. 1.2.завищена швидкість нагрівання. 1.3.завищена температура нагрівання.	1.1.вилучення неметалевих включень додатковою обробкою (переплав). 1.2,.3.нагрівання з регламентованою швидкістю та температуру нагрівання.	Дефект не виправий.

Продовження табл. 3.2

1	2	3	4	5
	2. Невідповідні розміри	2.1 Не якісне штампування 2.2 Зміна розмірів в процесі ТО	2.1 Контроль розмірів 2.2 Дотримання заданих температури та часу нагрівання.	2.1 Рихтування, механічне оброблення
	3. Крупне зерно.	3.1. Перегрів.	3.1. дотриманні заданих температури та часу нагрівання.	3.1. Повторна термічна обробка.
	4. Короблення. 5. Не відповідна структура	4.1. Нераціональне розташування виробів в садці. 5.1 Перегрів або не достатня температура нагріву 5.2 невідповідний сплав за хім. складом	4.1. Дотримання схеми садки при її формуванні. 5.1 Дотримання заданих температур 5.2 Проведення контролю	4.1. Рихтування, або механічне оброблення. 5.1 повторне термічне оброблення 5.2 Не виправний дефект

## 5. БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ФАХІВЦЯ ТА ОХОРОНА ПРАЦІ

В розділі надані основні заходи з охорони праці при відпрацюванні технології термічної обробки лопаток компресора із титанових сплавів.

### 5.1 Аналіз потенційних небезпек

а) Вимог щодо організації та забезпечення безпеки на робочих місцях, що може бути пов'язано з не проведенням організаційних заходів щодо навчання та перевірки знань з охорони праці, інструктажів, не наданням інформації про можливі небезпеки;

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

в) Можливість отримання механічних травм при підготовці зразків для подальшого відпрацювання режимів термічної обробки, що може бути пов'язано з порушеннями правил охорони праці під час роботи з абразивним інструментом;

г) Небезпеки, які пов'язані з використанням балонів для зберігання захисних газів під тиском, зокрема: порушень правил зберігання, переміщення та експлуатації балонів під тиском, що може призвести до вибухів та великомасштабних руйнувань;

г) Небезпеки, які пов'язані з безпосереднім термічним обробленням дослідницьких виробів, випробуванням зразків або виробів;

д) Небезпеки які пов'язані з дослідженням структури металу методом оптичної металографії з використанням оптичних мікроскопів зокрема: ушкодження органів зору при хибній комбінації світлофільтрів, об'єктивів та окулярів;

е) Незадовільні параметри мікроклімату які повинні відповідати фізіологічним потребам організму працюючих, із врахуванням енергетичних витрат на виконувану роботу згідно з ДСН 3.3.6.042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень» внаслідок неефективної роботи систем опалення та повітрообміну, що може призвести до загальних захворювань;

є) Можливість загоряння внаслідок порушень правил пожежної безпеки, які зазначені в НАПБ А.01.001-2014 «Правила пожежної безпеки в Україні», а саме хибне визначення видів та кількості первинних засобів пожежогасіння відносно категорій приміщень с пожежної безпеки, що може привести до пожежі.

## 5.2 Заходи забезпечення безпеки

а) Усі працівники повинні пройти навчання та перевірку знань з питань охорони праці відповідно до «Типового положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці», затвердженого наказом

Держнагляддохоронпраці (Держпраці) від 26.01.2005 №15рРоботодавець повинен забезпечити повну і вичерпну інформацію працівників з питань охорони праці як відносно підприємства в цілому так і відносно специфіки виконуваних робіт на робочих місцях, де зазначені можливі небезпечні ситуації та заходи для їх запобігання. Найбільш ефективним є проведення відповідних інструктажів (вступний, первинний, повторний, позаплановий та цільовий);

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

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

До основних заходів захисту людини від ураження електричним струмом, відносять:

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

в) Для уникнення механічних травм при виготовленні зразків необхідно працювати на справному станку, своєчасно проводити заміну деталей, термін експлуатації яких вже закінчився та використовувати захисні окуляри та рукавиці; для виключення травмування органів зору передбачено застосування захисних окулярів, які служать для захисту очей від ушкоджень частками твердих тіл, що

летять попереду, знизу і збоку. Ці окуляри оснащені фігурними боковинами, що відкидаються. Застосовувати прозорий екран для захисту очей робітника від поранень частками, що відлітають.

Заходи безпеки при роботі на шліфувальних і заточувальних верстатах: - 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 робочої 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;

- заборонено працювати без підручника, захисного екрана або окулярів.

- заборонено працювати, якщо верстат не заземлений і не обладнаний установкою для відсмоктування абразивного пилу згідно ГОСТ 12.3.028–82 «Процес обробки абразивними и ельборовим інструментом»;

г) Періодична перевірка знань робітників, які обслуговують балони, проводиться не рідше 1 разу в 12 місяців. Позапланова перевірка знань проводиться:

- при переході на інше підприємство;

- в разі внесення змін в інструкцію по режиму та безпечному обслуговуванню балонів;

- на вимогу інспектора Держнаглядохоронпраці або відповідального по нагляду за технічним станом та експлуатацією балонів.

У разі перерви в роботі по обслуговуванню балонів понад 12 місяців робітник після перевірки знань повинен перед допуском до самостійної роботи пройти стажування.

Допуск до самостійного обслуговування балонів оформляється наказом по підприємству.

Інструкція з безпечного обслуговування балонів повинна бути видана на руки під розписку або вивішена на робочому місці.

Робітник, який обслуговує балони повинен:

- виконувати правила внутрішнього трудового розпорядку.
- пам'ятати про особисту відповідальність за виконання правил охорони праці та безпеку товаришів по роботі.
- вміти надавати першу медичну допомогу потерпілим від нещасних випадків.
- вміти користуватись первинними засобами пожежогасіння.
- утримувати робоче місце в чистоті і порядку.
- дотримуватись правил експлуатації, транспортування та зберігання балонів.

Балони повинні мати вентиля, щільно вкручені в отвори горловини або у витратно-наповнювані штуцери у спеціальних балонів, що не мають горловини.

Балони для стиснених, зріджених і розчинених газів повинні бути забезпечені паспортом.

Бокові штуцери вентилів для балонів, які наповнюються воднем та іншими горючими газами, повинні мати ліву різьбу; а для балонів, які наповнюються киснем та іншими негорючими газами - праву різьбу.

Кожний вентиль балонів для вибухонебезпечних горючих речовин, шкідливих речовин 1 і 2-го класів небезпеки повинен бути забезпечений заглушкою, яка накручується на боковий штуцер.

Вентилі в балонах для кисню повинні вкручуватись із застосуванням ущільнювальних матеріалів, загоряння яких в середовищі кисню виключається.

Отруєння робочими газами при ТО може виникнути при будь-якій розгерметизації. Найбільш небезпечним є аміак. Балон з аміаком не мають підп'ятника, тому зберігання повинно бути тільки в аміачній рампі, яка має ємність з водою, і при необхідності балони можуть бути скинуті в воду.

Для запобігання вибуху – газової суміші при операції нітроцементзації та цементзації.

Подача робочих газів в ендогенераторі, при температурі не нижче температури безпеки ( $950^{\circ}\text{C}$ ), подача насичувальних газів в реторту печі не нижче ( $750^{\circ}\text{C}$ ), подача керосину в реторту печі повинно відбуватися після продувки реторти азотом, для видалення залишків повітря;

д) При визначенні типу структури використовується горизонтальний металографічний мікроскоп МИМ-8, призначений для дослідження мікроструктури металів та інших не прозорих об'єктів в світловому полі при прямому і відбитому освітленні, а також в темному полі і в поляризованому світлі. Для візуального спостереження об'єктів мікроскоп забезпечений монокулярною і бінокулярною насадками. Власне збільшення бінокулярної насадки – 2,5 х. Освітлення здійснюється від електролампи розжарювання потужністю 170 Вт, 17 В, живиться від освітлювальної мережі 220 В через понижуючий трансформатор, забезпечений секційним перемикачем для регулювання яскравості напруження лампи. Правильне використання мікроскопа виходить тільки за умови раціональної комбінації об'єктивів, окулярів. При вживанні їх треба враховувати, що збільшення повинно знаходитися в межах від 500 до 1000 апертур. Крім правильної комбінації об'єктивів і окулярів, не менш важливе значення має і правильне застосування світлофільтрів. Як правило, при роботі з об'єктивами-ахроматами слід застосовувати світлофільтри, а з апохроматами можна працювати і без них. Об'єктиви-ахромати мають корекцію тільки для середніх кольорів видимої частини спектра, з цієї причини при білому світлі вони дають зображення з не чіткими контурами, пофарбованими головним чином по краю поля зору. Щоб погасити всі кольори, в яких об'єкт не має корекції, застосовують жовто-зелений світлофільтр. З огляду на те, що об'єктиви-

апохромати мають корекцію майже для всіх кольорів видимої частини спектра, жовто-зелені світлофільтри для них зайві;

е) Заходи з виробничої санітарії і гігієни праці визначаються відповідно до вимог Державних санітарних норм і правил «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу», зареєстрованих МЮ України 06.05.2014 р. за № 472/25249, з урахуванням виявлених, в процесі аналізу потенційних небезпек, небезпечних і шкідливих виробничих факторів. Санітарний клас виробництва і розміри його санітарно-захисної зони визначаються з урахуванням наявних шкідливих виробничих факторів, згідно вимог ДСП 173-96 «Державні санітарні правила планування та забудови населених пунктів». Параметри мікроклімату і чистоти повітря визначають згідно вимог ДСН 3.3.6-042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень», в залежності від категорії фізичних робіт, для певних робочих місць (постійних і непостійних). Постійне робоче місце – це місце, на якому працюючий знаходиться понад 50% робочого часу або більше 2-х годин безперервно. Якщо при цьому робота здійснюється в різних пунктах робочої зони, то постійним робочим місцем вважається вся ця зона. Непостійне робоче місце – це місце, на якому працюючий знаходиться менше 50% робочого часу або менше 2-х годин безперервно. Необхідно враховувати, що:

- для постійних робочих місць визначаються оптимальні та допустимі параметри мікроклімату в холодний та теплий період року;

- для непостійних робочих місць визначаються тільки допустимі параметри мікроклімату в холодний та теплий період року.

- в холодний період року на постійних робочих місцях: температура оптимальна 18-20 С, допустима 17-23 С; відносна вологість: оптимальна 40-60 %, допустима 75 %; швидкість переміщення повітря: оптимальна не більше 0,2 м/с, допустима не більше 0,3 м/с;

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

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

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

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

є) Заходи з пожежної безпеки визначаються відповідно до вимог НАПБ А.01.001-2014 «Правила пожежної безпеки в Україні». Категорію виробництва за пожежною небезпекою (А, Б, В, Г, Д) споруд (приміщень) цеху (ділянки, підстанції) визначають на основі аналізу речовин і матеріалів, що використовуються у виробництві, відповідно до вимог ДСТУ Б В.1.1-36:2016 «Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою» і БНіП 2.09.02-85\* «Виробничі будівлі». Відповідно до категорії виробництва з пожежної небезпеки та вимогами ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги», визначають ступінь вогнестійкості приміщення цеху (дільниці, підстанції).

Шляхи евакуації працівників на випадок пожежі (переходи, евакуаційні виходи) передбачають згідно вимог ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги». Максимальну відстань від найбільш віддаленого робочого місця до найближчого евакуаційного виходу визначають згідно п. 2.29 БНіП 2.09.02-85\* «Виробничі будівлі». Відповідність обладнання, силових і освітлювальних мереж вимогам пожежної безпеки в першу чергу залежить від

відповідності ступеня захисту їх оболонок (IP) класу пожежонебезпечної зони (П-I, П-II, П-IIIа и П-III) визначених згідно НПАОП 40.1-1.32-01 «Правила будови електроустановок.

Електрообладнання спеціальних установок». Засоби виявлення займань та пожеж передбачаються згідно вимог ДБН В.2.5-56:2014 «Системи протипожежного захисту».

В даний час можуть використовуватися:

- охоронно-пожежна сигналізація (ОПС) неадресного типу;
- порогова охоронно-пожежна сигналізація;
- адресно-порогова охоронно-пожежна сигналізація.

## **6. СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА.**

### **ПІДВИЩЕННЯ МІЦНОСТІ ТИТАНОВОГО СПЛАВУ ЛЕГУВАННЯМ**

Підвищення жароміцності і ресурсу деталей двигунів – одна з найважливіших проблем, для успішного вирішення якої необхідно постійне підвищення їх якості і удосконалення технології виготовлення деталей. Для підвищення ресурсу лопаток компресору необхідно знати величини тривалої міцності, повзучості і втоми матеріалів для відповідних робочих температур і терміну їх служби. З плином часу, як відомо, міцність лопаток, що працюють під навантаженням при підвищених температурах, знижується, а отже знижується і запас їх міцності. Чим вище температура експлуатації лопаток, тим швидше зменшується тривала міцність, а отже і запас міцності.

Поліпшення методів термічної обробки титанових лопаток дозволяє отримувати вироби з мінімальними залишковими напруженнями, є важливим фактором у підвищенні їх ресурсу.

#### **6.1 Стабілізуюча термічна обробка титанових сплавів**

Стабілізуючий відпал широко застосовується для лопаток компресора метою зняття напружень, що виникають на поверхні деталей при механічній обробці. Цей відпал проводять на готових деталях при температурах, близьких до експлуатаційних. Стабілізуючий відпал проводили в вакуумі при 550 ° С протягом 2 годин і вивчали його вплив на тривалу і втомну міцність сплавів VT3-1, VT8. Було встановлено, що стабілізуючий відпал не впливає на властивості сплаву VT3-1. Витривалість сплаву VT8 після стабілізуючого відпалу підвищується на 7 - 15%. Тривала міцність цих сплавів не змінюється. Оскільки механічну обробку

лопаток компресорів з титанових сплавів, на фінішних операціях проводять вручну, на поверхні лопаток виникають напруги, різні за знаком і величиною. Тому рекомендується всі лопатки піддавати стабілізуючому відпалу. Відпал проводять при температурах 530 - 600 ° С. Стабілізуючий відпал забезпечує підвищення витривалості лопаток з титанових сплавів не менше ніж на 10 - 20% .

## 6.2 Фазові перетворення в титанових сплавах після гартування і старіння

Гартуванням і старінням зміцнюються двофазні ( $\alpha+\beta$ )- титанові сплави.

Схема утворення структур при гартуванні і старінні показана на рис. 6.1

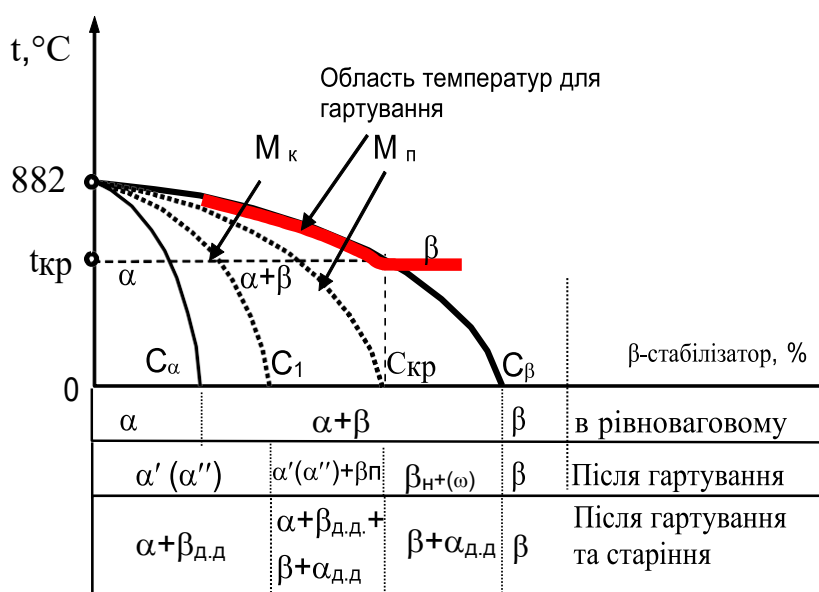


Рисунок 6.1-Загальна діаграма стану «Ті -  $\beta$ -стабілізуючі легувальні елементи» і схема утворення структур при гартуванні і старінні титанових сплавів [28]

При гартуванні з  $\beta$ -області в ряді сплавів буде протікати мартенситне перетворення. На діаграмі рис. 6.1 нанесені лінії початку ( $M_{п}$ ) і кінця ( $M_{к}$ ) мартенситного перетворення.

У сплавах з відносно невеликою концентрацією легувальних елементів під час гартування відбувається мартенситне перетворення  $\beta \rightarrow \alpha$  зсувного типу.

Титановий мартенсит  $\alpha'$  є пересичений твердий розчин  $\beta$ -стабілізуючих легуючих елементів в  $\alpha$ -титані. Кристалічна ґратка у нього гексагональна щільнопакована, напружена. Мартенситна  $\alpha'$  фаза не володіє високою твердістю і міцністю, однак її твердість і міцність тим більше, чим вище ступінь пересичення  $\alpha'$ -твердого розчину легувальним елементом. Під мікроскопом ця структура голчата рис. 6.2.

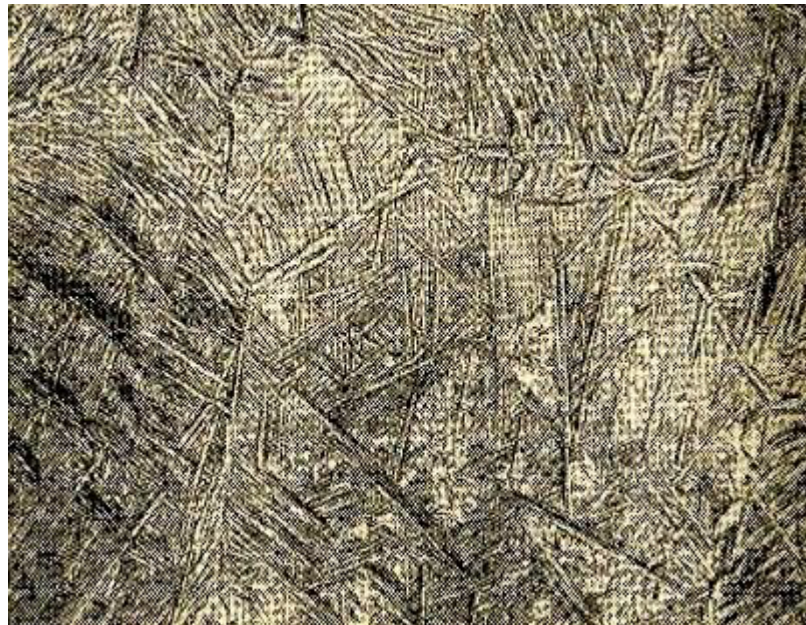


Рисунок 6.2- Титановий мартенсит  $\alpha'$  ( $\alpha''$ ) [28]

Зі збільшенням вмісту  $\beta$ -стабілізуючого елемента при гартуванні можливе утворення  $\alpha''$ -фази, що представляє собою теж пересичений твердий розчин на основі титану. Але спотворена кристалічна ґратка цієї фази швидше ромбічна, ніж гексагональна. Ромбічну  $\alpha''$ -фазу можна розглядати як проміжну між структурами з об'ємноцентрованої і гексагональної ґратками. Сплави титану, які містять тільки таку структуру, володіють помірною міцністю і підвищеною пластичністю, близькою до  $\beta$ -фази.

Оскільки обидві ці фази нероздільні, то в загальному випадку титановий мартенсит позначають  $\alpha'(\alpha'')$ . Він утворюється при гартуванні сплавів з концентрацією легувальних елементів до точки  $C_1$ , так як рис 6.1 в цих сплавах при гартуванні мартенситне перетворення протікає повністю. В сплавах з концентрацією легувальних елементів від  $C_1$  до  $C_{кр}$  при гартуванні мартенситне перетворення починається на лінії  $M_n$ , але не протікає повністю. В результаті утворюється титановий мартенсит  $\alpha'(\alpha'')$  і фіксується нестабільна  $\beta$ -фаза –  $\beta_n$ . Співвідношення між  $\alpha'(\alpha'')$  і  $\beta_n$  залежить від легувальних елементів і ступеня легування сплавів. Так, в сплаві ВТ 3-1 (5,5% Al, 2% Mo, 2% Cr, 1% Fe) після гартування утворюється близько 60%  $\alpha'(\alpha'')$ - і близько 40%  $\beta_n$ -фази.

В сплавах з концентрацією легувальних елементів від  $C_{кр}$  до  $C_\beta$  в результаті гартування фіксується нестабільна  $\beta$ -фаза –  $\beta_n$ .

Однорідний  $\beta$ -твердий розчин характеризується зазвичай доброю пластичністю і невисокою твердістю. Сплави з концентрацією легувальних елементів дещо більше  $C_{кр}$  після гарту мають високі твердість і крихкість. Це пов'язано з появою в структурі загартованого сплаву  $\omega$ -фази з гексагональної кристалічною ґраткою. Процес цей небажаний,  $\omega$ -фаза усувається в процесі подальшого старіння шляхом перегріву сплаву в кінці старіння на 100 - 150 °С протягом 30 - 60 хв.

При старінні відбуваються фазові перетворення дифузійного характеру, пов'язані з перетворенням фаз які утворились після гартування  $\alpha'(\alpha'')$ ,  $\beta_n$  і  $\omega$ .

Кінцевий продукт перетворення - стабільна  $(\alpha+\beta)$  - структура. Можливе також утворення інтерметалідних сполук. Розпад мартенситної фази інтенсивно протікає при температурі вище 350 - 400 °С і проходить в кілька стадій. Спочатку утворюється і виділяється збіднена рівновісна  $\alpha$ -фаза. Та, що залишилась фаза  $\alpha(\alpha'')$  збагачується легуючими елементами, стає термодинамічно нестійкою і перетворюється в дрібнодисперсну  $\beta$ -фазу.

Схематично цей процес можна описати так:



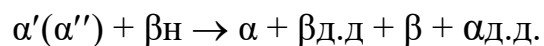
Перетворення в нестабільній  $\beta_n$ -фазі може початися вже при 100 – 200 °С, але більш інтенсивно воно протікає при температурах вище 250 – 300 °С. У сплавах, в яких утворюється  $\omega$ -фаза при гартуванні, її кількість може збільшуватися при старінні. В цьому випадку схема процесів старіння виглядає так:



При температурах старіння понад 450 – 550 °С  $\omega$ -фази при старінні не утворюється, а при дещо більших температурах  $\omega$ -фаза перетворюється в  $\alpha$ -фазу:



Таким чином, сплави з концентрацією легувальних елементів від  $C_1$  до  $C_{кр}$  зазнають перетворення під час старіння за схемою:



У всіх випадках виділення вторинної фази в дрібнодисперсному вигляді сприяє додатковому досить ефективному зміцненні під час старіння.

До цього часу всі перетворення в титанових сплавах при гартуванні розглядалися за умови нагріву їх до  $\beta$ -області (вище лінії 882 °С -  $C_\beta$ ). Однак експериментально встановлено, що при цьому можливе утворення в сплавах

крупногоччатої структури, що призводить до окрихчування сплавів. Для запобігання такого явища режими нагріву для гартування обраються для кожного сплаву індивідуально.

При нагріванні титанових сплавів вище  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  у звичайній атмосфері їх поверхневий шар схильний до газонасичення і окрихчування. Тому нагрівання і гартування найкраще проводити у вакуумі.

### 6.3 Зміцнювальна термічна обробка сплаву VT8

Оскільки двофазні ( $\alpha + \beta$ ) -титанові сплави можуть зміцнюватись термічною обробкою, є можливість додатково підвищити їх міцність.

За допомогою рентгеноструктурного фазового аналізу і електронно-структурного мікродослідження встановлено, що зміцнення при термічній обробці двофазних ( $\alpha + \beta$ ) - сплавів досягається за рахунок утворення під час гартування метастабільних  $\beta$ -,  $\alpha''$ - і  $\alpha'$ -фаз і розпаду їх при подальшому старінні з виділенням дисперсних частинок  $\alpha$ - і  $\beta$ - фаз.

Зміцнювальна термічна обробка сплаву VT8 зберігає свою ефективність тільки при температурах експлуатації не більше  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Фазовий склад сплаву VT8 змінюється в залежності від температури нагрівання і швидкості охолодження процесу гартування з  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  поряд з  $\alpha'$ - фазою фіксується  $\beta$ -фаза, а після гартування з  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$  фіксується  $\alpha''$ - $\alpha$ - і  $\beta$ - фази.

Після нагрівання до  $650 - 850\text{ }^{\circ}\text{C}$  швидкість охолодження не впливає на тимчасовий опір розриву. Пластичність деформованого сплаву VT8 підвищується, а міцність знижується після нагрівання до  $850 - 900\text{ }^{\circ}\text{C}$  незалежно від швидкості охолодження. Після нагрівання до  $950 - 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  з підвищенням швидкості охолодження тимчасовий опір розриву зростає, а пластичність падає.

Межа повзучості сплаву з підвищенням температури гартування знижується і досягає мінімального значення після гартування з  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а потім

зростає з подальшим підвищенням температури до 950 — 1000°C. Після гартування з 1000 — 1200°C різко знижуються пластичні властивості.

Після гартування з 975 °C в структурі сплаву спостерігається зерна первинної  $\alpha$ -фази на фоні метастабільної  $\beta$ -фази. При швидкому охолодженні з 1000°C мікроструктура буде  $\alpha'$ -мартенсит рис 6.2.

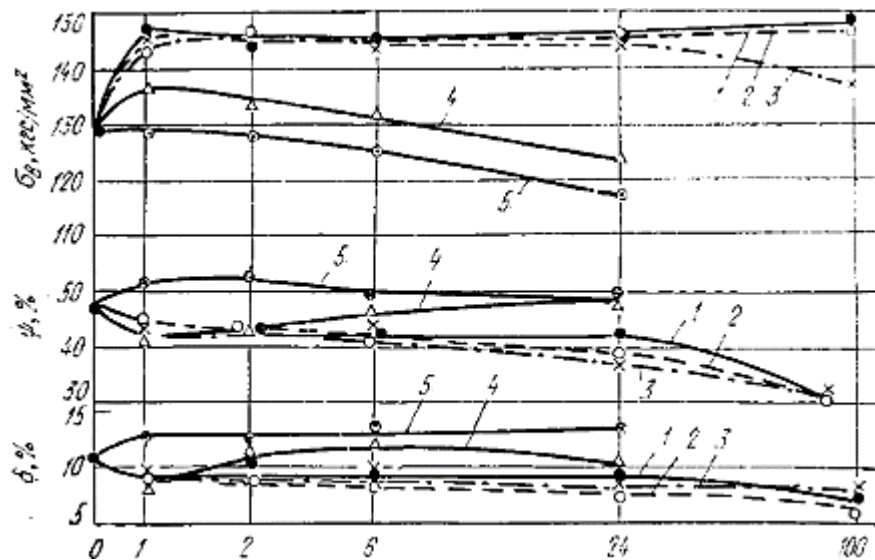
При підвищенні температури нагрівання під час гартування з 950 до 975 °C кількість  $\alpha$ -фази зменшується, а кількість  $\alpha'$ -мартенситу збільшується.

Чим повільніше охолодження, тим грубіша структура метастабільної  $\beta$ -фази, кількість виділеної  $\alpha$ -фази більше і їх розміри крупніші.

Старіння сплаву ВТ8 призводить до збільшення границі міцності і зниженню пластичності із-за розпаду нестабільних фаз. Найбільш висока міцність досягається після старіння при 400 і 500 °C впродовж 1-ї години. Збільшення температури старіння до 700 °C знеміцнює сплав.

Зниження температури нагрівання при гартуванні з 975 до 950 °C майже не впливає на властивості після старіння рис 6.3.

В процесі повільного охолодження з піччю відбувається стабілізація структури і утворення рівновісних  $\alpha$ - і  $\beta$ -фаз. Міцність зменшується у всьому інтервалі температур. Зниження пластичності при переході в  $\beta$ -область пов'язано з інтенсивним ростом зерна.



1-450°C; 2-500°C; 3-550°C; 4-600°C; 5-650°C.

Рисунок 6.3 - Вплив часу старіння на механічні властивості сплаву VT8 після гартування 950°C (1-450°C; 2-500°C; 3-550°C; 4-600°C; 5-650°C.) [27]

Наявність в сплаві метастабільних фаз, які виникли після високотемпературної обробки при наступному старіння визиває значні зміни механічних властивостей і структури.

Сплав значно знеміцнюється в результаті старіння при температурах вище 550°C. Після старіння при 750°C міцність знижується на 250МПа, пластичність при цьому незначно підвищується (відносне звуження не більше ніж на 10%) рисб.3.

По різному щавленні первинної  $\alpha$ -фази і продуктів розпаду можна судити про ступінь розпаду метастабільних фаз. В інтервалі температур 200-530°C, утворюється гетерофазна високодисперсна структура, яка складається з рівновісних  $\alpha$ - і  $\beta$ -фаз рис2.3 а). При 530°C виділяється максимальна кількість цих фаз. При подальшому підвищенні температури старіння до 750°C продукти розпаду коагулюють, що приводить до зниження характеристик міцності.

Таким чином:

-після гартування і охолодження на повітрі в сплаві ВТ8 утворюються метастабільні  $\alpha'$   $\alpha''$ - і  $\beta$ -фази;

-в залежності від кількісного співвідношення цих фаз, їх дисперсності і форми виділення можна отримати широкий діапазон властивостей;

-максимальні характеристики міцності ( $\sigma_B=1400\text{МПа}$ ,  $\sigma_{0,2}=1250\text{МПа}$ ) при задовільній пластичності ( $\delta=10\%$ ,  $\psi=25\%$ ) досягаються після гартування у воді від  $950^\circ\text{C}$  1 годин, та наступного старіння при  $530^\circ\text{C}$  2 години, і охолодженням на повітрі;

-мінімальні характеристики міцності і максимальну пластичність забезпечує гартування від  $850\text{-}950^\circ\text{C}$  1 година[6], [16].

Максимальне зміцнення сплаву ВТ8 отримано в результаті розпаду при старінні мартенситної  $\alpha''$ -фази. Утворення рівновісних  $\alpha$  і  $\beta$ -фаз в результаті старіння  $\alpha'$  і  $\beta$ -фаза менше зміцнює сплав, хоча абсолютні значення характеристик міцності при цьому вище.

Оптимальний режим зміцнювальної термічної обробки двофазного титанового сплаву ВТ8 з урахуванням ресурсу 2000 годин, є:

-гартування в воді з температури  $950^\circ\text{C}$ , подальше старіння при  $550^\circ\text{C}$  протягом 6 годин з охолодженням на повітрі;

-гартування в аргоні з температури  $950^\circ\text{C}$ , подальше старіння при  $550^\circ\text{C}$  протягом 6 годин з охолодженням в вакуумі.

## ВИСНОВКИ

В даній дипломній роботі розглянуто вибір матеріалу та термічної обробки для лопатки компресора. На основі порівняння властивостей матеріалів та вимог до матеріалу виробу з властивостями, що необхідно отримати, маємо, що зазначеним вимогам відповідають лише певні марки сплавів: VT8, VT8M-1.

Найкращим для виготовлення лопатки компресора за кількістю легуючих елементів та властивостями є сплав VT8. Для нього визначили характеристики легуючих елементів та їх вплив на властивості сплаву. Розробили маршрутну схему технології термічної обробки для виготовлення виробу. Обрали технологію термічної обробки, розробили можливу схему садки, розрахували тривалість та температуру кожної операції. Маємо графіки термічної обробки, карту технологічного процесу термічної обробки та розглянуті можливі дефекти.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

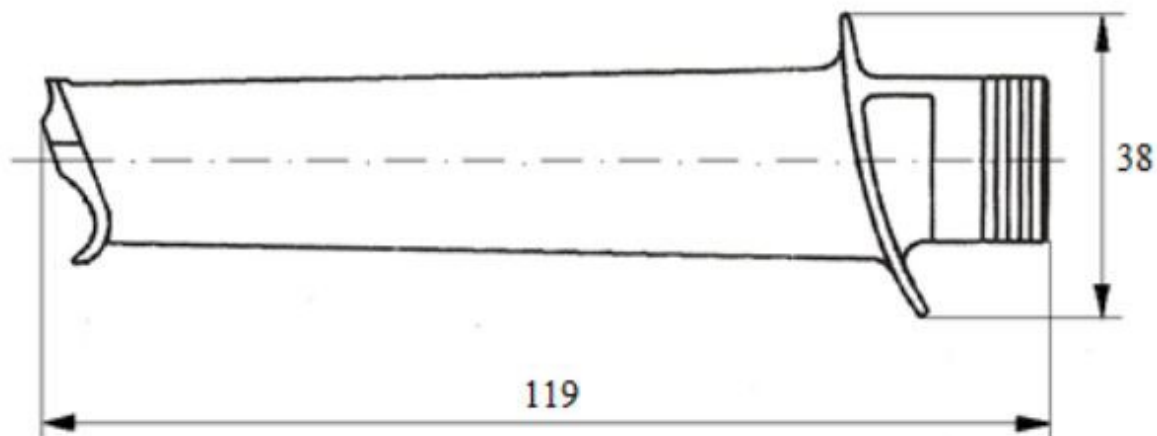
1. Солоніна О.П., Глазунов С.Г. Сучасні жароміцні титанові сплави та перспективи їхнього застосування в двигунах / О.П. Солоніна, С.Г. Глазунов. Глазунов. - М.: Металлургия, 1974. - 360 с.
2. Boyce, Meherwan. "Gas Turbine Engineering Handbook 4th Edition". Publisher: Butterworth-Heinemann; (November 23, 2011). No. of pages — 1000.
3. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної бакалаврської дипломної роботи для студентів спеціальності 132 «Матеріалознавство» освітня програма (спеціалізація) «Прикладне матеріалознавство» усіх форм навчання. /Укл.: І.М. Лазечний, О.В. Климов, О.А. Глотка, Ю.І. Кононенко, О.В. Лисиця. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2022. – 57 с.
4. Горинін І.В., Чечулін Б.Б. Титанові сплави в машинобудуванні / І.В. Горинін, Б.Б. Чечулін. - Л.: Машинобудування, 1990. - 400 с.
5. Березос В. О. Теорія і практика виробництва зливок високоміцних конструкційних сплавів на основі титану методом електронно-променевої плавки: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук: 05.16.02 Київ, 2001. - 321 с.
6. Матеріалознавство / під ред. Б. Н. Арзамасова. М.: Машинобудування, 1986. 384 с.
7. Мінкевич А. Н. Хіміко-термічна обробка металів і сплавів. М.: Машиностроение, 1985. 490 с
8. Boyer R.R., Lutjering G. Heat treatment of titanium alloys: overview, in Advances in the Science and Technology of Titanium Alloy Processing / R.R. Boyer, G. Lutjering; eds I. Weiss et al. - Warrendale, PA: TMS, 1993. - P. 349–367.
9. Бичков А. С. Концепція підвищення експлуатаційних характеристик конструкцій агрегатів вітчизняних цивільних літаків спеціальними методами порошкової металургії: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук: 05.07.02. Київ, 2019. 311 с.

10. Zhu Q., Yang X., Lan H., Wang D., Lou H., Li J. Effect of solution treatments on microstructure and mechanical properties of Ti–6Al–4V alloy hot rolled sheet / Qiangqiang Zhu, Xingdi Yang, Huifang Lan, Dongxiao Wang, Hongtao Lou, Jianping Li // Journal of Materials Research and Technology. - 2023. - Vol. 23, P. 5760-5771.
11. Соколов К. М. Обладнання термічних цехів. Донецьк: Вицашкола, 1984. 328 с.
12. Цвіккер У. Титан і його сплави / У. Цвіккер. Цвіккер. - М.: Металургія, 1979. - 510 с.
13. Коллінз Е.В. Фізичне металознавство титанових сплавів / Е.В. Коллінз; Пер. з англ. за ред. Б.І. Вьоркіна, В.А. Москаленка. - М.: Металургія, 1988. - 224 с.
14. НПАОП 28.5-1.02-07 – Правила охорони праці при термічній обробці металів. – К: 30 с.
15. Пістун І.П. Охорона праці при виконанні зварювальних і термічних робіт: навчальний посібник / І.П Пістун., Р.А. Яцюк, І.О. Трунова. – Львів: УАД, 2011. – 446 с.
16. Соколов В.М. Механізація та автоматизація в термічних цехах: Учб. посібник. для вузів / В.М. Соколов. - М.: Машгиз, 1962. - 185 с.
17. Кузін О.А. Матеріалознавство та термічна обробка металів / О.А. Кузін, Р.А. Яцюк. – Львів: Афіша, 2002. – 216 с.
18. Зеркалов Д.В. Экологизация энергопотребления: Монография / Д.В. Зеркалов. - К.: ООО Межнар. фин. агентство, 1998. - 271 с.
19. Тилкін М. А. Довідник терміста ремонтної служби. М.: Металургія, 1981. 648 с.
20. Колачев Б.А., Ліванов В.А., Єлагін В.І. Металознавство і термічна обробка. - М.: Металургія, 1972.24.Чечулин В.В., Ушков С.С., Разуваева И.Н., Гольдфайн В.Н.. Титановые сплавы в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1977г.
21. Масленков С.Б., Масленкова Е.А. Сталі і сплави для високих температур /Справочник. - М.: Металургія, 1991. - 832с.

22. Журавльов В.Н., Ніколаєва О.І. Машинобудівні сталі /Справочник - М.: Машиностроение, 1981. - 391 с.

23. Фіргер І. В. Термічна обробка сплавів: Довідник. - Л.: Машинобудування. Ленінгр. відд-ние, 1982. - 304 с, іл.

ДОДАТОК А  
ЕСКІЗ ЛОПАТКИ, НОМЕНКЛАТУРА, ХІМІЧНИЙ СКЛАД  
ТА ВЛАСТИВОСТІ СТАЛЕЙ



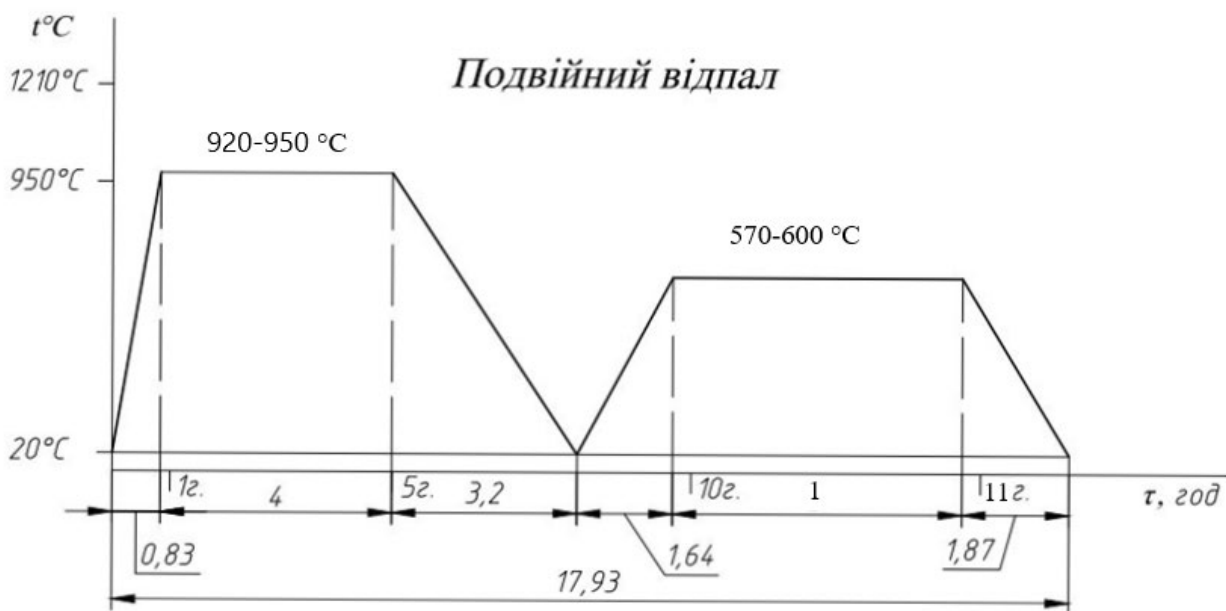
Номенклатура виробу

Назва виробу	Матеріал виробу	Маса виробу, кг	Розміри виробу, мм			Вимоги до матеріалу
			<i>l</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	
Лопатка1(права)	BT8	0,45	119	38	10	KCU≥20Дж/см <sup>2</sup> , σ <sub>в</sub> ≥1000МПа, δ≥10%, ψ=30%
Лопатка1(ліва)	BT8	0,45	119	38	10	KCU≥20Дж/см <sup>2</sup> , σ <sub>в</sub> ≥1000МПа, δ≥10%, ψ=30%
Лопатка2(права)	BT8	0,6	143	40	10	KCU≥20Дж/см <sup>2</sup> , σ <sub>в</sub> ≥1000МПа, δ≥10%, ψ=30%
Лопатка2(ліва)	BT8	0,6	143	40	10	KCU≥20Дж/см <sup>2</sup> , σ <sub>в</sub> ≥1000МПа, δ≥10%, ψ=30%

Хімічний склад титанових сплавів BT3-1, BT8, BT8M-1 %

Марка сплава	Al	Mo	Zr	Fe	Si	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	C	Cr
BT3-1	5,2-6,8	2,0-3,0	≤0,5	0,2-0,7	0,15-0,35	≤0,18	≤0,015	≤0,05	≤0,1	1,5-2,5Cr
BT8	5,8-7,0	2,8-3,8	≤0,5	≤0,3	0,2-0,4	≤0,15	≤0,015	≤0,05	≤0,1	-
BT8M-1	4,8- 6,0	3,5- 4,5	0,3-1,5	-	0,08- 0,25	-	-	-	-	0,5- 1,5

ДОДАТОК Б  
**ГРАФІК ТА ТЕХНОЛОГІЧНА КАРТА ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ЛОПАТКИ  
 КОМПРЕСОРА ЗІ СТАЛІ ВТ8**



Графік термічної обробки робочої лопатки зі сплаву ВТ8

Технологічна карта термічної обробки лопатки компресора зі сплаву ВТ8

Ескіз виробу	Технічні умови		
	Марка сплаву	Властивості	Структура
	ВТ8	експлуатація – 5тис.год., $T_{експ} \leq 500^\circ\text{C}$ , $\sigma_b = 1000$ МПа, $\delta = 10\%$ , $\psi = 30\%$ , $KCU \geq 20 \text{ Дж/см}^2$ , $\sigma_{-1} = 530$ МПа, $\sigma_{0,2/1000}^{450} = 235 \text{ МПа}$ , $\sigma_{1000}^{450} = 620 \text{ МПа}$ .	$\alpha + \beta$

№	Назва операції	Обладнання	Режим нагрівання: t, τ, середовище та його витрати.	Режим охолодження: середовище, його тиск, температура; склад; витрати; тривалість, хв.	Назва пристосування кількість, шт.	Умови обробки та контролю
1	Вхідний контроль	Стилоскоп, штангенциркуль, мікрометр.				Хімічний склад, розміри, відсутність поверхневих дефектів гострих країв.
2	Перший відпал					
2.1	Нагрівання	СНЗ - 8.16.5/10	tп=20°C; tк=980±5°C; Захисне середовище - аргон τн=49,94хв		Піддон 91шт	Температура нагрівання, тривалість нагрівання, кількість виробів в садці, середовище.
2.	Витримка	СНЗ - 8.16.5/10	Tв=980±5°C; τв=240хв; Захисне середовище - азот;		91	Температура, тривалість витримки, кількість виробів, маса садки, середовище.

2.3	Охолодження	Стіл		$V_{ох}=5^{\circ}\text{C}/\text{с}$ до $t=20^{\circ}\text{C}$ . $t_{ох}=192\text{хв}$ . повітря;		Температура початкова кінцева тривалість та швидкість охолодження.
3	Контроль	ТШ, металографічний мікроскоп МІМ-7				Контроль твердості та номера зерна, кількості $\beta$ -фази
4	Другий відпал					
4.1	Нагрівання	СНЗ - 8.16.5/10	$T_{п}=20^{\circ}\text{C}$ ; $T_{к}=580\pm 5^{\circ}\text{C}$ ; Захисне середовище - азот; $t_{н}=98,34\text{хв}$		91	Температура нагрівання тривалість нагрівання, кількість виробів в садці, середовище.
4.2	Витримка	СНЗ - 8.16.5/10	$T_{в}=580^{\circ}\text{C}$ ; $t_{в}=300\text{хв}$ ; Захисне середовище - азот;		91	Температура, тривалість витримки, кількість виробів, маса садки, середовище.
4.3	Охолодження	Стіл		$V_{ох}=5^{\circ}\text{C}/\text{хв}$ до $t=20^{\circ}\text{C}$ . $t_{ох}=112\text{хв}$ ; повітря		Температура початкова та кінцева, тривалість та швидкість охолодження.

5	Контроль вихідний	ТШ, металографічний мікроскоп МІМ-7				Контролюються: структура, Тексп≤500 °С, σв=1000 МПа , δ5=10%, ψ5=30%, КСУ=300 кДж/м2, σ-1 = 520 МПа, σ4500,2/1000=400 МПа, σ <sub>100</sub> <sup>450</sup> =670 МПа..
---	-------------------	--	--	--	--	---

## ДОДАТОК В

### ДЕФЕКТИ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ

#### Дефекти робочої лопатки зі сплаву ВТ8

№	Вид дефекту	Причини виникнення	Заходи щодо запобігання	Заходи по усуненню
1	2	3	4	5
<b>Гартування</b>				
1	Перегрів (велике зерно)	Завищена температура	Контроль та регулювання температури	Невиправний
2	Короблення, гарячі тріщини	Швидке охолодження	Дотримання оптимальної швидкості охолодження при гартуванні	Невиправний
3	Перепад	1) Завищена температура гартування; 2) Завищений час витримки	Контроль і регулювання температури, дотримання технологічного часу	Невиправний
4	Неоднорідна структура	Недостатній ступінь гомогенізації твердого розчину при нагріванні під гартування, занижена температура гартування або час витримки	Дотримання оптимальної температури і витримки при гартуванні	Повторне проведення ТО з раціональної технології
<b>Старіння</b>				
5	Занижена твердість	1. Нагрівання до значно вищих температур 2. Тривала витримка	Дотримання температур, часу, зазначених в технології	Повторення відпалу з дотриманням параметрів технологічного процесу
6	Понижена жароміцність	Недостарювання (недостатня кількість $\gamma'$ - фази).	Контроль температури та тривалості процесу старіння.	Повторне старіння