

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 проєкту (роботи)

магістра
(ступінь вищої освіти)

на тему: Дослідження впливу параметрів термічної обробки на мікроструктуру і механічні властивості жароміцних титанових сплавів для застосування у ГТД

Виконав(ла): студент(ка) курсу, групи ІФ-232м

Спеціальності 132 «Матеріалознавство»
(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)
Прикладне матеріалознавство

САВЧЕНКО Іван Іванович
(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

Керівник ТКАЧ Даря Володимирівна
(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

Рецензент _____
(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до магістерської роботи: 122 с., 38 табл., 33 рис., 1 дод., 20 джерел.

ПОДВІЙНИЙ ВІДПАЛ, ГАРТУВАННЯ, ВІДПУСК, ВАКУУМНА ПІЧ, ОБЛАДНАННЯ, ТЕХНОЛОГІЯ, ТЕМПЕРАТУРА, КОНТРОЛЬ

Об'єктом дослідження є двофазні титанові сплави, що використовуються для виготовлення деталей газотурбінних двигунів.

Метою даної роботи є аналіз впливу процесів термічної обробки на структурні та властивості компонентів газотурбінних двигунів, виготовлених з двофазних титанових сплавів, а також розробка оптимальної технології термічної обробки для дисків зі сплавів BT3-1, BT8, BT9.

У ході роботи були досліджені особливості, які визначають вплив легування та термічної обробки на формування структури двофазних титанових сплавів, та оцінено, як це впливає на їхні експлуатаційні характеристики. Вибрано відповідні матеріали та методологію для дослідження. Було проведено аналіз впливу термічної обробки на структурні характеристики матеріалу та розроблено ефективний метод термічної обробки, який забезпечує оптимальне співвідношення властивостей. Вивчено ключові процеси термічної обробки, використовуване в цьому відділенні обладнання, включаючи як основне, так і допоміжне. Проведено розрахунок вартості термічних процесів у термічному відділенні. Також здійснено аналіз заходів забезпечення безпеки праці у термічному відділенні.

ЗМІСТ

	С.
Вступ.....	5
1 Аналітичний огляд	7
1.1 Особливості використання сплавів титану в газотурбобудуванні	7
1.2 Вплив легування на властивості двохфазних сплавів титану	9
1.3 Вибір термічної обробки для деталей ГТД з двохфазних титанових сплавів.....	19
1.4 Особливості структури двохфазних титанових сплавів у залежності від рівня легування та режимів термічної обробки.....	29
2 Матеріали та методи дослідження	38
2.1 Матеріали дослідження.....	42
2.2 Методи дослідження	
2.2.1 Метод випробування твердості за Брінелем	
2.2.2 Випробування на розтяг	
2.2.3 Випробування на ударну в'язкість	
2.2.4 Випробування на повзучість.....	
2.2.5 Випробування на довготривалу міцність	
2.2.6 Дослідження мікроструктури	
3 Оцінка впливу хімічного складу та термічної обробки на структуру та властивості.....	45
3.1 Вплив термічної обробки на структуру та властивості сплаву ВТЗ-1	
3.2 Розгляд структури та властивостей двохфазних титанових сплавів з різним рівнем легування	
3.3 Номенклатура титанових дисків та маршрутна технологія їх виготовлення	
3.4 Розробка режимів та технології термічної обробки для дисків компресора	
3.5 Технічний контроль, попередження та виправлення дефектів для дисків компресора	
4 Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях.....	86

4.1 Аналіз потенційних небезпек	
4.2 Заходи по забезпеченню безпеки	
4.3 Заходи по забезпеченню виробничої санітарії та гігієни праці	
4.4 Заходи з пожежної безпеки	
4.5 Заходи безпеки у надзвичайних ситуаціях	
5 Економіко-організаційна частина	98
Висновки.....	118
Перелік використаної літератури	119
Додаток А	122

ВСТУП

У сфері авіаційного двигунобудування залишається актуальною задача підвищення тривалості експлуатації та надійності двигунів, ключові компоненти яких експлуатуються протягом тривалого періоду під впливом циклічних навантажень та високих температур. Вирішення цієї проблеми здійснюється за допомогою розробки нових конструкцій, використання матеріалів з покращеними фізико-механічними характеристиками та застосування передових методів обробки виробів.

У вітчизняній промисловості для дисків газотурбінних двигунів використовується широка номенклатура титанових сплавів, які мають робочу температуру від 350 до 600°C. Для дисків першого ступеню компресора (вентилятора) та низького тиску в ГТД 3-4 поколінь використовуються сплави ВТ3-1, ВТ6, ВТ8, а для серійних модифікацій і нових ГТД рекомендується використання сплавів ВТ6 і ВТ8-1. Для температур вище 450-500°C раніше застосовувалися сплави ВТ8, ВТ9 і ВТ25, але сьогодні рекомендовано їх заміну на сплав ВТ25У у діапазоні 500-550°C. Нещодавно було проведено удосконалення технології виробництва напівфабрикатів зі сплаву ВТ8-1, який є модифікацією ВТ8 з аналогічними областями застосування. Дослідження показали, що ВТ8-1 володіє вищою технологічністю у металургійному виробництві, зокрема на стадіях гарячої деформації, та вищими характеристиками міцності й тріщиностійкості порівняно з ВТ6 для великогабаритних кувань, а також підвищеними показниками жароміцності при температурі 500°C у порівнянні з ВТ9. Це відкриває можливості для уніфікації роторів компресора за використовуваними сплавами, забезпечення кращих питомих характеристик виробу та зниження вартості.

Таким чином, у цій роботі буде розглянуто характеристики титанових сплавів, що використовуються при виробництві газотурбінних дисків, і

запропоновано серійну технологію їх термічної обробки. При виборі матеріалів особлива увага буде приділена забезпеченню високої надійності та довговічності, а також економічності виробництва. Основною операцією, що забезпечує необхідний рівень надійності, є термічна обробка, і в рамках цієї роботи буде розглянута технологія термічної обробки титанових сплавів.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

1.1 Особливості використання сплавів титану в газотурбобудуванні

Понад півстоліття тривають дослідження та розробка титанових сплавів для авіаційної галузі, включно з авіаційними газотурбінними двигунами. Спочатку титанові компоненти складали лише 5-10% загальної маси двигуна, але у сучасних конструкціях вагова частка титану досягає приблизно 40% [1]. Титанові сплави, які вирізняються високою міцністю на одиницю маси та корозійною стійкістю при температурах до 550-600°C, стали ключовими матеріалами для виготовлення компресорних деталей газотурбінних двигунів.

Титанові сплави широко застосовуються для виготовлення критично важливих деталей газотурбінних двигунів через їхні високі механічні властивості, особливо під час впливу суттєвих статичних і змінних напружень при високих температурах. Сплави BT3-1, BT8 і BT9 використовують для виготовлення таких елементів, як диски, лопатки та кільця компресора. Листові сплави, як-от ВІД-4, а також BT20 з підвищеною міцністю, призначені для виготовлення пустотілих лопаток напрямних апаратів та корпусних елементів компресора. Оскільки титанові сплави чутливі до концентрації напружень при змінних навантаженнях, при обробці таких деталей потрібно враховувати умови експлуатації, вибір режимів і методів обробки.

На сьогодні існує низка основних механічних властивостей, яким відповідають титанові сплави для деталей авіаційних двигунів [2]. Це включає:

- високу витривалість проти втоми при кімнатних і підвищених температурах, що критично для лопаток компресора.

- високу міцність як короточасну, так і тривалу в усьому діапазоні робочих температур.

- термічну стабільність, що гарантує збереження пластичних властивостей після тривалого впливу високих температур і напружень.

- задовільні пластичні властивості при кімнатній температурі.

- високий опір повзучості, особливо важливий для дисків компресора.

З урахуванням робочих умов деталей, вибір конкретних властивостей залежить від забезпечення оптимальних значень інших характеристик. Сучасна частка титанових сплавів у авіаційному двигуні перевищує 30% [3], що підкреслює їхню значимість для розвитку галузі та глибокий науковий і практичний інтерес до цих матеріалів.

Однією з важливих задач при розробці титанових сплавів є підвищення робочої температури компресорних деталей високого тиску ГТД до 550-650°C. Однак, при певних умовах можливе спалахування титану, відоме як “титанова пожежа”. Щоб запобігти цьому, використовують оптимальний вибір зазорів між деталями та комбінацію пар “титан-сталь” замість “титан-титан”.

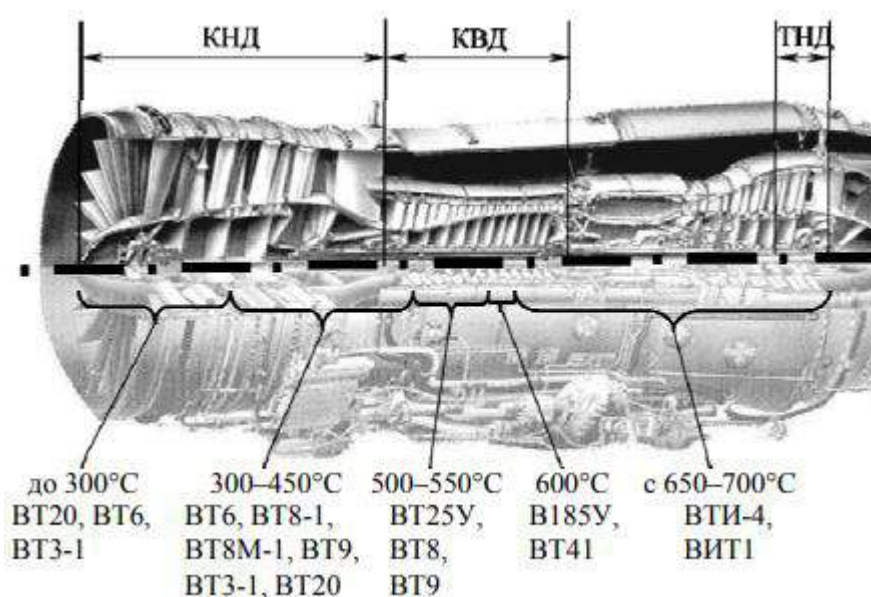


Рисунок 1.1 - Застосування жаростійких титанових сплавів у конструкції газотурбінних двигунів

У цьому контексті розробка жаростійких титанових сплавів, що відрізняються високим опором до малоциклової втоми та повзучості, стала однією з ключових та найбільш пріоритетних задач у галузі сучасного двигунобудування.

1.2 Вплив легування на властивості двохфазних сплавів титану

Фазові перетворення мають ключову роль у властивостях жароміцних титанових сплавів, через що класифікація легувальних елементів базується на їхньому впливі на поліморфізм титану. Важливими є також характеристики твердих розчинів, що формуються, їхній вплив на евтектоїдні перетворення та можливість утворення інтерметалідних фаз.

Деякі легуючі елементи, наприклад алюміній, підвищують, а інші, як молібден, знижують температуру поліморфного перетворення титану. Елементи, які мають незначний вплив на цю температуру, відносяться до категорії нейтральних зміцнювачів за класифікацією С. М. Глазунова.

Для створення жароміцних та термічно стабільних титанових сплавів перспективними є алюміній, галій та індій, які підвищують температуру поліморфного перетворення, а також цирконій і олово, які мало впливають на неї. Важливими є також молібден, ванадій, ніобій та тантал, що не взаємодіють з титаном евтектоїдно; мідь і кремній, з якими евтектоїдне перетворення відбувається швидко (за мартенситною схемою), а також залізо та хром.

Температура плавлення титану становить 1665°C, відносячи його до тугоплавких металів. Проте, порівняно з нікелевими сплавами, жароміцність звичайних титанових сплавів менша, хоча нікель має нижчу температуру плавлення. Це обумовлено поліморфізмом титану, і, коли при 882,5°C відбувається алотропічне ($\alpha \rightarrow \beta$)-перетворення, міцність титану знижується

через збільшення рухомості атомів. Звідси випливає необхідність використання легуючих елементів, що підвищують температуру поліморфного перетворення ($T_{пп}$). Алюміній є оптимальним вибором для цього завдання, оскільки підвищує абсолютну та питому жароміцність, знижуючи щільність сплаву, і є відносно дешевшим від титану. З достатнім вмістом алюмінію можливе створення інтерметалідних сплавів, які за жароміцністю можуть перевершувати нікелеві. У таких сплавах поліморфне перетворення не має місця, оскільки основою стає хімічна сполука $TiAl$ («гама»), а у менш легованому інтерметалідному сплаві Ti_3Al («альфа-2») поліморфізм зберігається, але $T_{пп}$ значно вища, ніж рекомендована температура їх практичного застосування (рис. 1.2) [4].

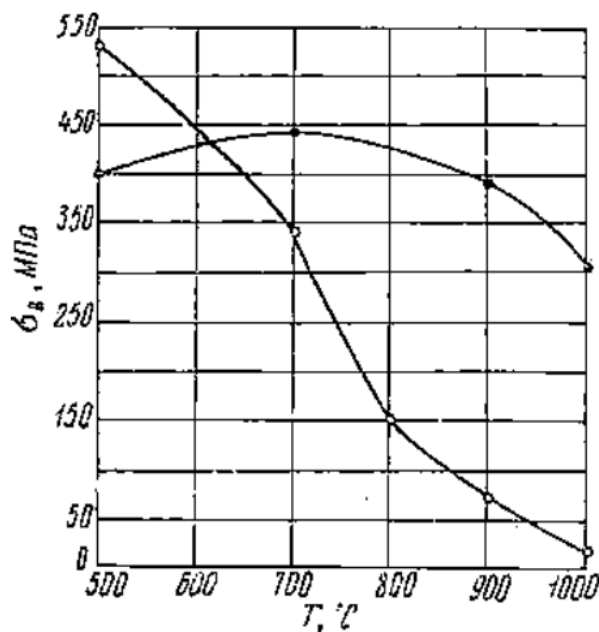


Рисунок 1.2 - Порівняльна жароміцність сплаву ВТЗ-1 (о) і інтерметалідного сплаву «гама» (•)

Жаростійкі титанові сплави включають α - і β -твердорозчинні сплави, в яких формується певна кількість хімічної сполуки, що забезпечує підвищення жароміцності, одночасно зберігаючи їх пластичність. Елементи, такі як Al, Si, C, B, які утворюють хімічні сполуки з титаном, покращують жароміцність.

Довготривалі фундаментальні дослідження та практичний досвід використання різних типів титанових сплавів у авіаційно-космічних конструкціях виявили, що двофазні (α - β) титанові сплави є найбільш перспективними конструкційними матеріалами. Сплави з α + β -структурою забезпечують оптимальне співвідношення міцності, пластичності, тріщиностійкості та інших важливих показників, що сприяє зниженню матеріалоємності, підвищенню ресурсу та надійності виробу.

Легування, обумовлені ним твердорозчинні та дисперсійні процеси зміцнення, а також основи деформації, пов'язані з легуванням, є критичними для розуміння можливостей і перспектив застосування титанових сплавів.

За результатами попередніх досліджень було сформульовано теоретичні основи для створення жаростійких титанових сплавів:

- сплави мають базуватися на системі Ti-Al.
- додаткові легуючі елементи мають включати ізоморфні β -стабілізатори (молібден, ніобій) та нейтральні зміцнювачі (олово, цирконій).
- у багатокомпонентних сплавах можна використовувати евтектоїдні β -стабілізатори (хром, залізо), за наявності достатньої кількості ізоморфних β -стабілізаторів для запобігання евтектоїдному розпаду.
- додаткове підвищення жароміцності досягається за допомогою мікролегування кремнієм і вуглецем.
- сплави з високим вмістом гексагональної α -модифікації титану є більш жаростійкими, ніж ті, що містять більше кубічної β -фази.

Тверді розчини, утворені з елементами, як Al, Zr, Sn, істотно підвищують жароміцність цих сплавів. У табл. 1.1 наведено хімічний склад та механічні властивості жаростійких промислових титанових сплавів у відпаленому стані, а табл. 1.2 вміщує характеристики їх жароміцності [6].

Широкомасштабні дослідження дозволили сформулювати основні принципи комплексного легування високоміцних та термічно зміцнювальних зварних титанових сплавів та визначити ключові фактори, що впливають на підвищення міцності основного матеріалу та зварних з'єднань. Міцність

титанових сплавів визначається вмістом α - і β -фаз, їх співвідношенням, ступенем дисперсності та однорідності структури.

Таблиця 1.1 - Хімічний склад і механічні властивості жароміцних титанових сплавів (пруток діаметром 10-100 мм)

Марка	Середній хімічний склад, %	σ _B	σ _{0,2}	δ ₅	ψ	Ресурс,год
сплаву		МПа		%		
BT18B	Ti-6,7 Al-4 Zr-2,5 Sn-0,7 Mo-1 Nb	1000	930	10	20	500 (550-600°C)
BT36	Ti-6,2 Al-3,6 Zr -2,0 Sn -0,7 Mo-5,0 W-0,15 Si	1050	950	5	8	
BT8	Ti -6,3 Al-1,2 Zr -1,2 Sn -3,2 Mo-0,15 Si	1050	970	9	25	600 (500°C)
BT9	Ti -6,4 Al-1,5 Zr -3,0 Mo-0,25 Si	1050	980	9	25	500 (500°C)
BT3-1	Ti -6,5 Al-2,5 Mo-1,5 Cr-0,5 Fe -0,3 Si	1000	930	10	30	2000(450°C)
BT25	Ti -6,5 Al-3,7 Zr -1,7 Sn -4,0 Mo-1,0 Fe-0,2 Si	1050	950	10	20	3000(550°C)

Примітка. У дужках наведені граничні температури експлуатації.

Таблиця 1.2 - Характеристики жароміцності відпалених титанових сплавів

Марка сплаву	σ_B^t , МПа			σ_{100}^t , МПа			$\sigma_{0,2}^t$ $_{100}$, МПа		
	500°C	550°C	600°C	500°C	550°C	600°C	500°C	550°C	600°C
BT18B	880	825	770	675	500	315	370	120	110
BT36	750	700	650	680	520	335	440	260	—
BT8	750	720	680	525	390	—	250	100	—
BT9	805	715	685	570	—	—	350	160	—
BT3-1	670	600	540	400	—	—	280	—	—
BT25B	875	825	675	725	440	240	360	170	70

Комплексне легування титанових сплавів сприяє зміцненню як α -, так і β -твердих розчинів, зменшуючи відмінності у їхніх характеристиках міцності. Це веде до зниження нерівномірності деформацій та більш ефективного використання міцності обох фаз, а також до зниження ефекту гострих пластинчастих структурних елементів як концентраторів напружень. Рекомендується здійснювати легування титану β -стабілізуючими елементами

з різними коефіцієнтами розподілу для досягнення стабільності сумарної кількості таких елементів у різних зонах і більш рівномірного зміцнення твердого розчину.

Коефіцієнт розподілу для ізоморфного β -стабілізуючого елемента молібдену перевищує одиницю, для ванадію він близький до одиниці, а для евтектоїдоутворюючих елементів, таких як хром і залізо, він менший за одиницю. З урахуванням цього, рекомендується легування титанових сплавів зі співвідношенням ізоморфних і евтектоїдоутворюючих легуючих елементів, що виражається у величинах, еквівалентних вмісту молібдену, з діапазоном від 2/1 до 1/1. Вплив на поліпшення механічних властивостей сплавів і їх зварених з'єднань можна розташувати в наступній послідовності: Cr, Fe, Cr+Fe, Mn, V+Fe, Mo, Mo+Fe, Mo+V, Mo+Cr, Mo+V+Cr+Fe [9].

Ефективність комплексного легування полягає у тому, що кожна група легуючих елементів виконує свою функцію, посилюючи позитивну дію іншої групи, забезпечуючи таким чином необхідні властивості сплаву.

Серед перших широко застосовуваних серійних жароміцних титанових сплавів був BT3-1 (Ti-6,7Al-2,5Mo-1,8Cr-0,5Fe-0,25Si), розроблений у 1957 році. Сплав застосовується для деталей ГТД, що працюють при температурах до 450°C. Для вищих робочих температур у 60-их роках були розроблені сплави BT8 (Ti-6,8Al-3,5Mo-0,32Si) і BT9 (Ti-6,8Al-3,2Mo-2,0Zr-0,3Si). У зв'язку з потребою в підвищенні міцності при температурах до 550°C, був розроблений сплав BT25 (Ti-6,8Al-2,0Mo-2,0Zr-2,0Sn-1,0W-0,3Si) для військової техніки. За кордоном IMI 550 (Ti-4,0Al-4,0Mo-2,0Sn-0,5Si), що працює при температурах до 400°C, замінюється на сплави Ti-6246 і Ti-17 [5].

Важливість розуміння впливу легування на властивості титанових сплавів підкреслюється у дослідженнях, які вивчають поліпшення експлуатаційних характеристик титанових сплавів через вибір легуючих елементів, зокрема Zr і Sn, які використовуються для збільшення високотемпературної міцності титану [11].

Сплави BT3-1, BT8, BT9 легуються за допомогою таких елементів, як Al, Mo, Cr, Zr, Si. Вплив цих легувальних елементів на властивості титану детально представлено на рисунку 1.5. Якщо взяти за основу інтенсивність збільшення границі текучості, то легувальні елементи можна розмістити у наступному порядку: Nb, Ta, Zr, Al, V, Sn, Cu, Si, Mn, Co, Fe, Mo, Cr.

Алюміній, який є основним легувальним елементом, переважно розчиняється в α -фазі та зміцнює її. Основними перевагами алюмінію, порівняно з іншими легувальними елементами, є його широка доступність та низька вартість; нижча густина у порівнянні з титаном, що збільшує питому міцність; ефективне зміцнення сплавів при збереженні прийнятної пластичності; зростання жароміцності зі збільшенням вмісту алюмінію; підвищення модуля пружності; зменшення схильності до водневої крихкості з підвищенням вмісту алюмінію. Проте слід зауважити, що зі зростанням вмісту алюмінію збільшується схильність титанових сплавів до сольової корозії та знижується їхня технологічна пластичність.

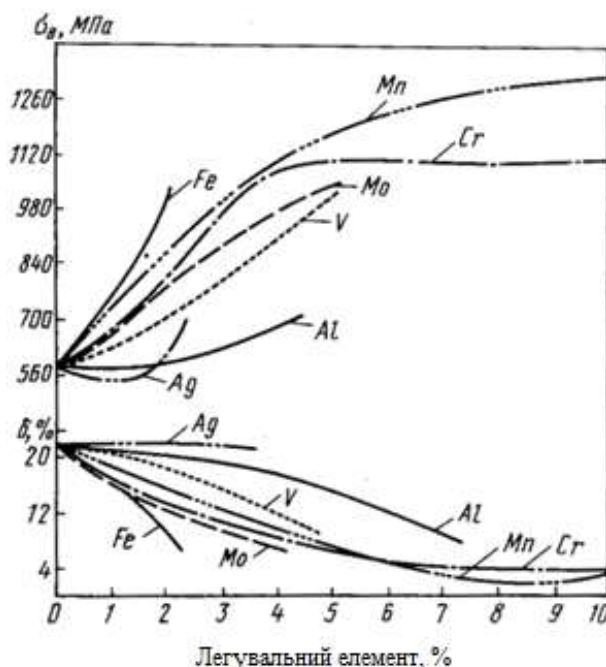


Рисунок 1.5 - Вплив легувальних елементів на механічні властивості титану [6]

Молибден формує безперервний ряд твердих розчинів з β -модифікацією титану, проте обмежено розчиняється у α -модифікації. Як ізоморфний β -стабілізатор, молибден під час гарячої обробки збільшує кількість пластичної β -фази. Легування молибденом ефективно збільшує міцність при кімнатній та підвищених температурах, покращує термічну стабільність сплавів, легованих хромом і залізом. Перевага молибдену полягає в тому, що він не утворює інтерметалідних фаз, які можуть спричинити окрихчення сплаву.

Хром у титанових сплавах забезпечує високу міцність з доброю пластичністю та ефективною термічною обробкою. Однак, присутність евтектоїдного розпаду β -фази при тривалих нагріваннях загартованого сплаву при температурах нижче евтектоїдної, але вище 350°C , може викликати окрихчення сплаву через утворення інтерметалідної сполуки TiCr_2 .

Залізо та кремній обмежено розчиняються як у β -, так і в α -модифікаціях титану і при перевищенні певних концентрацій утворюють з титаном інтерметалідні сполуки, такі як Ti_5Si , TiFe , TiFe_2 , Ti_2Fe . Залізо має незначний вплив на механічні властивості титану, проте зі збільшенням його вмісту міцність зростає, а пластичність знижується через утворення мартенситних структур при прискореному охолодженні. Повільне охолодження з β -області знижує міцність і пластичність через β -крихкість. Збільшення вмісту кремнію на 0,1% підвищує міцність, але суттєво знижує пластичність та в'язкість. Кремній підвищує жароміцність та жаростійкість титанових сплавів.

Цирконій, хоч і є слабким зміцнювачем порівняно з іншими легувальними елементами, при підвищених температурах збільшує свій зміцнювальний вплив. Тому його включають до складу жароміцних титанових сплавів, де він забезпечує невелике твердорозчинне зміцнення, не знижуючи міжатомного зв'язку. Цирконій також збільшує розчинність β -стабілізаторів у β -фазі, що дозволяє додатково зміцнити жароміцні β -

сплави. Як ізоморфні, так і евтектоїдоутворюючі β -стабілізатори знижують температуру мартенситного перетворення в титані.

Зі зростанням концентрації β -стабілізатора відбувається збільшення об'єму β -фази, а також значне дрібнення структури. Ці зміни безпосередньо впливають на властивості титану, зокрема, при збільшенні вмісту β -стабілізатора спостерігається зниження границі текучості і граничної пластичності при переході від дрібнозернистої до грубозернистої структури, що зумовлює підвищену схильність до «крихкості». Використання двофазних сплавів може забезпечити значне поліпшення пластичності порівняно з однофазними α -сплавами лише при наявності дрібнозернистої структури [6].

Наявність $\alpha+\beta$ -структури в сплавах створює додатковий опір ковзанню дислокацій через перехід дислокацій від α до β структури, роблячи β -фазу функціональною зміцнювальною фазою. Краща пластичність β -складової структури сприяє підвищенню пластичності $\alpha+\beta$ -сплавів.

Один із шляхів підвищення високотемпературної міцності полягає у збільшенні коефіцієнта дифузії в β -фазі. Наприклад, сплав Ti–6% Al–5% Mo–25% Nb показує значну міцність при високих температурах, але застосування важких металів, таких як Nb, знижує питому міцність сплаву. Короткочасна міцність при високих температурах збільшується за допомогою Mo (наприклад, у сплаві Ti-6246). Nb використовується для стабілізації поверхні при високих температурах, знижуючи окиснення. Кремній в невеликій кількості збільшує міцність сплавів на всьому діапазоні температур. Однак вміст Cr, Ni, Fe, Co в сплавах обмежується, оскільки вони знижують високотемпературні властивості сплаву. Температурний ліміт для титанових сплавів на сьогоднішній день становить 590°C (сплав IMI 834), і його можна збільшити за допомогою додавання Ta і W. Введення дисперсоїдів і проведення швидкої рекристалізації, таких як Y, Er, Nd, Gd, C і B, може поліпшити властивості титанових сплавів при високих температурах. Проте досягнення однорідного розподілу цих часток є складним завданням. Введення силіцидів (Ti₅Si₃) дозволяє підвищити температуру експлуатації до

800°C, але значно знижує пластичність при кімнатній температурі. Важливо зазначити, що для практичного використання титанових сплавів при високих температурах необхідно забезпечити пластичність не менше 10-12%, ударну в'язкість не менше 60 МПа·м^{1/2} та температуру окиснення, що не нижча за температуру експлуатації.

Перспективним напрямком для підвищення високотемпературної міцності титанових сплавів є застосування дисперсного зміцнення, що має більшу величину ступеня n ($n > 7$), що сприяє високому зміцненню та низьким швидкостям деформації при високих температурах і напругах.

Вплив дисперсно зміцнювальних часток, таких як карбіди титану (TiC), на високотемпературні властивості сплавів детально досліджувався в наукових роботах. Зокрема, модифікація частками TiB шляхом механічного холодного та гарячого пресування дозволила збільшити енергію активації пластичної деформації.

Особливу увагу варто приділити дослідженням, присвяченим впливу легуючих елементів на пластичність титанових сплавів, де було показано, що збільшення вмісту Al може призводити до зниження пластичності сплавів, особливо при високих температурах.

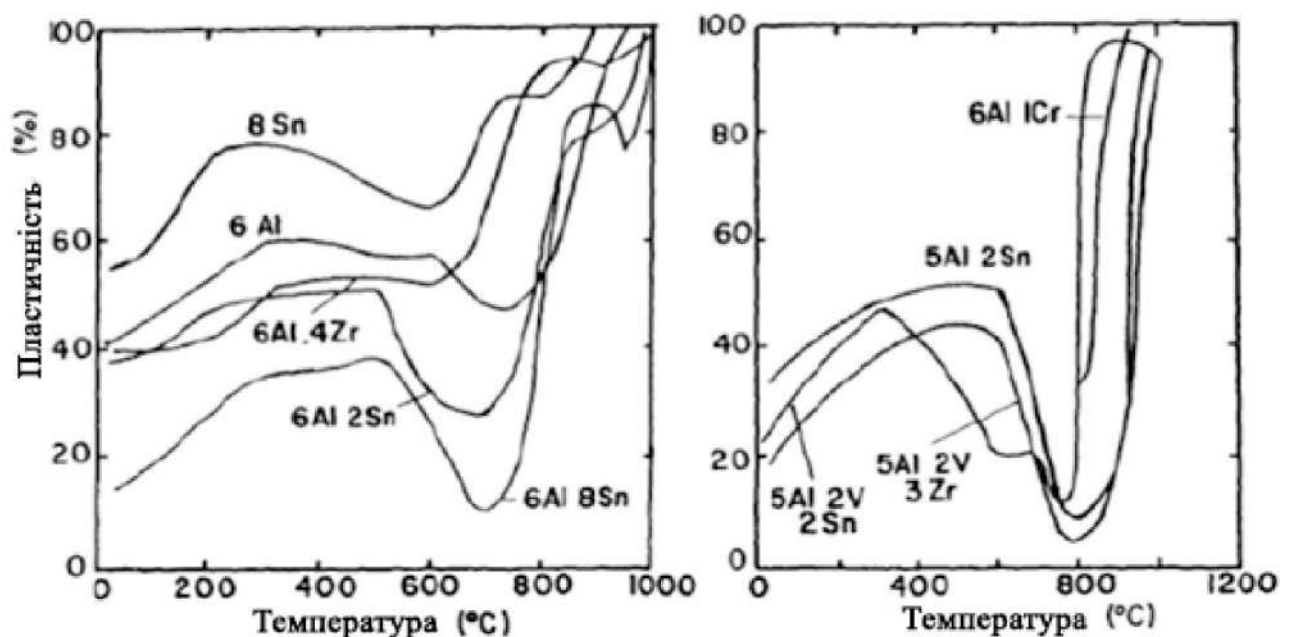


Рисунок 1.6 - Залежність пластичності від хімічного складу сплавів

Перспективи підвищення робочої температури титанових сплавів залишаються обмеженими, особливо вище температури 620°C, де відбувається зміна механізму окиснення α -фази титану. При цій температурі кисень активно проникає через оксидну плівку, дифундуючи в глиб матеріалу та негативно впливаючи на його властивості. Легування з метою стримування проникаючого окиснення майже вичерпало свої можливості, а захисні покриття при таких температурах часто виявляються неефективними через їх розчинення в матеріалі деталей або втрату через ерозійне зношування. Існує певна невизначеність щодо використання та ефективності захисних покриттів при високих температурах [7].

Через зазначені обмеження основний фокус пошуку нових жароміцних композицій зсувається у бік дослідження властивостей інтерметалідів титану. Інтерметаліди можуть пропонувати високу жаростійкість та інші бажані властивості, які є ключовими для застосування в умовах високих температур.

1.3 Вибір термічної обробки для деталей ГТД з двофазних титанових сплавів

Термічна обробка двофазних ($\alpha+\beta$) титанових сплавів дає можливість значно підвищити їхню міцність. Для сплаву BT3-1 оптимальний режим термічної обробки передбачає гартування у воду з температури 850-880°C, за яким слідує старіння при 550°C протягом 5 годин з охолодженням на повітрі. Для сплаву BT8 оптимальний режим включає гартування у воду з температури 920°C і старіння при 550°C протягом 6 годин. BT9 потребує гартування з температури 925°C і старіння при 570°C протягом 2 годин.

Дослідження впливу зміцнювальної термічної обробки на механічні властивості та структуру сплаву BT3-1 виявили, що ефект зміцнення при

короткочасних випробуваннях зберігається до 500°C і становить 25-30% порівняно з ізотермічним відпалом. При 600°C межа міцності загартованого і зістареного матеріалу дорівнює межі міцності відпаленого матеріалу. Тривала міцність за 100 годин збільшується на 30% при 300°C , на 25% при 400°C , і на 15% при 450°C .

Зі зростанням терміну служби від 100 до 2000 годин тривала міцність при 300°C майже не змінюється, як після ізотермічного відпалу, так і після загартування та старіння. При 400°C загартований і зістарений матеріал зазнає більшого знеміцнення, ніж відпалений, проте абсолютні значення тривалої міцності за 2000 годин у загартованих та зістарених зразків вище, ніж у відпалених. При 450°C тривала міцність різко знижується, і переваги від термічного зміцнення зникають при випробуванні протягом 2000 годин.

Отже, зміцнювальний режим термічної обробки ефективно підвищує міцність титанових сплавів, особливо при короткочасних і середньотермінових режимах експлуатації. Втім, при довготривалих режимах на більш високих температурах його ефективність знижується.

При випробуванні сплаву на повзучість після зміцнювальної термічної обробки також спостерігається певний вплив. Межа повзучості при 300°C після такої обробки вища на 30%, а при 400°C — на 20%, порівняно з відпаленим матеріалом. Проте, при 450°C межа повзучості в загартованого і зістареного матеріалу навіть нижча, ніж у відпаленого.

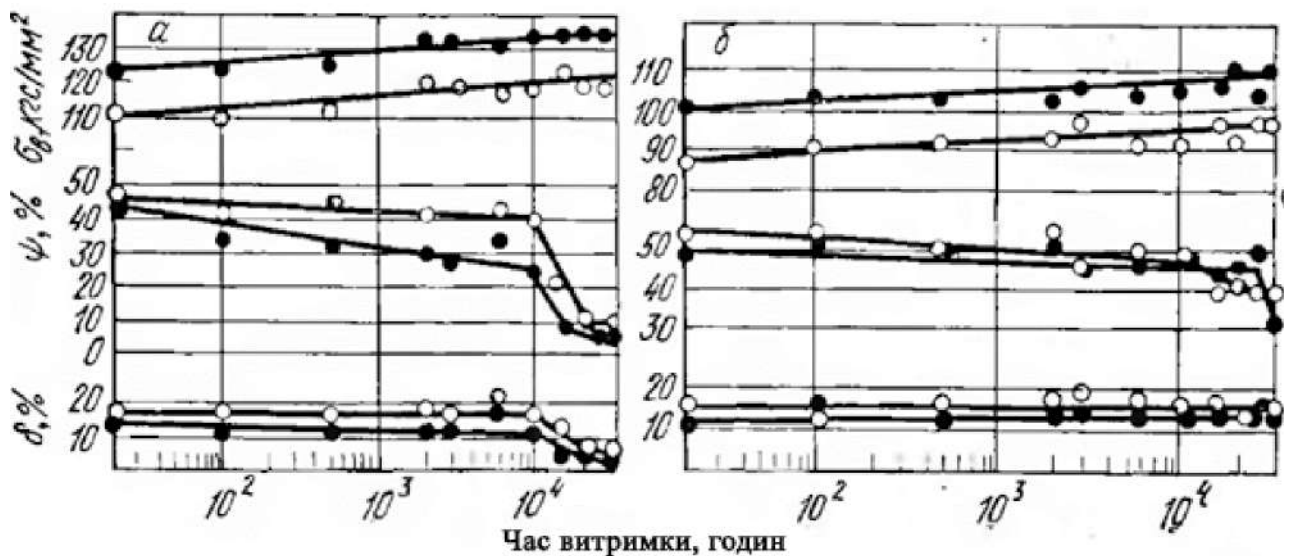
Також відмічається підвищення витривалості гладких зразків при 20 і 400°C на 15-20% після загартування і старіння. Однак важливо відзначити, що після такої термічної обробки сплав виявляє більшу вібраційну чутливість до надрізів. Коефіцієнт вібраційної чутливості до надрізу для загартованого і зістареного сплаву становить 1,45, що вище, ніж після ізотермічного відпалу (1,25).

Ці результати свідчать про те, що зміцнювальна термічна обробка може значно підвищити механічні властивості сплавів, особливо при низьких та середніх температурах. Водночас, при вищих температурах, особливо

близько 450°C, ефективність термічної обробки може знижуватися, а також збільшуватися чутливість матеріалу до впливу надрізів.

Після тривалого періоду витримки (до 30000 годин) при 400°C і випробування зразків при 20°C, спостерігається збереження пластичних властивостей сплаву у відпаленому стані на рівні початкового матеріалу. Це демонструє, що пластичність сплаву не піддається значному впливу внаслідок тривалої витримки при цій температурі. У сплаві, який зазнав зміцнювальної термічної обробки, відбувається незначне зниження поперечного звуження та ударної в'язкості, але їх абсолютні значення залишаються високими ($\psi=25\%$ і $KCU=30$ Дж/см²) навіть після 30000 годин витримки.

Однак, з підвищенням температури витримки до 450°C, відбувається зниження пластичності в сплаві, який зазнав зміцнення після 20000 годин витримки, зокрема, поперечне звуження знижується з 25% до 15%. Зразки, які були витримані 30000 годин при 400°C та випробувані при тій же температурі, показують вищі значення міцності порівняно з вихідним станом до нагрівання, зі збереженням пластичності.



а — випробування при 20° С; б - при 400° С; ○ - ізотермічне відпалення,

• — гартування + старіння

Рисунок 1.10 - Властивості сплаву ВТЗ-1 після нагрівання протягом 30 000 год при 400° С:

Ці результати свідчать про те, що термічна обробка може підвищити міцність сплаву, але при вищих температурах і тривалій витримці може відбуватися зниження пластичних властивостей. Це важливо враховувати при виборі режимів термічної обробки та їх впливу на довготривалу експлуатацію сплавів.

На основі представлених даних, у таблиці 1.3 узагальнено рівень механічних властивостей сплаву ВТЗ-1 при 20°С та 400°С після двох різних режимів термічної обробки, а також після додаткової витримки зразків протягом 2000 годин при 400°С. Важливо зазначити, що витримка зразків відбувалася як без прикладення напруги, так і під граничною напругою, яка становила 750 МПа для відпалених зразків та 850 МПа для загартованих і зістарених.

Ці дані дозволяють оцінити зміни в механічних властивостях сплаву внаслідок різних режимів термічної обробки, а також вплив тривалої витримки під високими температурами та напругами. Зокрема, можна аналізувати, як змінюється міцність, пластичність, ударна в'язкість та інші характеристики сплаву, що є критичними для його застосування в різних умовах експлуатації.

Таблиця 1.3 - Механічні властивості сплаву ВТЗ-1 після двох режимів термічної обробки

Властивості	Стан матеріалу	Без напруги при 20 °С	Під напруженням 750-850 МПа при температурі	
			400 °С	20 °С
σ_b , МПа	Відпал	1100	900	1200
	гартування+старіння	1300	1000	1400
δ , %	Відпал	12	12	12

	гартування+старіння	8	8	6
ψ , %	Відпал	35	45	35
	гартування+старіння	20	35	20
КСУ Дж/см ²	Відпал	35	-	-
	гартування+старіння	25	-	-

Рентгеноструктурний фазовий аналіз та електронноструктурне мікродослідження виявили, що зміцнення двофазних ($\alpha+\beta$) титанових сплавів під час термічної обробки відбувається завдяки формуванню метастабільних фаз (β -, α'' - і α' -фаз) при гартуванні, а також розпаду цих фаз при старінні, що призводить до утворення дисперсних часток α - і β -фаз. Це дозволяє зміцнити матеріал, забезпечуючи йому більшу міцність та витривалість.

Цікаво, що спостерігається значне підвищення тривалої міцності сплаву ВТЗ-1 після витримки зразків при менших навантаженнях. Зразки, що витримували навантаження 800 МПа при 400°C, руйнувалися швидко, але після попередньої 1500 годин витримки при 730 МПа вони змогли витримати 800 МПа протягом 2800 годин. Це вказує на можливість розробки спеціального режиму термічної обробки під напруженням для підвищення тривалої міцності.

Зміцнювальна термічна обробка може бути застосована до деталей, які працюють при температурах до 400°C. Для деталей, виготовлених зі сплавів ВТ8 і ВТ9, що експлуатуються при температурах до 400-500°C, також можлива зміцнювальна термічна та термомеханічна обробка, яка може підвищити показники міцності та жароміцні властивості цих сплавів, аналогічно до сплаву ВТЗ-1.

Загалом, підвищення міцності твердорозчинних сплавів досягається через легування, що зміцнює α - і β -тверді розчини, а також через дисперсійне зміцнення суміші α - і β -фаз в процесі термічної обробки, що включає загартування та старіння.

Максимальна міцність у відпалених сплавах досягається тоді, коли склад сплаву забезпечує приблизно рівну кількість α - і β -фаз. Це пояснюється

максимальною гетерогенізацією мікро- та макроструктури. Така гетерогенна структура забезпечує баланс між різними фазами, що сприяє підвищенню міцності сплаву.

У сплавів у загартованому й зістареному стані максимум міцності спостерігається у сплавах зі складом, що наближається до критичного. У цьому випадку формується максимальний обсяг дисперсних складових. Міцність цих сплавів забезпечується через комбінацію різних механізмів зміцнення, що включають дисперсне зміцнення, гетерогенізацію структури, а також вплив легуючих елементів.

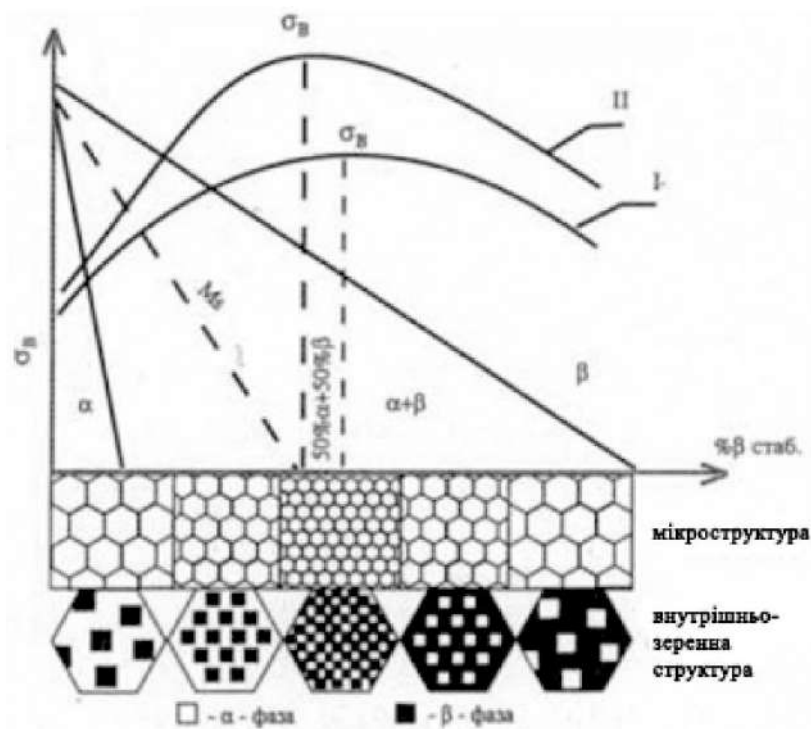


Рисунок 1.11 - Схематичний зв'язок між вмістом β -стабілізуючих елементів, термічною обробкою й структурою твердорозчинних ($\alpha+\beta$)-титанових сплавів [Error! Reference source not found.]

Серед сплавів, які є найбільш здатними до зміцнення, відзначаються $\alpha+\beta$ -титанові сплави з коефіцієнтом стабілізації β -фази (K_β) у діапазоні від 0,8 до 1,4. До таких сплавів відносяться ВТ16 ($K_\beta = 0,8$), ВТ23 ($K_\beta = 0,8$), ВТ22 ($K_\beta = 1,05$), ВТ35 ($K_\beta = 1,45$) та інші.

Рисунок 1.12 ілюструє можливість отримання високої міцності у титановому сплаві перехідного типу VT22 (для прутка діаметром 20 мм). Це демонструє, що правильно підібраний склад сплаву та оптимізований режим термічної обробки можуть значно підвищити міцність титанових сплавів, що є важливим для їх застосування в вимогливих умовах.

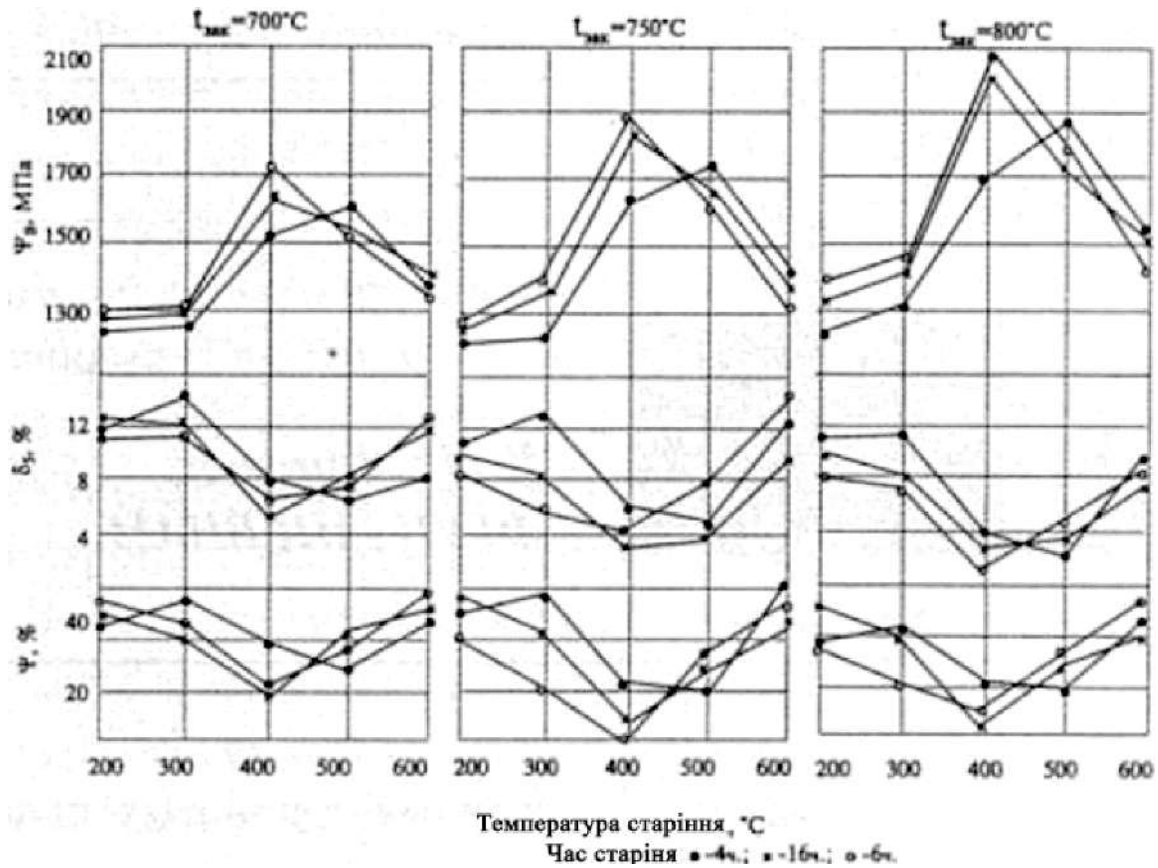


Рисунок 1.12 - Механічні властивості сплаву VT22 (пруток Ø20 мм) після різних режимів зміцнювальної термічної обробки

Із наведених даних випливає, що титанові сплави перехідного типу, такі як VT22, можуть досягти високих рівнів міцності, навіть до 2000 МПа. Однак це супроводжується значним зниженням пластичності, що є типовим для високоміцних сплавів. З підвищенням міцності сплавів спостерігається також зростання чутливості до концентраторів напружень та зниження тріщиностійкості.

Ця тенденція є загальною для всіх титанових сплавів і становить основну проблему при розробці та використанні високоміцних титанових

сплавів. Суттєве зниження пластичних характеристик і тріщиностійкості може обмежувати застосування таких сплавів в деяких інженерних додатках, де висока міцність має балансуватися з достатньою пластичністю та стійкістю до тріщин.

Зв'язок між високою міцністю та характеристиками пластичності, тріщиностійкості та чутливості до концентраторів напружень чітко проілюстровано на рисунках 1.13 і 1.14. Ці дані надають цінну інформацію для розробників та інженерів, що працюють з титановими сплавами, оскільки дозволяють зрозуміти компроміси між різними механічними властивостями та вибрати найбільш підходящий сплав для конкретного застосування.

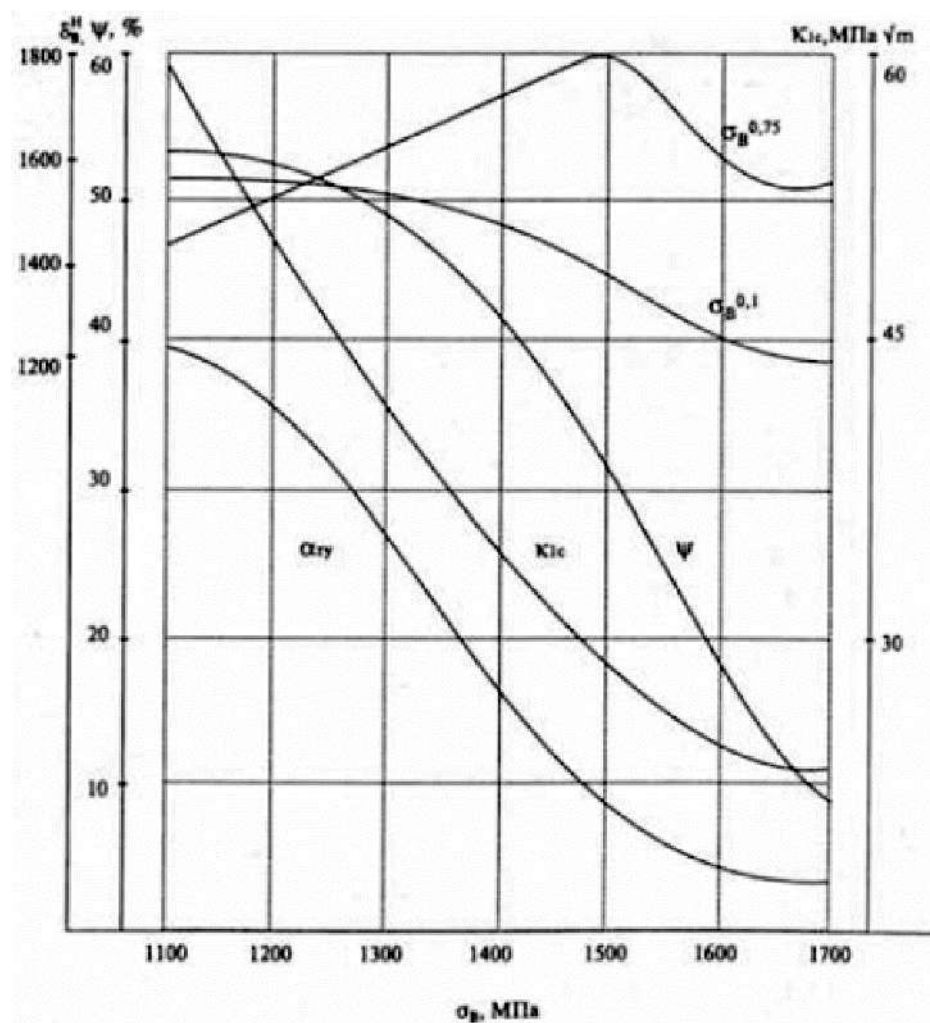


Рисунок 1.13 - Зв'язок межі міцності, отриманої термічною обробкою, з іншими механічними властивостями титанового сплаву BT22

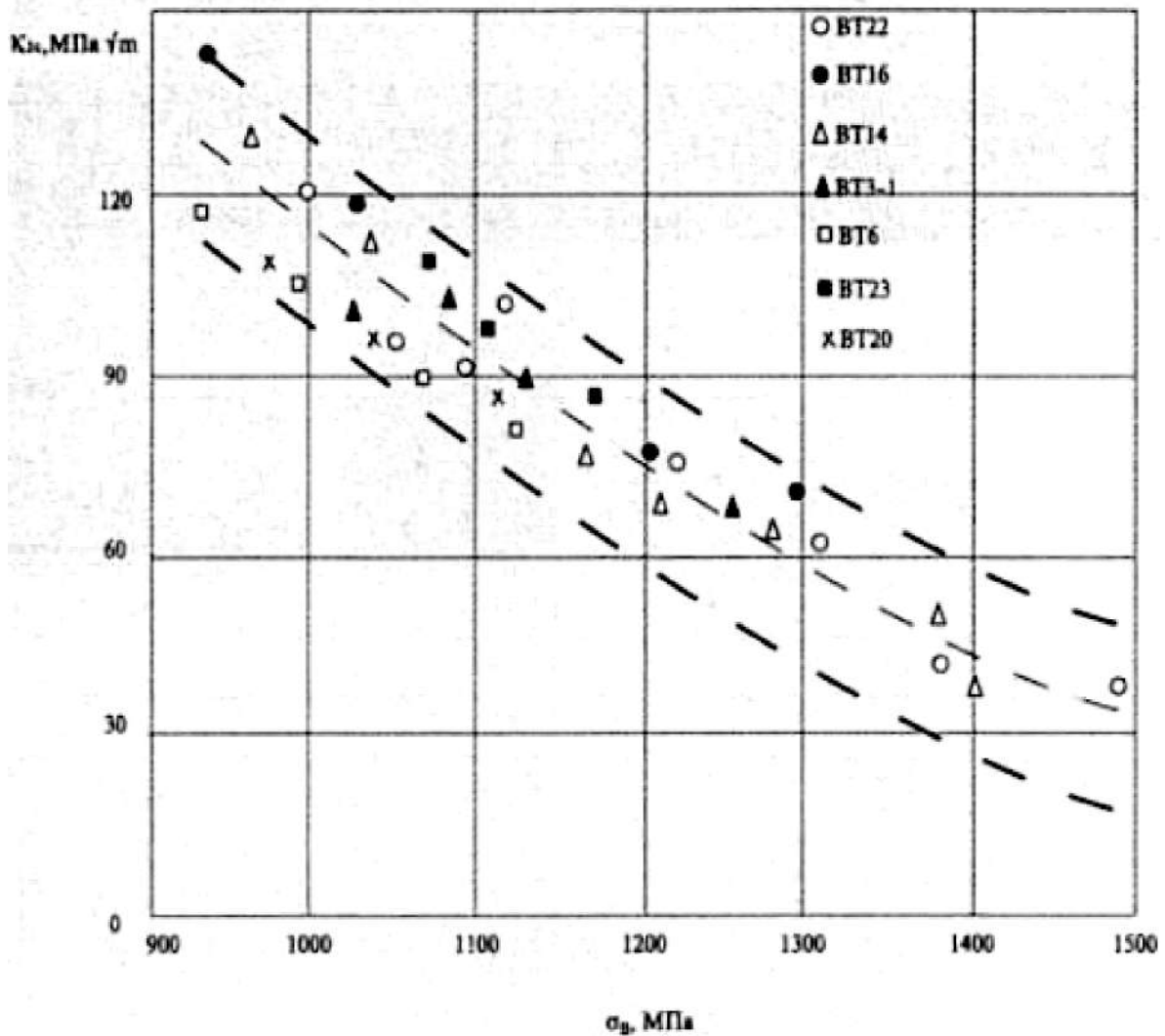


Рисунок 1.14 - Залежність в'язкості руйнування різних титанових сплавів від рівня міцності

Питання вибору критеріїв для використання сплавів з різними рівнями міцності у конструкціях авіакосмічної техніки є складним і багатогранним. Важливо враховувати умови роботи виробу, досвід експлуатації аналогічних виробів, а також інші фактори, включаючи пластичність, тріщиностійкість та чутливість до концентраторів напружень.

Оцінка характеристик міцності, пластичності та інших службових характеристик титанових сплавів дозволяє зрозуміти, як вони впливають на ресурс та надійність конструкції. Важливою характеристикою високоміцних титанових сплавів є їх прогартовуємість, яка визначає здатність сплаву

зміцнюватись до потрібного рівня в певному перерізі через гартування та старіння.

Прогартовуємість твердорозчинних ($\alpha+\beta$) титанових сплавів залежить від різних факторів, включаючи легування сплаву β -стабілізуючими елементами, температуру та тривалість гартування та старіння. На рисунку 1.15 представлено залежність між перерізом, який може бути прогартований, і вмістом β -стабілізуючих елементів, виражених через коефіцієнт K_β , при досягненні рівня міцності, заданого технічною документацією.

Це вказує на необхідність детального аналізу характеристик сплаву та умов його використання для досягнення оптимального балансу між міцністю, пластичністю та іншими службовими характеристиками.

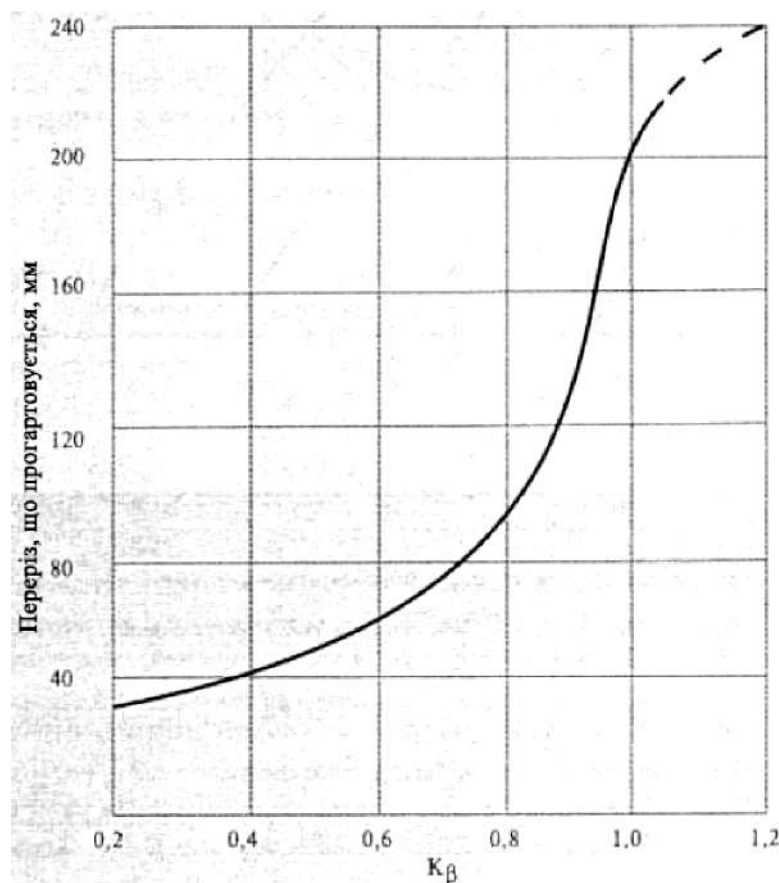


Рисунок 1.15 - Залежність прогартованості від коефіцієнта стабілізації β -фази (K_β).

У титанових сплавах з коефіцієнтом стабілізації β -фази (K_β) більше 1,0, збільшений вміст β -стабілізуючих елементів сприяє збереженню β -фази при всіх швидкостях охолодження. Це створює умови для впровадження технологічного процесу зміцнювальної термічної обробки без необхідності швидкого переносу деталей у гартівне середовище. Таким чином, метастабільна β -фаза може зберігатися при швидкостях охолодження від 5 до 10°C за хвилину, що є порівнянною з швидкістю охолодження чавунної садки разом з піччю.

Наступне старіння сприяє підвищенню міцності металу, як, наприклад, у випадку зі сплавом BT22, де міцність може досягти 1150-1250 МПа. Така технологія дозволяє виготовляти великогабаритні та нежорсткі авіаційні конструкції, включаючи зварені, здійснюючи зміцнювальну термічну обробку в печах із захисною атмосферою. Це забезпечує вироби, які не окислюються і не піддаються коробленню.

Практика показала, що конструкції, виготовлені за цією технологією, мають збільшений ресурс і надійність. Однією з причин цього є усунення залишкових напружень, які можуть виникати в процесі виробництва. Таким чином, зміцнювальна термічна обробка відіграє ключову роль у підвищенні експлуатаційних характеристик авіаційних титанових конструкцій.

1.4 Особливості структури двохфазних титанових сплавів у залежності від рівня легування та режимів термічної обробки

Титанові сплави значно відрізняються від сталі у способах формування їх структури. У титанових сплавах структура формується в процесі гарячої деформації, і важливо зазначити, що перегріта структура не виправляється шляхом термічної обробки. Такий факт робить важливим правильне

управління термомеханічними режимами деформування під час виготовлення напівфабрикатів з титанових сплавів.

У процесі дослідження та розробки технологій виготовлення напівфабрикатів з титанових сплавів було виявлено велике різноманіття можливих структур, які залежать від умов деформації. Це різноманіття структур приводить до різних механічних властивостей матеріалів.

Аналіз та порівняльне дослідження структури й механічних властивостей залежно від умов деформації, проведені О. П. Солониною, дозволили класифікувати мікроструктуру титанових сплавів на три типи. Ця класифікація лежить в основі розробки спеціальних шкал для оцінки структури напівфабрикатів.

Перший тип мікроструктури, так звана рівновісна $\alpha+\beta$ структура, являє собою рівномірно розподілену суміш первинної α -фази (світлі ділянки) і суміші α - і β -фаз (темні ділянки). Ця структура формується при деформації сплавів у двофазній $\alpha+\beta$ -області при температурах на 30-50°C нижче їхньої температури поліморфного перетворення. Забезпечення оптимальної структури важливе для забезпечення потрібних механічних властивостей та якості кінцевого продукту.

В процесі виготовлення напівфабрикатів з титанових сплавів особлива увага приділяється термомеханічним режимам деформування матеріалу, оскільки структура титанових сплавів відрізняється від сталевих та формується під час гарячої деформації. Важливо зазначити, що перегріта структура у титанових сплавах не виправляється термічною обробкою. Таким чином, термомеханічні режими деформування відіграють ключову роль у формуванні бажаної структури та властивостей кінцевого продукту.

Різні типи структур титанових сплавів, які формуються в результаті гарячої деформації, впливають на їх механічні властивості (рис. 1.16):

- Тип I: Рівновісна $\alpha+\beta$ структура, яка утворюється при деформації в двофазній $\alpha+\beta$ -області. Це рівномірна суміш первинної α -фази та суміші α - і β -фаз.

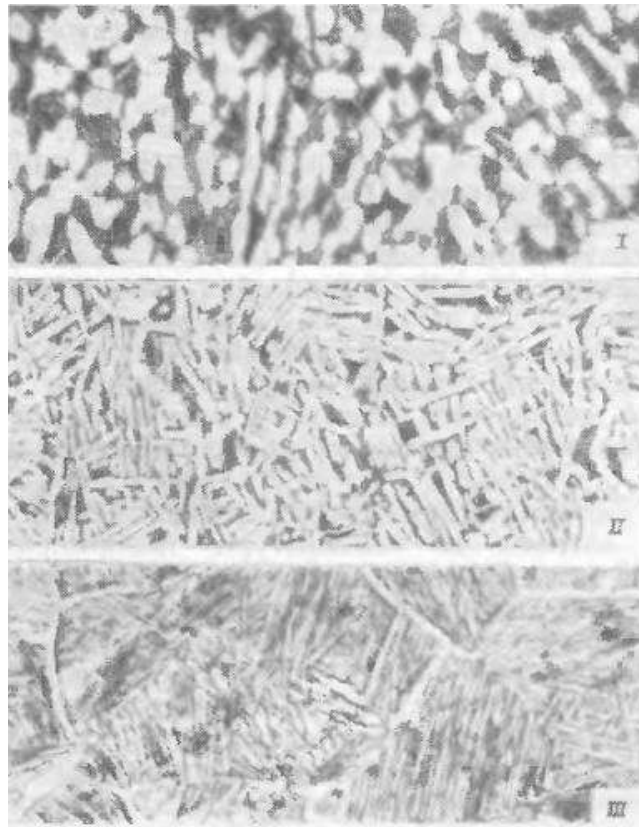


Рисунок 1.16 - Основні типи мікроструктур двофазних титанових сплавів, отриманої в різних умовах деформації (I тип — рівновісна $\alpha+\beta$; II тип — кошикового плетива; III тип — грубогольчаста)

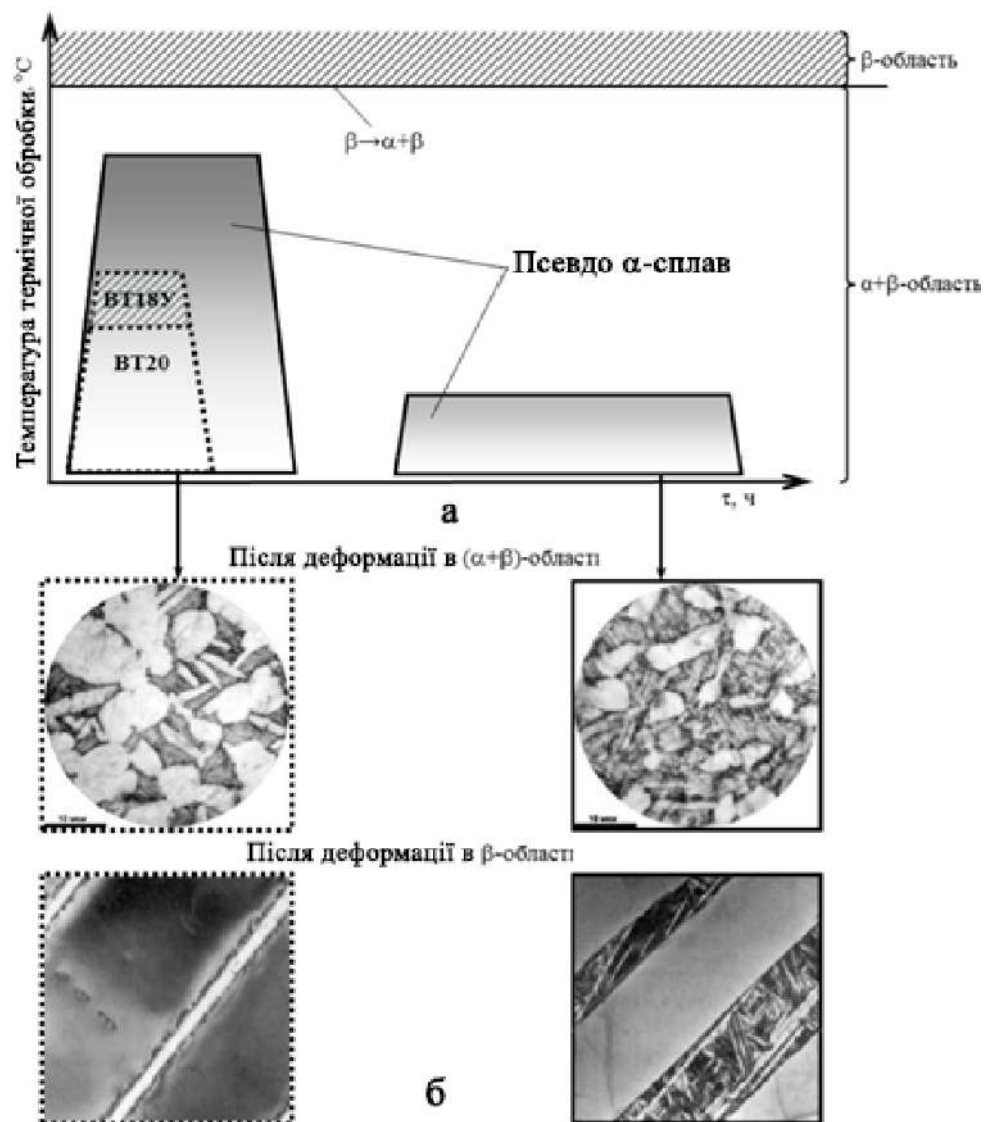
- Тип II: Структура кошикового плетива, що формується при нагріванні металу в β -області та завершенні деформації в $(\alpha+\beta)$ -області. Характеризується пластинчастою будовою типу кошикового плетива.

- Тип III: Структура з крупними зернами первинної β -фази, яка виникає при недостатньому переробленні литої структури.

Впровадження сучасних технологічних процесів, таких як ВТМО (високотемпературна термомеханічна обробка) та ізотермічне деформування, дозволяє краще контролювати структуру титанових сплавів. ВТМО передбачає фіксацію структури шляхом гартування у воді безпосередньо після деформації, зберігаючи спрямованість структури. Ізотермічне деформування забезпечує однорідний прогрів матеріалу, що сприяє подрібнюванню структури.

Застосування подвійного відпалу забезпечує комбінацію твердорозчинного й дисперсійного зміцнення, що може значно підвищити міцнісні характеристики сплавів, особливо тих, що містять ізоморфні β -стабілізатори та кремній. Режими такої термічної обробки підбираються таким чином, щоб на першому етапі досягти максимального твердорозчинного зміцнення, а на другому етапі — дисперсійного зміцнення.

Такі технологічні підходи дозволяють оптимізувати властивості титанових сплавів, що є критично важливим для їх застосування у високотехнологічних галузях, таких як авіаційна промисловість.



■ ■ ■ ■ - серійний режим відпалу; — - подвійний відпал

Рисунок 1.17 - Режими термічної обробки (а) і типи мікроструктур (б)

При термічній обробці титанових сплавів за режимом подвійного відпалу одним з ключових факторів, що впливає на формування мікроструктури та відповідні механічні властивості, є швидкість охолодження напівфабрикату після першого ступеня відпалу. Швидкість охолодження може значно впливати на процеси рекристалізації та фазових перетворень у сплаві, тим самим визначаючи його кінцеві властивості.

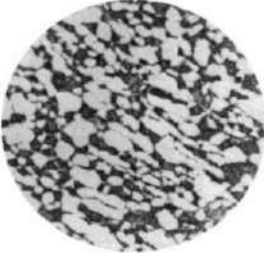
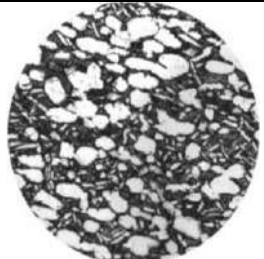
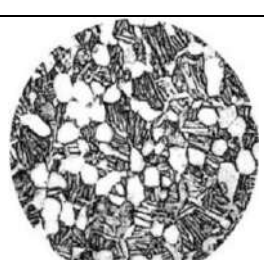
Як приклад розглянемо випадок застосування подвійного відпалу у порівнянні з одноступінчастим або традиційним процесом термомеханічної обробки (ТМО) для кувань (штампувань) масою 2-2,3 кг та перетином 15-25 мм із сплаву ВТ20. Ці кування були отримані шляхом осадження вихідного катаного прутка у температурних умовах ($\alpha+\beta$)-області, що є оптимальними для цього типу сплаву.

Узагальнені результати випробувань зразків, вирізаних уздовж і поперек волокна напівфабрикатів, були наведені в таблиці 1.4. Ці дані важливі для оцінки ефективності різних режимів термічної обробки, оскільки демонструють вплив технологічних параметрів на якість та властивості готових виробів.

Такий підхід до обробки титанових сплавів дозволяє досягти оптимального балансу між міцністю та пластичністю, що є критично важливим для виробів, які використовуються в авіаційній та аерокосмічній промисловості. Вибір оптимального режиму термічної обробки може значно покращити експлуатаційні характеристики титанових деталей, забезпечуючи їх надійність та довговічність.

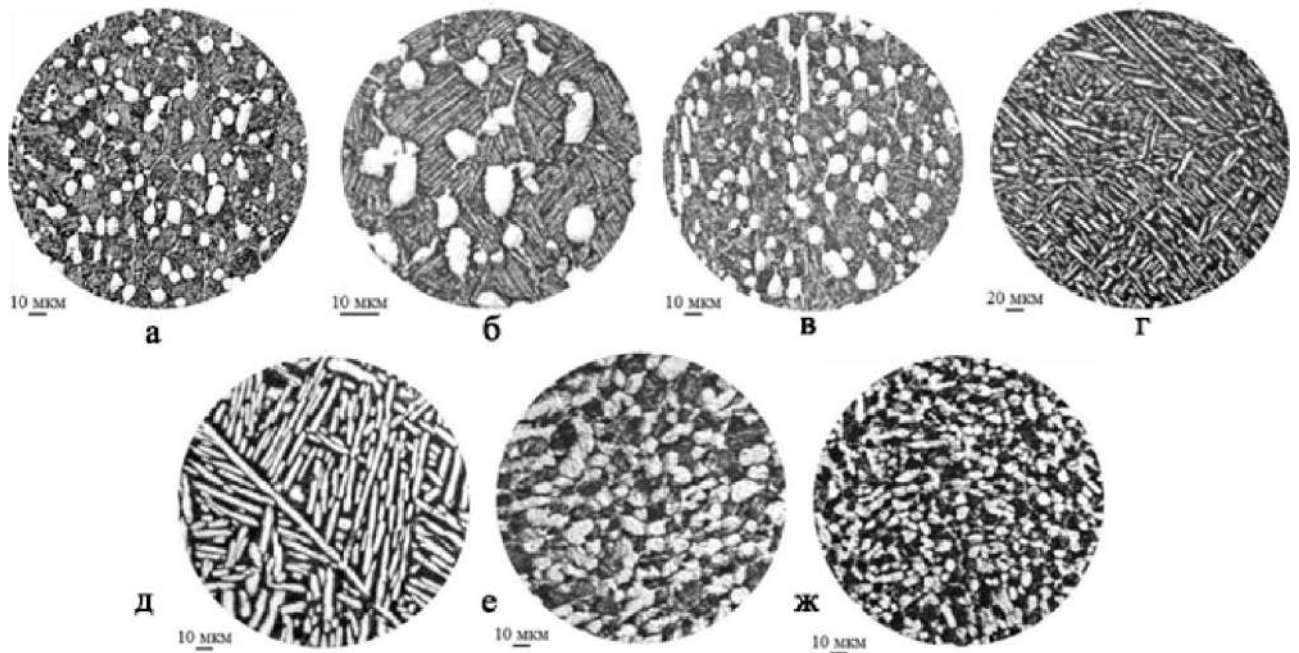
З даних таблиці 1.4 можна зробити висновок, що застосування подвійного відпалу для сплаву ВТ20 підвищує міцнісні характеристики поковок, хоча це супроводжується деяким зниженням показників відносного звуження. Це свідчить про те, що подвійний відпал може бути ефективним способом підвищення міцності сплавів, але при цьому може знижуватись їхня пластичність.

Таблиця 1.4 - Порівняльні властивості кувань зі сплаву ВТ20

Вид обробки	Мікроструктура	σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	$\sigma_B^{500^\circ}$
		МПа		%		МПа
Одноступінчастий відпал (серійний режим)		980-1020	895-975	14-17,2	48,7-55,4	675-715
Термомеханічна обробка (ТМО)		1000-1080	930-980	12-16,8	46,2-53	700-745
Подвійний відпал		1045-1110	915-985	13,6-18	38,4-43,3	720-750

Мікроструктура кувань із дослідженого сплаву ВТ20, оброблених за різними технологічними схемами після подвійного відпалу, показує важливість та вплив термічної обробки на структуру та властивості титанових сплавів. Для порівняння, на рисунку 1.19 були наведені типові структури жароміцних ($\alpha+\beta$)-титанових сплавів ВТ8-1 і ВТ25У у відпаленому стані. Аналіз цих структур дає можливість краще зрозуміти вплив конкретних умов термічної обробки на кінцеві властивості титанових сплавів.

Застосування різних технологічних процесів, таких як подвійний відпал, надає можливість оптимізувати структуру та міцнісні характеристики сплавів, що має ключове значення для їх використання в виробках з високими вимогами до міцності та довговічності, особливо у сфері авіаційної та аерокосмічної промисловості.



а, б - після деформації в $(\alpha+\beta)$ -області (поперечний напрямок волокна); в - після деформації в $(\alpha+\beta)$ -області (довжній напрямок волокна); г, д - після деформації в β -області (поперечний напрямок волокна); е - типова структура штампування зі сплаву ВТ8-1; ж - типова структура штампування зі сплаву ВТ25В

Рисунок 1.19 - Мікроструктури титанових сплавів, отримані методом оптичної мікроскопії

Мікроструктура поковки з псевдо α -сплаву, яка була піддана деформації в $(\alpha+\beta)$ -області та подвійному відпалу, характеризується високою дисперсністю складових елементів. Глобулі первинної α -фази та пластинки вторинної α -фази, що визначають мікроструктуру, займають проміжне положення між такими $(\alpha+\beta)$ -титановими сплавами, як ВТ8-1 і ВТ25В. Це є результатом обраної композиції сплаву, яка впливає на процеси фазових перетворень та структуроутворення.

Мікроструктури досліджуваних поковок, які були отримані за допомогою растрового електронного мікроскопа, представлені на рисунку 1.20. Ці зображення дають змогу візуально оцінити міру дисперсності та

однорідності мікроструктури, що є важливими параметрами для забезпечення бажаних механічних властивостей сплаву.

Висока дисперсність вторинної α -фази після подвійного відпалу забезпечує значне підвищення міцності матеріалу поковки. Це дозволяє досягати високих рівнів тривалої міцності, особливо важливих для виробів, які експлуатуються в умовах високих температур та механічних навантажень. Дані про тривалу міцність кувань із досліджуваного сплаву після $(\alpha+\beta)$ -деформації та подвійного відпалу при 550°C представлені на рисунку 1.21. Ці дані підтверджують ефективність вибраного режиму термічної обробки та показують потенціал сплаву для використання в виробництві складних високотехнологічних виробів.

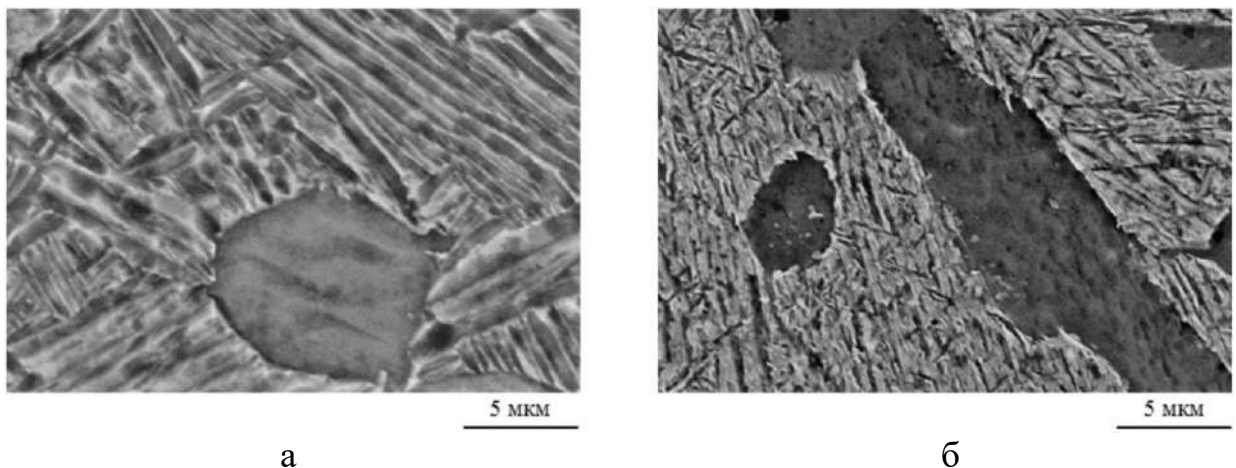


Рисунок 1.20 - Мікроструктура кування після деформації в $(\alpha+\beta)$ -області й подвійного відпалу (а) і деформації в β -області й подвійного відпалу (б)

Після β -деформації досліджуваного сплаву спостерігається, що його тривала міцність стає порівнянною з міцністю сплаву ВТ18У за аналогічних умов випробувань. Це підкреслює, що структура, яка формується в результаті β -деформації, має значний вплив на механічні властивості титанових сплавів.

Отримання оптимальної структури титанових сплавів є ключовим для забезпечення їх високих експлуатаційних характеристик. Оскільки титанові сплави широко використовуються в авіаційній, космічній і медичній

індустріях, де важливими є міцність, надійність і тривалий термін служби, важливо ретельно підходити до вибору та оптимізації технологічних процесів.

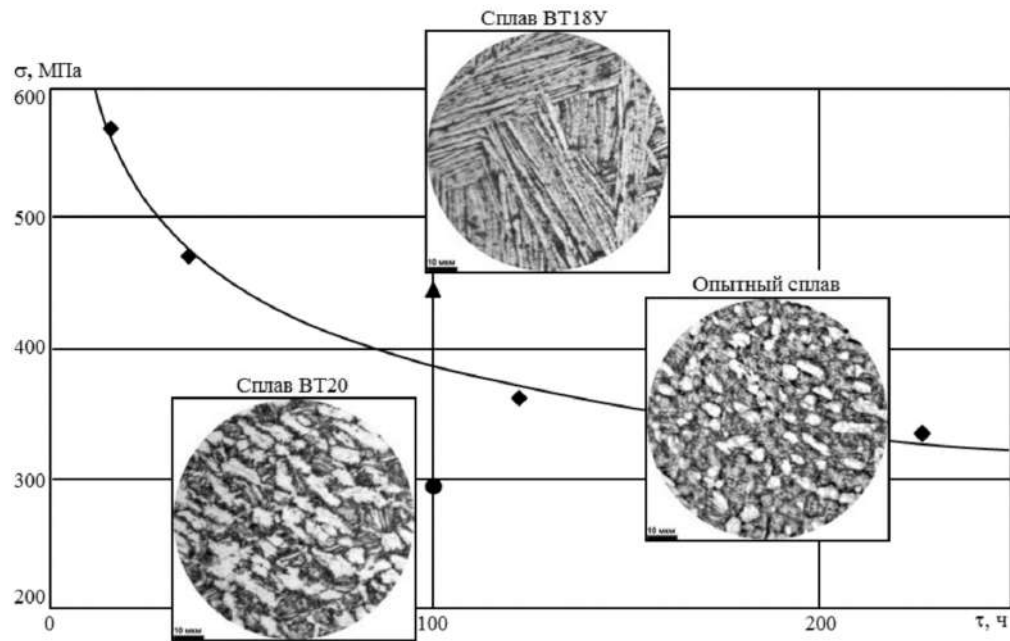


Рисунок 1.21 - Тривала міцність жароміцних псевдо- α -титанових сплавів після деформації в $(\alpha+\beta)$ -області й подвійного відпалу при температурі 550°C

Технологія термічної обробки, включаючи вибір температурних режимів, швидкості охолодження та часу витримки, відіграє вирішальну роль у формуванні кінцевої структури титанових сплавів. Правильний вибір цих параметрів дозволяє не тільки забезпечити необхідні міцнісні характеристики, але й оптимізувати інші важливі властивості, такі як пластичність, втомна міцність та корозійна стійкість.

Таким чином, усебічне розуміння впливу мікроструктури на експлуатаційні характеристики є критично важливим при розробці та застосуванні титанових сплавів в різноманітних галузях промисловості.

2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Матеріали дослідження

Сплав ВТ6 є одним з найбільш відомих та широко використовуваних титанових сплавів, особливо в авіаційній та космічній промисловості. Його популярність обумовлена відмінними механічними властивостями та гарною оброблюваністю, які роблять його ідеальним для виробництва великогабаритних зварних та збірних конструкцій літальних апаратів, балонів, що працюють під тиском, та інших конструктивних елементів.

Сплав ВТ6 класифікується як $(\alpha+\beta)$ -сплав із доброю деформацією в гарячому стані. Це означає, що він має дві фази – α (гексагональна щільноупакована) та β (кубічна об'ємноцентрована), які забезпечують йому гнучкість у виробничих процесах та високі експлуатаційні характеристики.

Особливістю сплаву ВТ6 є його здатність до зварювання різними методами, включаючи традиційні види зварки та дифузійну зварку. Зварний шов при цьому має міцність, яка практично дорівнює міцності основного матеріалу. Ця характеристика вигідно відрізняє ВТ6 від інших сплавів, таких як ВТ22, де зварні шви можуть бути слабшими за основний матеріал.

Хімічний склад сплаву ВТ6 зазвичай включає титан як основний елемент, алюміній і ванадій як основні легувальні елементи, а також може містити інші елементи в менших кількостях для досягнення специфічних властивостей.

Механічні властивості сплаву ВТ6 після термічної обробки, які могли би бути наведені в таблицях 2.1 та 2.2, можуть включати такі параметри, як міцність на розтяг, межу текучості, витривалість, ударну в'язкість, твердість тощо.

Сплав ВТ8 широко використовується в авіаційній промисловості, особливо для виготовлення деталей газотурбінних двигунів. Цей сплав

відомий своєю високою корозійною стійкістю і здатністю ефективно працювати при температурах до 480°C. Основною перевагою сплаву ВТ8 є його вищі жароміцні властивості в порівнянні зі сплавом ВТ6, що досягається за рахунок високого вмісту алюмінію і легування кремнієм. Цей сплав також перевершує сплави ВТ3-1 і ВТ9 по термічній стабільності, пластичності, технологічності та характеристиках тріщиностійкості.

Таблиця 2.1 – Хімічний склад, % (ГОСТ 19807 - 91)

Ti	Al	V	Zr	Si	Fe	O	H	N	C	Інші добавки
86,45 – 90,9	5,3 – 6,8	3,5 – 5,3	до 0,3	до 0,1	до 0,6	до 0,2	до 0,015	до 0,05	до 0,1	0,3

Таблиця 2.2 – Механічні властивості

Стан постачання	Термічна обробка	σ_{100}^{450} , МПа	$\sigma_{0,2/500}$, МПа	δ , %	КСУ, кДж/м ²
пруток	Ізотермічний відпал: нагрів до 800-875°C, охолодження з піччю до 550°C, витримка 2 год , охолодження на повітрі	570	220	8	392

Сплав ВТ8 термічно зміцнюється і задовільно деформується в гарячому стані. Однак його технологічні властивості при обробці тиском гірші, ніж у сплаву ВТ6, і зварювання сплаву не рекомендується. Хімічний склад і механічні властивості сплаву ВТ8 після термічної обробки можна знайти в відповідних таблицях.

В цілому, сплав ВТ8 є важливим матеріалом для авіаційної промисловості, зокрема у виробництві газотурбінних двигунів, завдяки своїм

унікальним властивостям, що включають високу жароміцність і корозійну стійкість.

Таблиця 2.3 – Хімічний склад, % (ГОСТ 19807 - 91)

Ti	Al	Mo	Zr	Si	Fe	O	H	N	C	Інші добавки
87,55- 90,9	5,8-7	2,8- 3,8	до 0,5	0,2- 0,4	до 0,3	до 0,15	до 0,015	до 0,05	до 0,1	0,3

Сплав ВТЗ-1 використовується для виготовлення кованих і штампованих деталей, призначених для роботи при температурах до 400°C (протягом 6000 годин) і до 450°C (протягом 2000 годин). Цей сплав належить до високоміцних мартенситних ($\alpha+\beta$)-сплавів системи Ti-Al-Mo-Cr-Fe-Si. В сплаві ВТЗ-1 алюміній зміцнює як α -, так і β -фази, при цьому знижуючи щільність сплаву. Легування хромом, залізом і кремнієм зміцнює обидві фази і підвищує жароміцні властивості при помірних температурах. Молібден не лише покращує жароміцні властивості сплаву, але й уповільнює евтектоїдний розпад β -фази, забезпечуючи термічну стабільність.

Таблиця 2.4 – Механічні властивості

Стан постачання	Термічна обробка	σ_{100}^{450} , МПа	$\sigma_{0,2/500}$, МПа	δ , %	КСУ, кДж/м ²
пруток	Подвійний відпал: нагрів до 920-950°C, охолодження аргоном, другий нагрів до 570-600°C, витримка 1 год, охолодження на повітрі	568	235	10	343

Сплав ВТЗ-1 ефективно деформується в гарячому стані і використовується для виробництва катаних, пресованих і кованих прутків, профілів, різних поковок і штампувань, а також смуг, плит, кілець гуркотів і, в дослідному порядку, труб. Сплав задовільно піддається всім видам зварювання, що використовуються для титану, і після зварювання вимагає проведення відпалу для відновлення пластичності зварного з'єднання.

Хімічний склад та механічні властивості сплаву ВТЗ-1 після термічної обробки наведено в табл. 2.5 та 2.6 відповідно.

Таблиця 2.5 – Хімічний склад, % (ГОСТ 19807 - 91)

Ti	Al	Mo	Zr	Si	Fe	O	H	N	C	Cr
85,95 – 91,05	5,5 – 7	2 - 3	до 0,5	0,15 – 0,4	0,2 – 0,7	до 0,15	до 0,015	до 0,05	до 0,1	0,8 - 2

Таблиця 2.6 – Механічні властивості

Стан постачання	Термічна обробка	σ_{100}^{450} , МПа	$\sigma_{0,2/500}$, МПа	δ , %	KCU, кДж/м ²
пруток	Ізотермічний відпал: нагрів до 870-920°C, витримка, охолодження з піччю до 550-600°C, витримка 2-5 год , охолодження на повітрі	510	195	7	294

2.2 Методи дослідження

2.2.1 Метод випробування твердості за Брінелем

При проведенні стандартного вимірювання твердості за методом Брінелля відповідно до ГОСТ 9012 – 59 «Метод измерения твёрдости по Бринеллю», використовується прилад типу ТШ-2. Цей прилад є поширеним в лабораторній практиці і дозволяє точно визначити твердість матеріалів за методом Брінелля.

2.2.2 Випробування на розтяг

Випробування на розтяг при кімнатних температурах проводяться відповідно до ГОСТ 1497 – 73 «Методы испытания на растяжение», тоді як для випробувань при підвищених температурах застосовують ГОСТ 9651 – 73 «Методы испытания на растяжение при повышенных температурах». Ці випробування дозволяють отримати інформацію про механічні властивості матеріалу, включаючи його границю міцності, пластичність, модуль пружності та інші характеристики, які мають велике значення при конструкторських розрахунках та оцінці придатності матеріалу для певних умов експлуатації.

2.2.3 Випробування на ударну в'язкість

Для визначення властивостей матеріалу під динамічним навантаженням застосовують випробування за ГОСТ 9454-78 «Методы

испытаний на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах». Під час цих випробувань використовують стандартний зразок 8 типу, параметри якого: загальна довжина L становить 55 мм, висота H - 10 мм, висота робочого перетину H_1 - 5 мм та ширина B - 10 мм. Ці випробування дозволяють оцінити поведінку матеріалу при ударному навантаженні, що є важливим для визначення його міцності, в'язкості та інших характеристик при різних температурах.

2.2.4 Випробування на повзучість

Стандартні випробування на повзучість при розтягуванні, визначені в ГОСТ 3248-81 «Метод испытания на ползучесть», спрямовані на встановлення границі повзучості матеріалу σ при певній температурі T . Під границею повзучості розуміють такий рівень напруження, за якого деформація δ досягається протягом заданого періоду часу τ . Це дозволяє оцінити, як матеріал буде поводити себе під тривалим навантаженням при високих температурах. Для проведення випробувань використовуються плоскі зразки з головками. Зразки мають розрахункову довжину 100 мм та загальну довжину 200 мм.

2.2.5 Випробування на довготривалу міцність

Випробування на довготривалу міцність, визначені в ГОСТ 10145-81 «Метод испытания на длительную прочность», спрямовані на встановлення границі довготривалої міцності або довговічності матеріалу. Цей вид випробувань важливий для оцінки стійкості матеріалів до руйнування при

тривалих статичних або повільно змінюваних навантаженнях, особливо в умовах, де елементи конструкцій піддаються тривалим напруженням.

Методика проведення цих випробувань схожа на методику випробувань на повзучість. Використовуються аналогічні схеми навантаження, зазвичай у вигляді розтягування, і ті ж випробувальні машини. Це забезпечує уніфікований підхід до випробувань і можливість порівнювати результати з іншими випробуваннями, заснованими на подібних принципах.

2.2.6 Дослідження мікроструктури

Мікроструктуру досліджували з допомогою оптичного мікроскопу Carl Zeiss. Це дозволило детально визначити характеристики структури цих сплавів. Перед дослідженням зразки проходили ретельну підготовку: їх шліфували і полірували для отримання гладкої поверхні і піддавали щавленню в спеціально підготовлених розчинах кислот.

3 ОЦІНКА ВПЛИВУ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ ТА ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ НА СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ

3.1 Вплив термічної обробки на структуру та властивості сплаву BT3-1

Для адекватної оцінки умов формування різних типів структури та встановлення їхнього впливу на властивості сплавів було проведено спеціальне дослідження. Основна увага була приділена вивченню структурної залежності від термообробки та її впливу на комплекс основних властивостей сплаву BT3-1, таких як механічні характеристики при кімнатній температурі, термічна стабільність, довготривала міцність, повзучість та витривалість.

Існують два режими термообробки, які сприятливо впливають на механічні та надійнісні характеристики двофазних титанових сплавів. Перший - це двоступінчастий відпал, який спрямований на створення глобулярно-пластинчастої мікроструктури з глобулярними частками α -фази, розподіленими у матриці α -пластин, що відокремлені β -прошарками, та зменшення кількості α -фази, що спричиняє крихкість. Другий режим - термоциклічна обробка (ТЦО), яка включає багаторазове нагрівання та охолодження металу без ізотермічних витримок, що охоплює поліморфне перетворення, в результаті якого формується полігональна структура.

Відпал титанових сплавів застосовують для вирівнювання структури та фазового складу, зниження міцності, підвищення пластичності, а також для усунення внутрішніх напружень. Відпал ($\alpha+\beta$)-сплавів поєднує елементи рекристалізаційних процесів і фазової перекристалізації. Залежно від технології проведення, розрізняють простий, ізотермічний та подвійний відпал. При виборі режимів відпалу для промислових титанових сплавів враховують чутливість до швидкості охолодження, перегріву, температуру рекристалізації, поліморфне перетворення, а також ризик окиснення при

нагріванні на повітрі. Сплав ВТЗ-1 чутливий до швидкості охолодження, тому для його охолодження з температури відпалу використовують контрольовані умови.

Також застосовують ступінчастий відпал, який може бути подвійним або ізотермічним, для забезпечення заданої структури та властивостей матеріалу.

Подвійний відпал включає нагрівання до температур вище рекристалізації, витримку, охолодження на повітрі, повторне нагрівання до певної температури, витримку та знову охолодження на повітрі. Ізотермічний відпал включає нагрівання вище температури рекристалізації, витримку, перенесення в піч із заданою температурою, витримку та охолодження на повітрі. Подвійний відпал забезпечує зростання міцності сплаву на 80–100 МПа порівняно з ізотермічним відпалом, трохи підвищуючи жароміцні властивості, зберігаючи термічну стабільність. Режими відпалу для титанових сплавів вибираються, зважаючи на оптимальне поєднання міцності, пластичності та стабільності фізико-механічних властивостей протягом експлуатації.

Нагрівання сплавів до температур вище повного поліморфного перетворення не бажане через ризик росту зерна та погіршення механічних властивостей. Така структура та властивості, як правило, не можуть бути поліпшені наступною термічною обробкою. Високі температури відпалу також призводять до утворення окисного шару. Температури рекристалізації для сплаву ВТЗ-1 коливаються від 880 до 950 °С, а температура повного поліморфного перетворення - від 960 до 1000 °С.

Дослідження впливу різних режимів відпалу на механічні характеристики зразків зі сплаву ВТЗ-1 показало важливість точного вибору умов термічної обробки для досягнення бажаних властивостей (табл. 3.1).

Зразки сплаву № 1 були відпалені при температурі 830 °С з подальшим охолодженням на повітрі. В результаті цього відпалу було досягнуто задовільні характеристики міцності та пластичності, які відповідають

стандартам і вимогам підприємства. Структура сплаву, що була отримана після такої обробки, повністю відповідає необхідним параметрам, підтверджуючи ефективність вибраного режиму термічної обробки.

Таблиця 3.1 Хімічний склад різних зразків ВТЗ-1

Легувальні елементи	Ti, %	Cr, %	Mo, %	Fe, %	Si, %	Al, %	інші, %
ГОСТ 19807-91	85,95-91,05	0,8-2	2-3	0,2-0,7	0,15-0,4	5,5-7	не більш 0,5
За даними вхідного контролю							
Зразок №1	89,02	1,49	2,23	0,40	0,39	6,47	-
Зразок №2	89,12	1,47	2,10	0,44	0,38	6,49	-
Зразок №3	89,23	1,88	2,51	0,37	0,33	5,68	-
Зразок №4	88,44	1,92	2,79	0,63	0,20	6,02	-

Цей підхід демонструє, як правильно підібрані умови термічної обробки можуть оптимізувати ключові характеристики титанових сплавів, забезпечуючи необхідний баланс між міцністю та пластичністю, що є критично важливим для виробничих потреб.

Таблиця 3.2 - Механічні властивості зразка №1 після відпалу

	σ_b , МПа	δ , %	ψ , %	КСУ, Дж/см ²	Діаметр відбитка по Бринелю, мм	Твердість по Бринелю, НВ, МПа
Зразок №1	1010	14,8	32,2	3,4	3,2	3630
	1012	15,0	32,6	3,3	3,2	3630
ОСТ 190000-70	1000-1200	8	20	3	3,2-3,7	3630-2690

При використанні стандартного відпалу при температурі 830 °С для сплаву ВТЗ-1 було виявлено значне знеміцнення матеріалу при експлуатації при температурах вище 200 °С. Це знеміцнення стає особливо помітним при тривалому використанні при температурах 300-450 °С, що свідчить про

недостатню термічну стабільність структури після такого відпалу. Тому цей метод відпалу не рекомендується для деталей, що працюють при високих температурах.

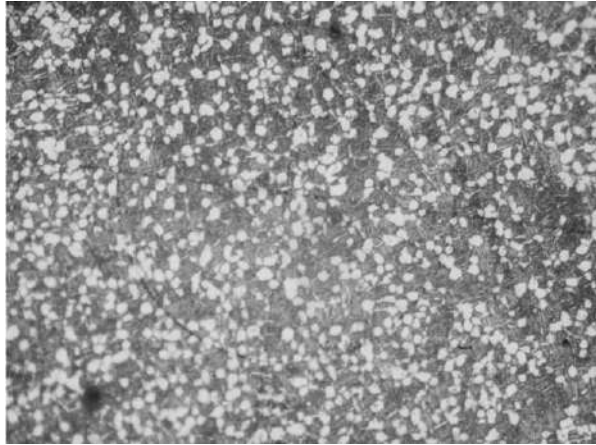


Рисунок 3.1 - Мікроструктура зразка № 1 після відпалу (x450)

Щодо зразків № 2, № 3, № 4, то їх було піддано ізотермічному відпалу. Важливим аспектом при визначенні параметрів ізотермічного відпалу є вибір правильної температури для першого ступеню обробки. Ця температура має бути вищою за температуру рекристалізації сплаву. Оскільки температура рекристалізації для ВТЗ-1 може варіюватися від 880 до 950 °С, в якості нижньої межі температури ізотермічного відпалу була обрана температура 900 °С. Це дозволяє забезпечити необхідні умови для ефективного відпалу з врахуванням вимог специфічного хімічного складу кожного зразка.

При визначенні верхньої границі температури ізотермічного відпалу для сплаву ВТЗ-1, важливо враховувати, що ця температура має бути нижчою за температуру поліморфного перетворення приблизно на 30 °С і не перевищувати 950 °С. Це обумовлено тим, що перегрівання вище цієї температури може призвести до значного росту зерна, що негативно впливає на міцність та пластичність матеріалу.

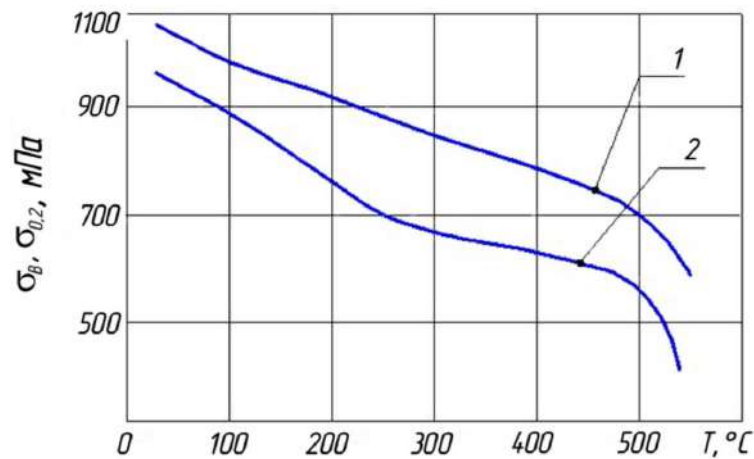


Рисунок 3.2 - Зміна механічних характеристик сплаву ВТЗ-1 у відпаленому стані залежно від температури: 1 — границя міцності σ_B , 2 — границя текучості $\sigma_{0,2}$

Витримка при обраній температурі відпалу залежить від маси та конфігурації деталі і становить близько 1 години 20 хвилин. Це забезпечує повне прогрівання напівфабрикату та необхідні структурні перетворення. Після цього відбувається контрольоване охолодження в печі до 600 ± 10 °C. Таке охолодження сприяє досягненню стабільності α - та β -фаз. Витримка при цій температурі триває протягом 2 годин (± 5 хвилин).

В результаті такого ізотермічного відпалу було досягнуто визначених механічних властивостей, які детально представлені в таблиці 3.3. Ці властивості включають такі показники як міцність, пластичність, і інші важливі характеристики, які визначають якість і надійність матеріалу для його застосування у виробництві.

Під час оцінки причин браку зразків № 3 і № 4, були проведені дослідження їхньої мікроструктури. Встановлено, що в цих зразках присутній підвищений вміст β -фази, що не відповідає заводським стандартам. Наявність надмірної кількості β -фази може негативно впливати на механічні характеристики сплаву, такі як міцність та пластичність, що пояснює невідповідність зразків № 3 і № 4 заводським стандартам.

Таблиця 3.3 Механічні властивості зразків №2-4 після відпалу

	σ_b , МПа	δ , %	ψ , %	KCU, Дж/см	Діаметр відбитка по Бринелю, мм	Твердість по Бринелю, НВ, МПа
Зразок №2	1133	18,8	42,3	3,2	3,35	3310
	1104	18,8	40,7	3,0	3,35	3310
Зразок №3	1250	6,8	18,3	2,7	3,15	3750
	1265	6,6	18,7	2,6	3,15	3750
Зразок №4	1260	6,0	17,6	2,5	3,15	3750
	1275	6,2	17,4	2,5	3,15	3750
ОСТ 190000-70	1000-1200	8	20	3	3,2-3,7	3630-2690

Мікроструктурні особливості, такі як кількість і розподіл фаз у сплаві, є важливими факторами, які впливають на загальні властивості матеріалу. Відхилення від оптимального співвідношення між α - та β -фазами може призвести до погіршення експлуатаційних характеристик сплаву. Тому, для забезпечення відповідності готових продуктів вимогам стандартів, необхідно строго контролювати процеси термічної обробки та забезпечувати точне дотримання технологічних режимів.

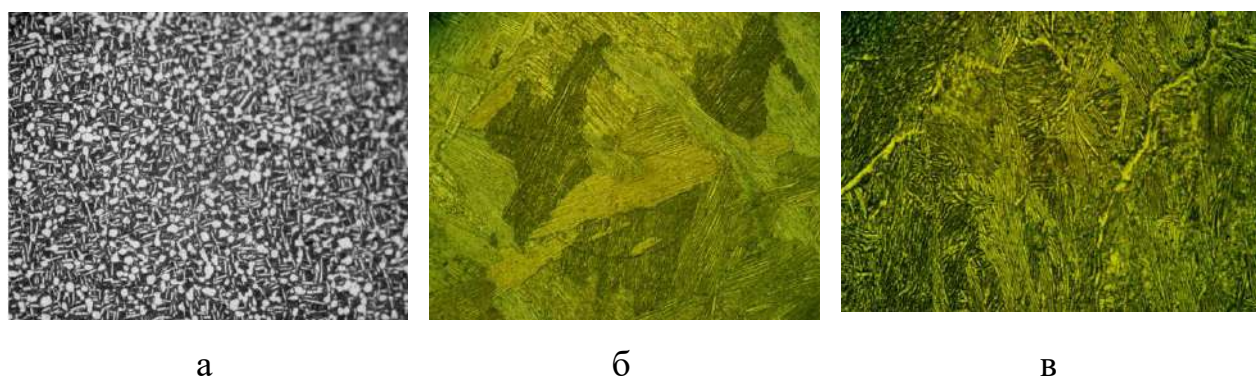


Рисунок 3.3 - Мікроструктури зразків № 2 (а), № 3 (б), № 4 (в) після ізотермічного відпалу

Аналіз хімічного складу зразків плавки № 2 і 3 показав, що вони містять підвищену кількість хрому і молібдену порівняно з плавками № 1 і 2.

Це призводить до формування інтерметалідного з'єднання $TiCr_2$, яке сприяє збільшенню міцності сплаву, але в той же час знижує його пластичність.

Для усунення наявності $TiCr_2$ необхідне прискорене охолодження. Враховуючи, що під час подвійного відпалу охолодження до кімнатної температури відбувається на повітрі, була оцінена можливість застосування цього виду термічної обробки для усунення виявленого браку.

Зміни в термічній обробці мали на меті адаптувати процес таким чином, щоб мінімізувати утворення інтерметаліду $TiCr_2$, який негативно впливає на властивості сплаву. Результати, отримані після зміненої термічної обробки, демонструють зміну механічних характеристик сплаву, зокрема, його міцності та пластичності. Ці дані можна порівняти з вимогами та стандартами, щоб визначити, чи були зміни ефективними для усунення браку, пов'язаного з вмістом $TiCr_2$ у сплаві.

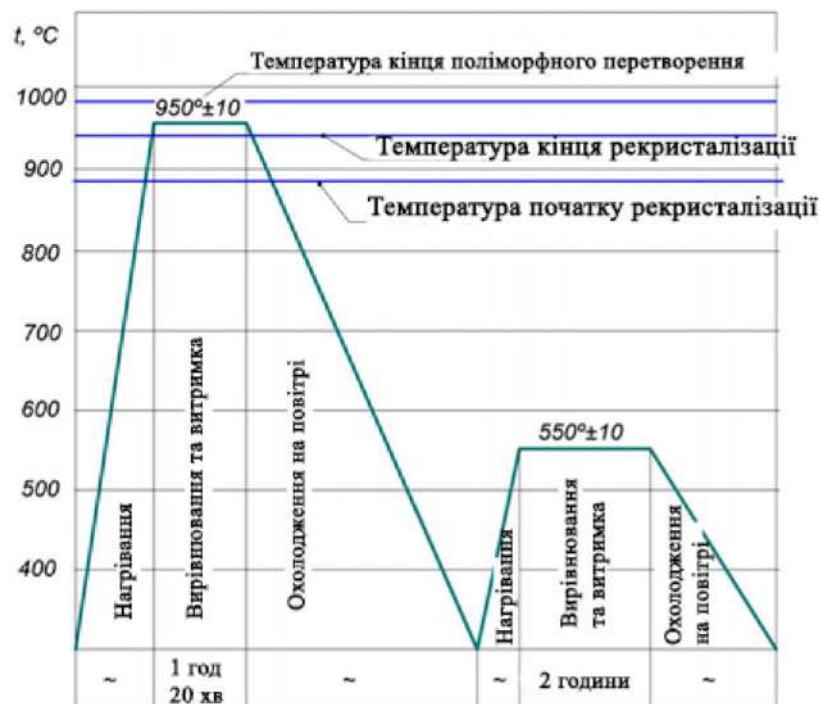


Рисунок 3.4 - Режим подвійного відпалу зразків зі сплаву ВТЗ-1

Аналіз мікроструктури зразків у поверхневому шарі після зламу допоміг підтвердити, що змінений режим термічної обробки був ефективним. Ці результати вказують на те, що після повторного нагрівання механічні

властивості зразків № 3 і № 4 відповідали заводському стандарту. Це свідчить про успішне усунення проблем, пов'язаних з наявністю інтерметалідного з'єднання $TiCr_2$, що раніше спричинило зниження пластичності сплаву.

Стабільність механічних властивостей після зміни режиму термічної обробки є ключовим показником того, що сплав тепер може ефективно використовуватися у виробництві згідно з вимогами до його експлуатаційних характеристик. Отже, ці результати демонструють успішність впровадження змін у термічній обробці для покращення якості сплаву.

Таблиця 3.4 Механічні властивості зразків плавів № 3 і № 4 після повторного відпалу

	σ_b , МПа	δ , %	ψ , %	KCU, Дж/см ²	Діаметр відбитка по Бринелю, мм	Твердість по Бринелю, НВ, МПа
Зразок №3	1100	16,6	34,0	3,3	3,25	3520
	1110	16,0	34,4	3,2	3,25	3520
Зразок №4	1111	16,2	36,2	3,3	3,25	3520
	1115	16,4	36,0	3,4	3,25	3520
ОСТ 190000-70	1000-1200	<8	<20	<3	3,2-3,7	3630-2690



а



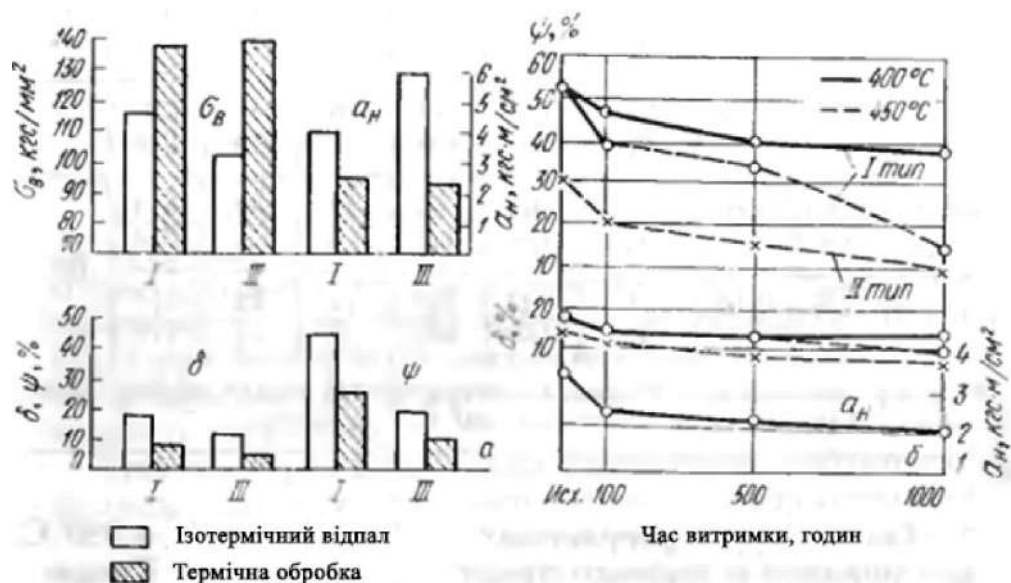
б

а — зразок № 3, б — зразок № 4

Рисунок 3.5 - Мікроструктури зразків після повторного відпалу

Збільшення вмісту хрому в сплаві веде до підвищення міцності β -фази, але знижує її пластичність порівняно з β -фазою, стабілізованою лише молібденом. Водночас, вищий вміст молібдену ускладнює утворення хімічної сполуки $TiCr_2$, яка сприяє збільшенню крихкості сплаву. Підвищений вміст хрому та молібдену загалом збільшує частку β -фази, впливаючи на міцність сплаву. Проте, при досягненні верхніх границь вмісту цих елементів, встановлених ОСТ, необхідно проводити подвійний відпал для зменшення кількості β -фази та відновлення пластичності сплаву.

На рисунку 3.6 демонструються механічні властивості при 20° С зразків з різною мікроструктурою після ізотермічного відпалу та зміцнювальної термічної обробки. Позначення I відповідає рівновісній $\alpha+\beta$ структурі (I тип мікроструктури), а III вказує на грубогольчасту структуру з наявністю крупних зерен первинної β -фази (III тип мікроструктури). Ці дані демонструють, як різні мікроструктури впливають на міцність та пластичність сплаву, що є критично важливим для їх застосування в різних інженерних застосуваннях.



а — у вихідному стані; б - після витримки при 400 і 450° С

Рисунок 3.6 - Вплив структури й термічної обробки на механічні властивості сплаву ВТЗ-1

Ви навели цікаві дані про вплив структури на властивості сплаву ВТЗ-1. Рівновісна $\alpha+\beta$ -структура (І тип) справді має важливе значення для пластичних властивостей матеріалу. Ця структура забезпечує кращу пластичність, особливо відносно звуження, при трохи нижчій ударній в'язкості порівняно з грубогольчастою структурою (ІІІ тип). Це особливо помітно після тривалої витримки зразків при високих температурах, що є критично важливим для промислових застосувань, де матеріали піддаються високим температурним навантаженням.

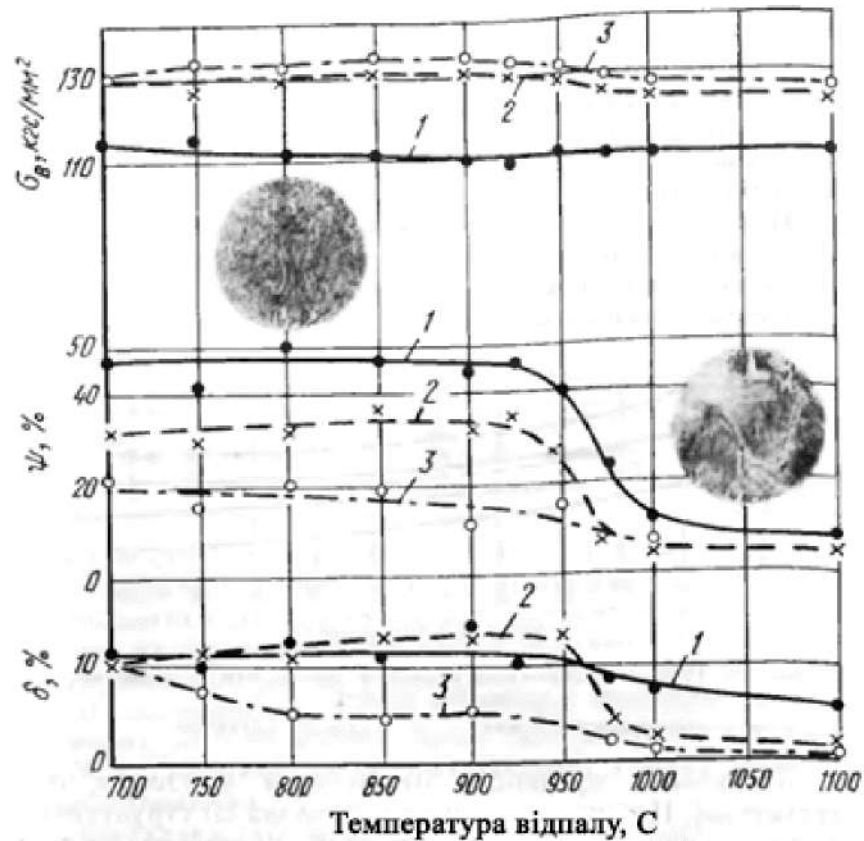
Зміцнювальна термічна обробка сплаву ВТЗ-1 із різними структурами має значний вплив на його властивості. Зразки з грубогольчастою структурою показують значно нижчу пластичність порівняно з рівновісною $\alpha+\beta$ -структурою. Це демонструє важливість вибору правильної термічної обробки для досягнення оптимальних властивостей сплаву.

На рисунку 3.7 представлено вплив нагрівання на структуру сплаву без наступної деформації і як це впливає на механічні властивості зміцненого сплаву ВТЗ-1. Процес нагрівання заготовок при різних температурах з подальшим гартуванням і старінням вказує на зміни в мікроструктурі, які безпосередньо впливають на кінцеві механічні властивості матеріалу. Важливо розуміти цей взаємозв'язок для оптимізації властивостей титанових сплавів у різних інженерних застосуваннях.

Попереднє нагрівання сплаву ВТЗ-1 перед зміцнювальною термічною обробкою має значний вплив на його мікроструктуру і, відповідно, на механічні властивості. Нагрівання до температури 925°C зберігає двофазну рівновісну структуру, що сприяє гарному балансу міцності та пластичності. Ви зазначили, що це призводить до значень міцності в розтяг σ_b приблизно 1300 МПа, відносного видовження δ близько 12% та відносного звуження ψ приблизно 30%.

З іншого боку, нагрівання вище границі $\alpha+\beta \rightarrow \beta$ перетворення викликає зміни в структурі та інтенсивне зростання зерен первинної β -фази. Це, як ви

вказали, призводить до різкого падіння пластичності і зниження міцності. Така зміна структури вказує на необхідність точного контролю температурних режимів під час термічної обробки для забезпечення бажаних властивостей сплаву.



1 — відпал + 840° С, 1 год., вода; 2 - те ж + 550° С, 5 год. повітря;
3 — те ж, +450° С, 100 год

Рисунок 3.7 - Вплив температури попереднього нагрівання на структуру й механічні властивості сплаву ВТЗ-1. підданого гартуванню й старінню

Ви також згадали про зміну тривалої міцності при 450°С у залежності від структури та виду термічної обробки. Різниця між ізотермічним відпалом та зміцнювальною обробкою, що включає загартування та старіння, може впливати на довготривалу витривалість сплаву при високих температурах.

Важливо розуміти ці взаємозв'язки для розробки сплавів, які відповідають специфічним вимогам довготривалої експлуатації в складних умовах.



— - ізотермічний відпал; - - - - гартування + старіння

Рисунок 3.8 - Зміна тривалої міцності сплаву ВТЗ-1 залежно від типу структури й термічної обробки

Тривала міцність сплаву ВТЗ-1 сильно залежить від його мікроструктури та режиму термічної обробки. Сплав зі структурою II типу показав найвищу тривалу міцність, тоді як сплав зі структурою I типу має найнижчу тривалу міцність. Це вказує на важливість вибору відповідної структури для конкретного застосування сплаву, з урахуванням умов експлуатації.

Також ви зазначили, що зміцнювальний режим термічної обробки зазвичай підвищує тривалу міцність у порівнянні з ізотермічним відпалом. Це підкреслює важливість вибору правильного режиму термічної обробки для оптимізації властивостей сплаву.

Ваші дані також показують, що перегрів металу без наступної деформації може знизити тривалу міцність. Ви навели приклад, де межа тривалої міцності за 100 годин при 450°C для зразків, попередньо нагрітих до 1000°C без деформації, становить 52 кг/мм², тоді як після деформації зі ступенем 70% ця величина збільшується до 60 кг/мм².

Загалом, ці дані підкреслюють складність вибору оптимального режиму термічної обробки для титанових сплавів, залежно від їх застосування та вимог до механічних властивостей.

Таблиця 3.5 - Границі витривалості зразків сплаву ВТЗ-1 з різною структурою (куті прутки діаметром 14-35 мм)

Тип мікро-структури	20°C		450°C	
	гладкі	с надрізом	гладкі	с надрізом
I	53	45	46	34
	62	48		
II	50	36	42	31
	59	43		
III	45	32	38	26
	53	40		

Двофазна рівновісна $\alpha+\beta$ -структура після ізотермічного відпалу забезпечує границю витривалості на рівні 53 кгс/мм² для гладких зразків і 45 кгс/мм² для зразків з надрізом. Після зміцнення ці значення підвищуються до 62 і 48 кгс/мм² відповідно.

Структури корзинового плетива і грубоголчастої демонструють нижчі значення витривалості порівняно з рівновісною структурою.

Одержання однорідної структури є складним, особливо в великих куваннях і штампуваннях. Це може потребувати вищих температур нагрівання заготовок або додаткових підігрівів під час деформації.

Рекомендується строго дотримуватися режимів гарячої деформації, які забезпечують відповідний тип структури, залежно від призначення матеріалу та умов роботи деталей. Наприклад, для лопаток, що випробовують вібраційні навантаження, необхідна двофазна рівновісна $\alpha+\beta$ -структура для високих пластичних властивостей і низької вібраційної чутливості до надрізу.

У контексті розробки та застосування сплаву ВТЗ-1, значну увагу слід приділити вибору оптимальної структури та термічної обробки, оскільки вони безпосередньо впливають на механічні властивості матеріалу. Специфічні умови експлуатації вимагають забезпечення високих значень жароміцності, опору повзучості та пластичності, зокрема для деталей, які використовуються в розтягувальних напруженнях та підвищених температурах, як диски та інші важливі компоненти. Ідеальною в цьому випадку є структура корзинового плетива, яка забезпечує оптимальне співвідношення вищезазначених характеристик. Для її отримання рекомендовано нагрівання заготовок в β -області з наступною деформацією на 50-70% при останньому нагріванні та завершенням деформації в $\alpha+\beta$ -області.

Грубоголчаста структура, хоча і забезпечує менші пластичні властивості, особливо після застосування зміцнювального режиму термічної обробки, все ж демонструє значно вищі пластичні властивості у порівнянні зі сплавами ВТ8 та ВТ9. Для забезпечення надійної роботи лопаток компресора з більшим ресурсом необхідно прагнути до отримання двофазної рівновісної $\alpha+\beta$ -структури та застосування додаткового зміцнення за допомогою термічної або термомеханічної обробки.

Зміцнювальна термічна обробка, що включає загартування та старіння, дозволяє підвищити міцності сплаву ВТЗ-1 при 20°C на 20-30%, тривалу міцність при 400°C на 15-20%, а також границю витривалості на 15-20% зі збереженням адекватної пластичності у випадку структури І типу. Зокрема, визначення витривалості при 20°C для гладких зразків з мікроструктурою І та ІІ типів виявило границі втоми на рівні 56 і 52 кгс/мм² відповідно.

Результати дослідження показують, що тривала міцність зразків зі структурою ІІ типу при 450°C складає 65 кгс/мм² після ізотермічного відпалу та 70 кгс/мм² після зміцнювального режиму, у порівнянні зі структурою ІІІ типу, де ці показники становлять 60 і 65 кгс/мм² відповідно. Це підкреслює важливість правильного вибору структури та термічної обробки для

конкретного застосування, а також важливість дотримання технологічних режимів у процесі виготовлення деталей.

3.2 Розгляд структури та властивостей двохфазних титанових сплавів з різним рівнем легування

Важливість встановлення оптимального режиму термообробки титанових сплавів не може бути переоцінена, особливо коли мова йде про роботу конструкційних елементів у умовах, де високі вимоги до безпеки та надійності є критичними. Правильно обрана термообробка безпосередньо впливає на механічні властивості титанових сплавів, що, у свою чергу, забезпечує відповідність продукції суворим стандартам і вимогам безпеки.

Для кувань дисків і валів куті та штампованих виробів з титанових сплавів особливо важливим є дотримання вимог ОСТ1 90197, який встановлює загальні технічні умови для таких виробів. Цей стандарт включає критичні характеристики міцності, які повинні бути гарантовані при кімнатній температурі та у відповідності з технічними умовами на поставку напівфабрикатів.

Таблиця 3.6 - Гарантовані значення характеристик міцності при кімнатній температурі

Сплав	Маса кування, кг	σ_b , МПа	δ	ψ	КСУ	КСТ
			%		Дж/див ²	
BT8-1	До 50	980	10	25	35	13
	Понад 100 до 200	960	9	25	35	13
	Понад 200 до 500	940	8	22	35	13
BT6	До 100	930	10	25	40	15
	Понад 100 до 200	900	9	25	40	15
BT9	До 50	1030	8	22	30	8

Гарантовані значення характеристик міцності, які встановлені відповідно до цих технічних умов, надають вирішальне значення при виборі

матеріалів і технологій для виготовлення важливих компонентів, зокрема, в авіаційній та космічній промисловості. Це дозволяє забезпечити не лише високу продуктивність, але й безпеку виробів під час їх експлуатації.

В процесі виготовлення великогабаритних штамповок, особливо дисків, зі сплавів ВТ6 та ВТ8-1 спостерігається значна різниця в характеристиках міцності. Для сплаву ВТ6 характерна висока дисперсія міцності матеріалу, особливо у центральних зонах штампувань, де міцність може знижуватися на 90-100 МПа, незалежно від застосованого режиму термічної обробки.

У контрасті до цього, сплав ВТ8-1 демонструє стабільно високі характеристики міцності, пластичності, ударної в'язкості, забезпечуючи значну питому роботу руйнування, особливо у випадку зразків із тріщинами. Це може бути особливо важливим для деталей, які використовуються у високонавантажених умовах, таких як диски вентилятора в авіаційних двигунах.

Ключовим фактором, який пояснює ці різниці, є міцність матеріалу. Сплав ВТ8-1 має більшу малоциклову утому порівняно зі сплавом ВТ6, що безпосередньо пов'язано з його вищою міцністю. Це робить ВТ8-1 привабливим вибором для деталей, які піддаються високим циклічним навантаженням.

Для детального порівняння характеристик втомної міцності та тріщиностійкості між сплавами ВТ6 і ВТ8-1 можна звернутися до таблиць 3.7 та 3.8, де представлені відповідні дані. Завдяки цій інформації можна зробити обґрунтований вибір сплаву для конкретних застосувань, з урахуванням їх механічних властивостей та умов експлуатації.

Жароміцний титановий сплав ВТ8-1, у порівнянні зі сплавом ВТ6, вирізняється вищими показниками в'язкості руйнування та тріщиностійкості. Це робить сплав ВТ8-1 більш придатним для застосувань, де необхідна висока стійкість до поширення тріщин, особливо при значних коливаннях коефіцієнта інтенсивності напружень.

Таблиця 3.7 - Характеристики втомної міцності штампувань дисків зі сплавів ВТ6 і ВТ8-1

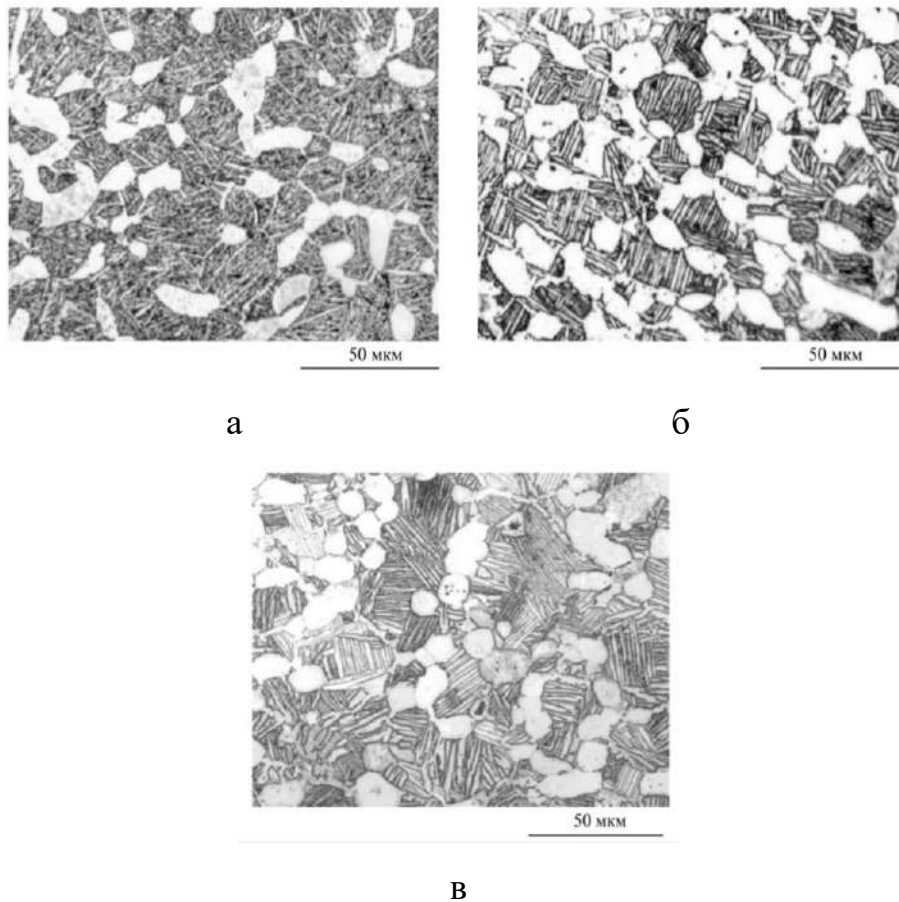
Матеріал штампування диска	МЦУ: $\sigma_{\max}$, МПа (при N=104 цикл),		МнЦУ: $\sigma_{\max}$, МПа (при N=2 107 цикл),	
	зразків		зразків	
	гладких	з надрізом ($\alpha\sigma=3,35$)	гладких	з надрізом ($\alpha\sigma=2,33$)
ВТ8-1	1000	490	480	220
ВТ6	900	450	480	220

Таблиця 3.8 - Характеристики тріщиностійкості штампувань дисків (відпалений стан) зі сплавів ВТ6 і ВТ8-1

Матеріал штамповки диска	K_{Ic} , МПа $\sqrt{м}$ (радіальне/тангенціальне напрямок вирізки зразка)	СРТУ: мм/цикл, при розмаху коефіцієнта інтенсивності наруження ΔK , МПа $\sqrt{м}$		
		21	31	41
ВТ8-1	85/98	$0,17 \cdot 10^6$	$0,46 \cdot 10^6$	$2,4 \cdot 10^6$
ВТ6	77/93	$0,15 \cdot 10^6$	$0,82 \cdot 10^6$	-

Типова мікроструктура штампувань дисків із цих сплавів має свої особливості. Для сплаву ВТ6 характерні великі виділення первинної та вторинної α -фази. Після процесу загартування у воді, ВТ6 демонструє мінімальну кількість первинної α -фази та високу дисперсність пластин вторинної α -фази. Однак, цей ефект загартування в центральній зоні великих штампувань може бути знижений, що призводить до розбіжностей у механічних властивостях між периферійними та центральними зонами дисків.

В контексті виробничих процесів і застосувань, ці особливості мікроструктури та їх вплив на механічні властивості є критично важливими. Розуміння цих характеристик дозволяє оптимізувати вибір матеріалу та технологічні параметри для конкретних застосувань, а також гарантувати надійність та довговічність кінцевих виробів.

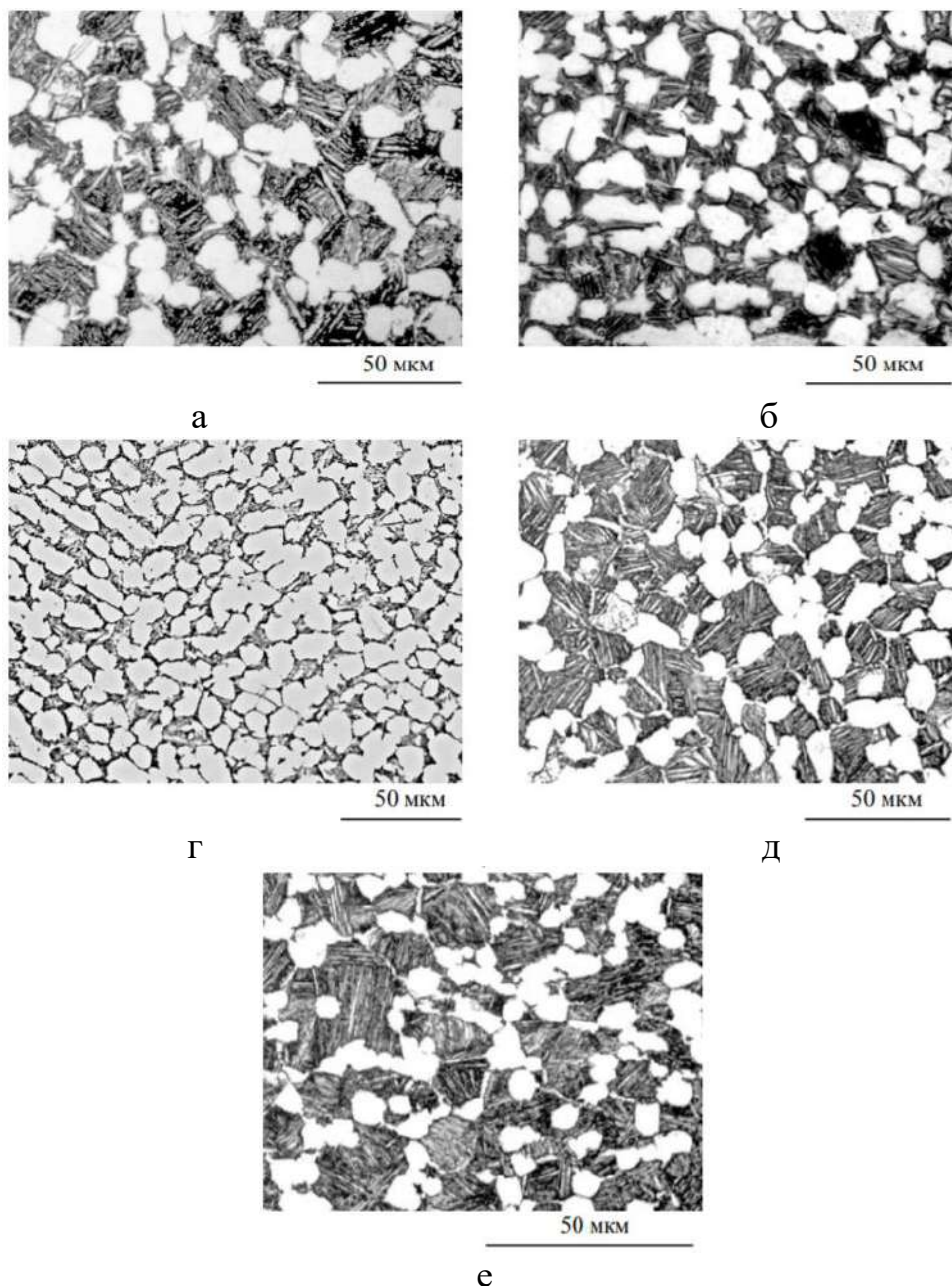


а - периферійна зона; б - центральна зона; в - типова структура після відпалу з охолодженням на повітрі

Рисунок 3.9 - Мікроструктура штампувань дисків зі сплаву ВТ6 (велика штамповка після охолодження у воді з наступним відпалом)

У великогабаритних штамповках дисків із сплаву ВТ8-1, морфологія виділення α -фази може істотно відрізнятися залежно від товщини перетину, особливо при охолодженні на повітрі. Це свідчить про високу чутливість сплаву до термічних умов обробки і геометрії деталей. Навіть у випадку структур, які можуть здатися несприятливими (наприклад, зображення на рис. 3.10, в), сплав ВТ8-1 здатний підтримувати високі показники міцності та ударної в'язкості при кімнатній температурі. Ці показники характеризуються значеннями міцності на розрив (σ_B) 1010 МПа, відносним подовженням (δ)

16%, відносним звуженням (ψ) 32%, ударною в'язкістю за Шарпі (КСУ) 41 Дж/см² та ударною в'язкістю за Ізод (КСТ) 20 Дж/см².



а, б - типова на периферії й у центральній зоні; в - нетипова в центральній зоні після відпалу штампування при температурі $T_{\text{шп}}-40^{\circ}\text{C}$ на першій ступені (штампування дисків КНД і КВД); г - типова для штампування диска КНД; д - типова для штампування робочого колеса при температурі відпалу $T_{\text{шп}}-25^{\circ}\text{C}$

Рисунок 3.10 - Мікроструктура великих штампувань дисків зі сплаву BT8-1 після відпалу при температурах першого ступеню відпалу $T_{\text{шт}}(20-30)^{\circ}\text{C}$, охолодження на повітрі

Вплив товщини перетину на швидкість охолодження в процесі виробництва штампувань дисків з титанових сплавів є значущим фактором, що впливає на кінцеві механічні властивості матеріалу. Це демонструється на прикладі штампування зі сплаву BT8, яке має максимальну товщину перетину 80 мм. Швидкість охолодження в таких випадках стає ключовим параметром, оскільки вона безпосередньо впливає на формування мікроструктури титанових сплавів. Вища швидкість охолодження може сприяти утворенню більш дрібнозернистої структури, що, у свою чергу, може покращувати механічні характеристики, такі як міцність і пластичність.

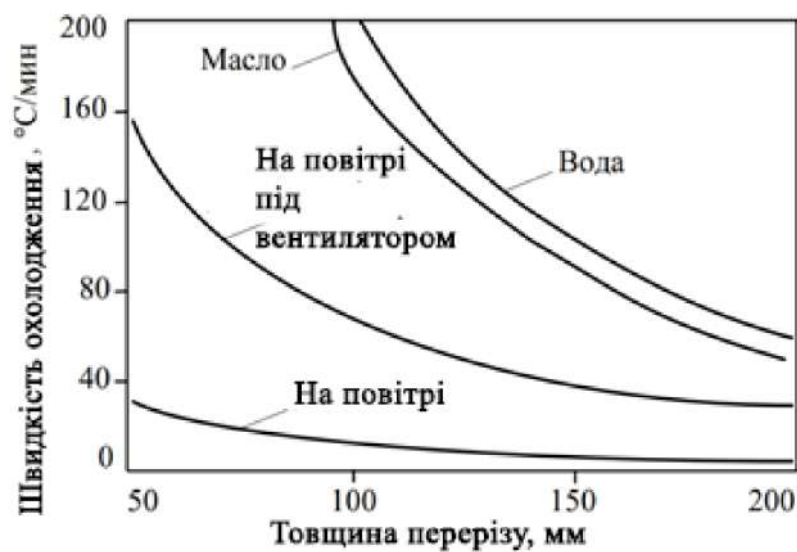


Рисунок 3.11 - Зміна фактичної швидкості охолодження жароміцних титанових сплавів залежно від величини перетину [2]

Для досягнення необхідної глобулярно-пластинчастої структури в великих напівфабрикатах зі сплаву BT8-1, виконання попередньої механічної обробки є ключовим кроком. Це дозволяє зменшити товщину перетину напівфабрикату, оптимізуючи умови для термічної обробки. Рекомендується

проведення високотемпературного відпалу при температурі не нижче, ніж на 30 градусів Цельсія нижче температури повного поліморфного перетворення (ТПП), за умови подальшого охолодження під вентилятором.

Сплав ВТ8-1 демонструє стабільно високі показники міцності, втомної міцності, в'язкості руйнування та тріщиностійкості, що робить його переважним для використання у виготовленні деталей з більшими перетинами, у порівнянні зі сплавом ВТ6. Такі характеристики роблять сплав ВТ8-1 атрактивним для заміни інших титанових сплавів, включаючи ВТ6, у виробництві дисків компресорів низького тиску (КВД), що працюють при температурах до 500°C.

Хоча сплав ВТ9 володіє вищим рівнем короткочасної міцності та багатоциклової втоми при кімнатній температурі, його характеристики тріщинстійкості є нижчими, ніж у сплавів ВТ6, ВТ8 та інших. На рисунках 3.12, 3.13 і 3.14 представлені графіки залежностей між механічними характеристиками та температурою випробувань для сплаву ВТ8-1, а також тривалої міцності та повзучості для цього матеріалу.

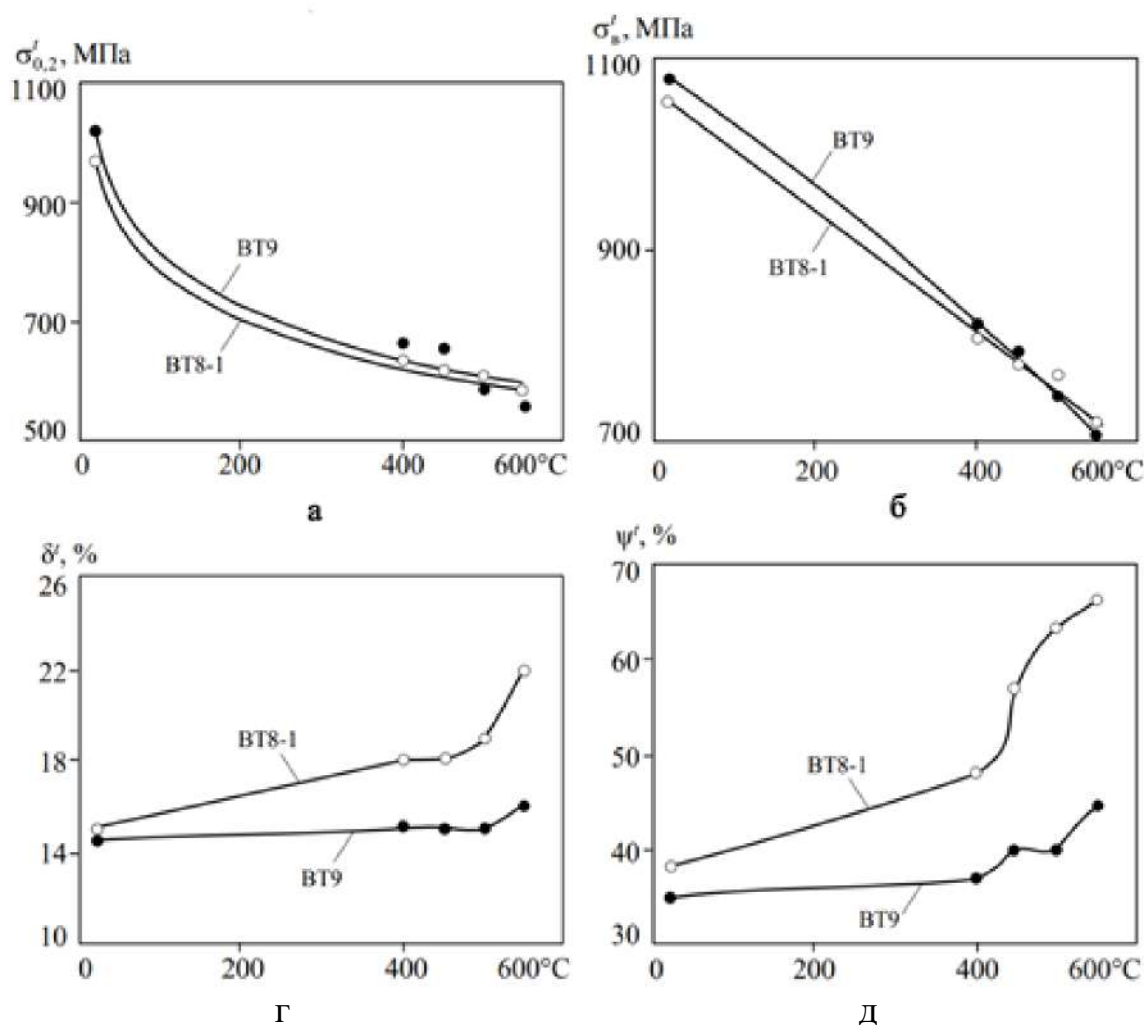


Рисунок 3.12 - Умовна границя плинності (а), границя міцності (б), відносні подовження (в) і звуження (г) матеріалу штамповок дисків зі сплавів BT8-1 і BT9 (середні значення) залежно від температури випробувань

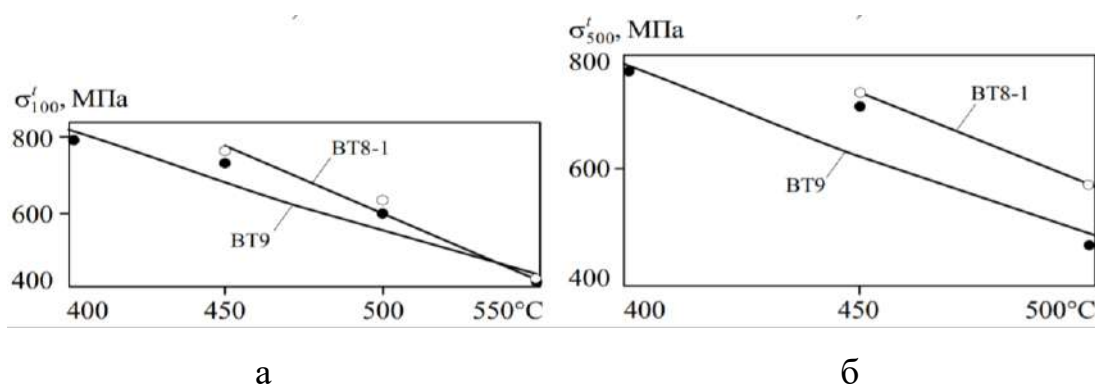


Рисунок 3.13 - Тривала міцність за 100 (а) і 500 год (б) матеріалу штамповок дисків зі сплавів BT8-1 і BT9 залежно від температури випробувань

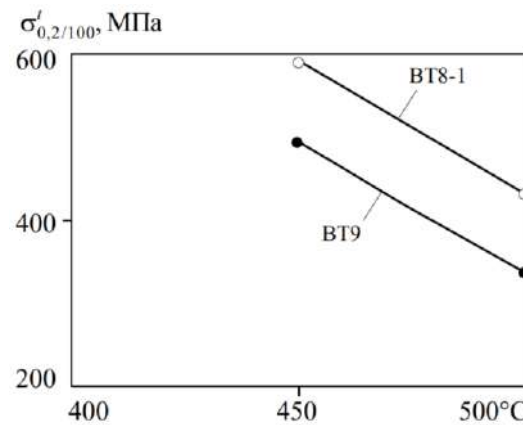


Рисунок 3.14 - Опір повзучості за 100 год при залишковій деформації 0,2% матеріалу штампувань дисків зі сплавів BT8-1 і BT9 залежно від температури випробувань

Очевидно, що сплав BT9 демонструє вищу короточасну міцність до температури 450°C порівняно зі сплавом BT8-1, на 20-40 МПа, з кращими показниками пластичності в усьому діапазоні температур випробувань. При температурі 500°C міцність обох сплавів приблизно однакова, тоді як при 550°C міцність сплаву BT8-1 незначно вища, ніж у BT9. BT8-1 також має переваги з точки зору жароміцних характеристик при температурах 450 і 500°C порівняно з BT9.

Характеристики ударної в'язкості, тріщиностійкості та в'язкості руйнування матеріалу штамповок дисків зі сплавів BT8-1 і BT9 відображені в таблиці 3.9, демонструючи важливі порівняльні показники цих матеріалів.

Таблиця 3.9 - Механічні характеристики штампувань диска (відпалений стан) зі сплавів BT9 і BT8-1

Матеріал штамповки диска	KCU	KCT	K _{1c} , МПа√м (радіальне/тангенціальне напрямок вирізки зразка)	СРТУ: мм/цикл, при ΔK=31 МПа√м
	Дж/см²			
BT8-1	52	22	85/98	0,46-10 ¹⁶
BT9	41	12	58/71	2,8-10 ¹⁶

Високі характеристики ударної в'язкості і тріщиностійкості сплаву ВТ8-1 значно перевищують аналогічні показники сплаву ВТ9. Крім того, є можливість підвищення мінімальних характеристик міцності на штамповках дисків зі сплаву ВТ8-1 за рахунок оптимізації технологічних процесів термомеханічної та термічної обробки, з одночасним збереженням високих показників тріщиностійкості. Один з прикладів вдалого застосування сплаву ВТ8-1 - експериментальне виготовлення штампувань робочих коліс типу «блиск» з цього сплаву. Важливу роль у покращенні міцностних характеристик відіграє композиція сплаву та наявність глобулярно-пластинчастої структури. Сплав ВТ8-1 відрізняється від інших жароміцних сплавів, таких як ВТ3-1, ВТ8, ВТ9, меншою кількістю легуючих елементів, які впливають на в'язкість матеріалу. Невеликі добавки елементів, таких як олово та цирконій, сприяють підвищенню рівня твердорозчинного зміцнення α - та β -фаз. Проведені дослідження сприяють більш детальному вивченню процесів фазових перетворень у багатокомпонентних системах та розробці нових композицій сплавів із поліпшеними властивостями.

Розробка нових технологій виготовлення промислових штампувань дисків зі сплаву ВТ8-1 виявила великий потенціал цього сплаву, забезпечуючи одночасне підвищення міцностних, жароміцних, витривалих і довговічних властивостей, а також максимальних показників в'язкості і тріщиностійкості. Це має велике значення для розробки нових високоресурсних двигунів п'ятого покоління.

3.3 Номенклатура титанових дисків та маршрутна технологія їх виготовлення

В данному розділі наводяться данні деталей-представників, щодо їх розмірів, маси та вимоги до матеріалів, які наведені в таблиці 3.10.

Таблиця 3.10 – Номенклатура виробів

Назва виробу	Матеріал виробу	Маса виробу, кг	Розміри виробу, мм	
			h	d
Диск	BT8	15	54,5	435
	BT6	2,5	23,5	284
	BT3-1	22	147	809

До першої групи відносяться диски, які виготовлені з титанових сплавів. На рис. 3.15 показано ескіз диска зі сплаву BT8.

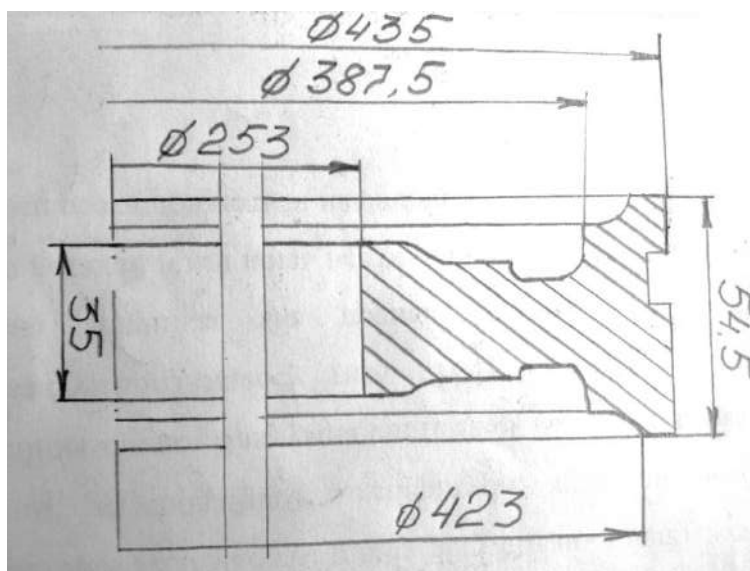


Рисунок 3.15 – Ескіз диска зі сплаву BT8

На рис. 3.16 показано ескіз диска зі сплаву BT6

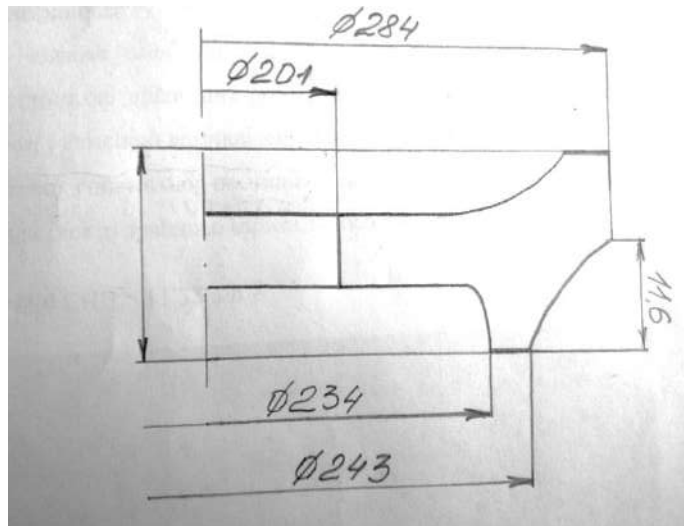


Рисунок 3.16 – Ескіз диска зі сплаву ВТ6

На рис.3.17 показано ескіз диска зі сплаву ВТ3-1.

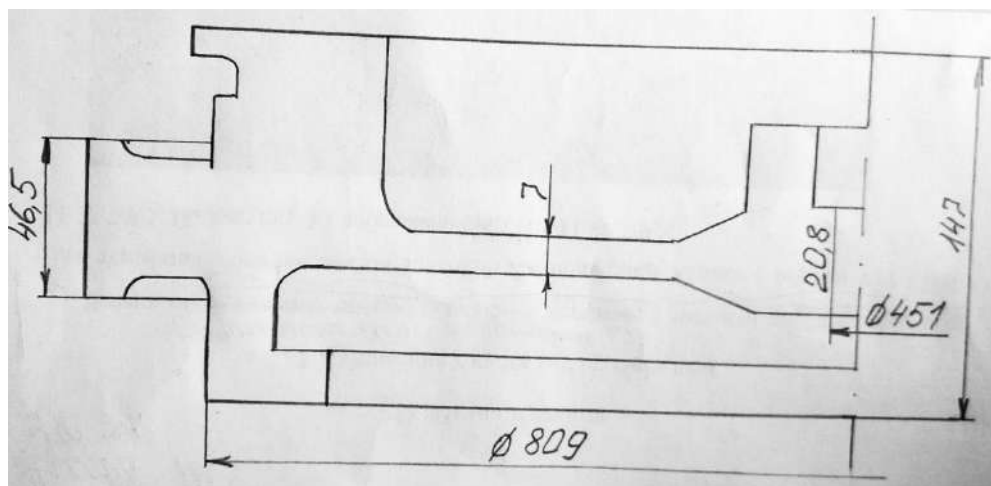


Рисунок 3.17 - Ескіз диска зі сплаву ВТ3-1.

Технологічний процес виготовлення виробів на підприємствах газотурбобудування являє собою впорядкований ланцюг технологічних операцій. Виконання цих операцій забезпечує отримання якісного продукту з відповідними матеріальними характеристиками. В процесі виготовлення виріб може бути підданий термічній обробці кілька разів, включаючи попередню, основну та додаткову обробку.

Маршрутна технологія передбачає переміщення заготовок між цехами та відділеннями підприємства, визначаючи послідовність виконуваних

операцій. Ці операції можуть повторюватися, але відрізнятися за призначенням, режимами та результатом, що включає зміну форми, розмірів, шорсткості поверхні, мікроструктури та властивостей матеріалу.

В таблиці 3.11 представлена схема маршрутної технології виготовлення диска, де окреслено послідовність та специфіку виконуваних операцій для досягнення заданої якості кінцевого виробу.

Таблиця 3.11 – Схема маршрутної технології виготовлення диска.

№ п/п	Назва операції	Цех (дільниця) де виконується операція	Призначення операції
1	2	3	4
1.	Вхідний контроль	Заготівельний цех або заготівельна дільниця пресового цеху	Контроль хімічного складу, розмірів, макроструктури, відсутності дефектів прокату
2.	Заготівельна	Заготівельний цех	Отримання заготовок із прокату для наступної операції
3.	Гаряче пресування	Пресовий цех	Надання необхідної форми, розмірів та створення сприятливої макроструктури
4.	Механічна обробка	Механічний цех	Надання заготовці необхідної форми та розмірів
4.	Термічна обробка	Термічний цех	Отримання заданих робочим кресленням властивостей матеріалу, виконання вимог щодо геометрії заготовки
5.	Остаточна механічна обробка	Механічний цех	Надання виробу остаточних розмірів, геометрії, шорсткості у відповідності із робочим кресленням
6.	Вихідний контроль	Заготівельний цех або дільниця пресового цеху	Контроль параметрів, які зазначені на кресленні: міцність, в'язкість, границя тривалої міцності, границя витривалості

Вхідний контроль проводиться для контролю хімічного складу, розмірів, макроструктури та відсутності дефектів заготовок.

Гаряче пресування проводять для надання необхідної форми, розмірів та створення сприятливої мікроструктури заготовки.

Основне термічне оброблення проводиться для отримання необхідної структури та властивостей.

3.4 Розробка режимів та технології термічної обробки для дисків компресора

Технологія термічної обробки є інтегральною частиною процесу виготовлення виробів, спрямована на досягнення потрібної структури, механічних та експлуатаційних властивостей, а також гарантуючи високу якість виробу. Одним із ключових технологічних процесів у цій групі є подвійний відпал.

Подвійний відпал передбачає двоетапний нагрів деталей. На першому етапі деталі нагрівають до температури в діапазоні 920-950°C, після чого їх витримують і охолоджують на повітрі. На другому етапі деталі повторно нагрівають до 500-650°C, знову витримують і охолоджують на повітрі.

Подвійний відпал, у порівнянні з ізотермічним відпалом, збільшує міцність сплаву, при цьому лише незначно знижуючи пластичність. Крім того, цей метод дозволяє скоротити тривалість обробки. Під час подвійного відпалу розпад β -фази відбувається під час охолодження від температури першого відпалу та під час другого відпалу, який фактично є процесом старіння. Утворені в результаті цього дрібнодисперсні продукти розпаду зміцнюють сплав.

Визначення тривалості процесів

Загальна тривалість операції $\tau_{\text{заг}}$ визначається за формулою:

$$\tau_{\text{заг}} = \tau_{\text{н}} + \tau_{\text{в}} + \tau_{\text{охол}} ,$$

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

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

$\tau_{\text{охол}}$ – час охолодження, с.

Час нагрівання визначається за формулою:

$$\tau_n = S * K * f * L_N,$$

де S - характеристичний розмір виробу, мм;

K – коефіцієнт форми;

f – коефіцієнт розташування виробів в нагрівальному пристрої, що впливає на час нагрівання, хв;

L_N – коефіцієнт легування сталі.

Розраховуємо титанові диски.

Для подвійного відпалу використовується піч СНВ 11.22.7/9,5.

C – електрична, H – камерна, B – вакуумна, з шириною 1100мм, довжиною 2200мм, висотою 700мм робочого простору з максимальною температурою нагріву до 950°C.

Розраховуємо кількість виробів що поміщуються по довжині робочого простору печі СНВ 11.22.7/9,5:

ВТ8:

$$n_d = L/(l+l/2)$$

де L – довжина робочого простору, 2200мм;

l – довжина заготовки, 435мм;

$$n_d = 2200/(435+217,5) = 3 \text{ шт}$$

Розрахуємо кількість виробів, що поміщуються по ширині робочого простору печі:

$$n_{ш} = Ш/(d+d/2)$$

де $Ш$ – ширина робочого простору, 1100мм;

d – ширина заготовки, 435мм;

$$n_{\text{шт}} = 1100 / (435 + 217,5) = 1 \text{ шт}$$

Тоді в одному ярусі розташовується: $n_{\text{яр}} = n_{\text{д}} * n_{\text{шт}} = 3 * 1 = 3 \text{ шт. виробів.}$

Розраховуємо кількість виробів робочого простору по висоті:

$$n_b = B / (b + b/2)$$

де B – висота робочого простору, 700мм;

b – висота заготовки, 54,5 мм;

$$n_b = 700 / (54,5 + 27,25) = 8 \text{ яр}$$

Кількість виробів в печі розраховуємо за формулою:

$$N = n_{\text{яр}} * n_b = 8 * 3 = 24 \text{ шт}$$

Маса садки $M_c = N * m_{\text{виробу}}$

$$M_c = 24 * 15 \text{ кг} = 360 \text{ кг}$$

Тривалість процесу подвійного відпалу:

$$S = 17,5 \text{ мм}$$

$$K = 4$$

$$f = 1,4$$

$$L_{\text{л}} = 1,6$$

$$\tau_{\text{н}} = 17,5 * 4 * 1,4 * 1,6 = 2,61 \text{ год}$$

$$\tau_{\text{в}} = 2 \text{ год}$$

Охолодження виробів аргоном, тобто:

$$\tau_{\text{охол}} = (t_{\text{ВП}} - t_{\text{БК}}) / V_{\text{ОХОЛ}}$$

$$V_{\text{ОХОЛ}} = 70^{\circ}\text{C}/\text{хв}$$

$$\tau_{\text{охол}} = (930 - 20) / 70 = 13 \text{ хв} = 0,22 \text{ год}$$

Другий нагрів до 590°C :

$$L_{\text{л}} = 2,35$$

$$\tau_{\text{н}} = 17,5 * 4 * 1,4 * 2,35 = 3,84 \text{ год}$$

$$\tau_{\text{в}} = 1 \text{ год}$$

Охолодження виробів відбувається на повітрі, тобто:

$$\tau_{\text{охол}} = (t_{\text{ВП}} - t_{\text{БК}}) / V_{\text{ОХОЛ}}$$

$$V_{\text{ОХОЛ}} = 5^{\circ}\text{C}/\text{с}$$

$$\tau_{\text{охол}} = (590 - 20) / 5 = 114 \text{ с} = 1,9 \text{ хв} = 0,03 \text{ год}$$

$$\tau_{\text{заг}} = 2,61 + 2 + 0,22 + 3,84 + 1 + 0,03 = 9,7 \text{ год}$$

ВТ6:

$$n_{\text{д}} = L / (l + l/2)$$

де L – довжина робочого простору, 2200мм;

l – довжина заготовки, 284мм

$$n_{\text{д}} = 2200 / (284 + 142) = 5 \text{ шт}$$

Розрахуємо кількість виробів, що поміщуються по ширині робочого простору печі:

$$n_{\text{ш}} = \text{Ш}/(d+d/2)$$

де Ш – ширина робочого простору, 1100мм;

d – ширина заготовки, 284мм;

$$n_{\text{ш}} = 1100/(284+142) = 2 \text{ шт}$$

Тоді в одному ярусі розташовується: $n_{\text{яр}} = n_{\text{д}} * n_{\text{ш}} = 5 * 2 = 10$ шт. виробів.

Розраховуємо кількість виробів робочого простору по висоті:

$$n_{\text{в}} = B/(b+b/2)$$

де B – висота робочого простору, 700мм;

b – висота заготовки, 23,5 мм;

$$n_{\text{в}} = 700/(23,5+11,75) = 19 \text{ яр}$$

Кількість виробів в печі розраховуємо за формулою:

$$N = n_{\text{яр}} * n_{\text{в}} = 19 * 10 = 190 \text{ шт}$$

Маса садки $M_{\text{с}} = N * m_{\text{виробу}}$

$$M_{\text{с}} = 190 * 2,5 \text{ кг} = 475 \text{ кг}$$

Тривалість процесу ізотермічного відпалу:

$$S = 5 \text{ мм}$$

$$K = 4$$

$$f = 1,4$$

$$L_{\text{д}} = 1,6$$

$$\tau_{\text{н}} = 5 * 4 * 1,4 * 1,6 = 0,74 \text{ год}$$

$$\tau_{\text{в}} = 1 \text{ год}$$

Охолодження виробів відбувається з піччю, тобто:

$$\tau_{\text{охол}} = (t_{\text{ВП}} - t_{\text{БК}}) / V_{\text{охол}}$$

$$V_{\text{охол}} = 50^{\circ}\text{C}/\text{год}$$

$$\tau_{\text{охол}} = (840 - 550) / 50 = 5,8 \text{ год} = 5,8 \text{ год}$$

Тривалість витримки після охолодження з піччю до 550°C:

$$\tau_{\text{в}} = 2 \text{ год}$$

Охолодження виробів відбувається на повітрі, тобто:

$$\tau_{\text{охол}} = (t_{\text{ВП}} - t_{\text{БК}}) / V_{\text{охол}}$$

$$V_{\text{охол}} = 5^{\circ}\text{C}/\text{с}$$

$$\tau_{\text{охол}} = (550 - 20) / 5 = 106 \text{ с} = 1,76 \text{ хв} = 0,03 \text{ год}$$

$$\tau_{\text{заг}} = 0,74 + 1 + 5,8 + 2 + 0,03 = 9,57 \text{ год}$$

ВТЗ-1:

$$n_{\text{д}} = L / (l + l/4)$$

де L – довжина робочого простору, 2200мм;

l – довжина заготовки, 809мм;

$$n_{\text{д}} = 2200 / (809 + 202,25) = 2 \text{ шт}$$

Розрахуємо кількість виробів, що поміщуються по ширині робочого простору печі:

$$n_{\text{ш}} = \text{Ш}/(d+d/2)$$

де Ш – ширина робочого простору, 1100мм;

d – ширина заготовки, 809мм;

$$n_{\text{ш}} = 1100/(809+202,25) = 1 \text{ шт}$$

Тоді в одному ярусі розташовується: $n_{\text{яр}} = n_{\text{д}} * n_{\text{ш}} = 2 * 1 = 2$ шт. виробів.

Розраховуємо кількість виробів робочого простору по висоті:

$$n_{\text{б}} = B/(b+b/2)$$

де B – висота робочого простору, 700мм;

b – висота заготовки, 147 мм;

$$n_{\text{б}} = 700/(147+73,5) = 3 \text{ яр}$$

Кількість виробів в печі розраховуємо за формулою:

$$N = n_{\text{яр}} * n_{\text{б}} = 3 * 2 = 6 \text{ шт}$$

Маса садки $M_{\text{с}} = N * m_{\text{виробу}}$

$$M_{\text{с}} = 6 * 22 \text{ кг} = 132 \text{ кг}$$

Тривалість процесу подвійного відпалу:

$$\begin{aligned}
 S &= 23,25 \text{ мм} \\
 K &= 4 \\
 f &= 1,4 \\
 L_{\text{д}} &= 1,6 \\
 \tau_{\text{н}} &= 23,25 * 4 * 1,4 * 1,6 = 3,47 \text{ год} \\
 \tau_{\text{в}} &= 1 \text{ год}
 \end{aligned}$$

Охолодження виробів відбувається з піччю, тобто:

$$\begin{aligned}
 \tau_{\text{охол}} &= (t_{\text{ВП}} - t_{\text{БК}}) / V_{\text{охол}} \\
 V_{\text{охол}} &= 50^{\circ}\text{C/год} \\
 \tau_{\text{охол}} &= (900 - 575) / 50 = 6,5 \text{ год}
 \end{aligned}$$

Тривалість витримки після охолодження з піччю до 575°C:

$$\tau_{\text{в}} = 3 \text{ год}$$

Охолодження виробів відбувається на повітрі, тобто:

$$\begin{aligned}
 \tau_{\text{охол}} &= (t_{\text{ВП}} - t_{\text{БК}}) / V_{\text{охол}} \\
 V_{\text{охол}} &= 5^{\circ}\text{C/с} \\
 \tau_{\text{охол}} &= (575 - 20) / 5 = 111 \text{ с} = 1,85 \text{ хв} = 0,03 \text{ год} \\
 \tau_{\text{заг}} &= 3,47 + 1 + 6,5 + 3 + 0,03 = 14 \text{ год}
 \end{aligned}$$

Карта технологічного процесу термічної обробки – це основний технологічний документ, котрий дозволяє здійснювати термічну обробку виробів і забезпечувати необхідну якість продукції та її відповідність технічним вимогам. За її використанням виконавець повинен здійснювати термічне оброблення без консультації із розробником. Карта технологічного процесу термічної обробки для титанового диска наведена в таблиці 3.12.

Таблиця 3.12 – Карта технологічного процесу термічного оброблення диску

				Технічні вимоги		
				Матеріал	Властивості	Структура
				ВТ8	$\sigma_{100}^{450} = 568 \text{ МПа},$ $\sigma_{0,2/500} = 235 \text{ МПа},$ $\delta = 10\%,$ $KCU = 343 \text{ кДж/м}^2$	$\alpha + \beta$
№	Назва операції	Прилади, інструменти, обладнання	Умови нагрівання	Умови охолодження	Прийоми контролю	Умови оброблення, контроль
1	2	3	4	5	6	7
1.	Вхідний контроль	Стилоскоп, лінійка, штангенциркуль, твердомір				Хімічний склад, стан поверхні, розміри, геометрія, твердість.
2.	Подвійний відпал	СНВ-11.22.7/9, 5	$t_n = 930 \pm 10^\circ\text{C}$ $\tau_n = 2,61 \text{ год}$		1100 x 2200 мм 10 виробів в одному ярусі (садка на 190 деталей) маса садки = 475 кг	τ_n ; t_n + середовище, його склад та витрати
2.1	Перше нагрівання					
2.2	Витримка	СНВ-11.22.7/9, 5	$t_v = 930 \pm 10^\circ\text{C}$ $\tau_v = 2 \text{ год}$		1100 x 2200 мм 10 виробів в одному ярусі (садка на 190 деталей) маса садки = 475 кг	τ_v ; t_v + середовище, його склад та витрати

Продовження табл. 4.3

1	2	3	4	5	6	7
2.3	Охолодження	аргон		$\tau_{\text{ох}} = 0,22$ год	1100 x2200мм 10 виробів в одному ярусі(садка на 190 деталей) маса садки= 475кг	
2.4	Друге нагрівання	СНВ- 11.22.7/9, 5	$t_{\text{н}} = 590$ $\pm 10^{\circ}\text{C}$ $\tau_{\text{н}} = 3,84$ год		1100 x2200мм 10 виробів в одному ярусі(садка на 190 деталей) маса садки= 475кг	$\tau_{\text{н}}$; $t_{\text{н}}$ +середовищ е, його склад та витрати
2.5	Витримка	СНВ- 11.22.7/9, 5	$t_{\text{в}} = 590$ $\pm 10^{\circ}\text{C}$ $\tau_{\text{в}} = 1$ год		1100 x2200мм 10 виробів в одному ярусі(садка на 190 деталей),маса садки= 475кг	$\tau_{\text{в}}$; $t_{\text{в}}$ +середовищ е, його склад та витрати
2.6	Охолодження	На повітрі		$\tau_{\text{ох}} = 0,03$ год		
3.	Контроль вихідний	Мікроско п, твердомір				Контроль твердості, мікроструктур и,

3.5 Технічний контроль, попередження та виправлення дефектів для дисків компресора

Забезпечення високої якості продукції досягається завдяки ретельному вхідному, міжопераційному та вихідному контролю.

Вхідний контроль включає перевірку якості матеріалів, які використовуються для виготовлення деталей, наприклад кронштейнів, а також хімічних реагентів. Цей контроль забезпечує відповідність хімічного складу матеріалів робочому кресленню, а також відсутність внутрішніх та зовнішніх дефектів, що можуть вплинути на форму та розміри виробів.

Міжопераційний контроль зосереджений на перевірці готовності обладнання до термічної обробки. Контролюються параметри обладнання, включаючи точне вимірювання та регулювання робочих температур, точне дотримання витримок під час нагріву та охолодження деталей.

Поточний контроль включає моніторинг усіх параметрів операцій: температура, час, схема садки, витрати середовища, тиск, умови охолодження та аналіз структури та властивостей виробів після обробки.

Для виявлення поверхневих дефектів використовують метод люмінесцентної дефектоскопії, що включає світіння речовин під дією ультрафіолетового випромінювання.

Вихідний контроль є важливим, оскільки після термічної обробки деталі підлягають механічній обробці та складанню. Основні види контролю якості диска після термічної обробки включають візуальний контроль для виявлення тріщин та інших поверхневих дефектів, аналіз мікроструктури та перевірку жароміцності на зразках.

Для детального визначення дефектів, що можуть виникати під час подвійного відпалу, використовують таблицю спеціальних дефектів.

Таблиця 3.13 – Дефекти ТО при подвійному відпалі.

Найменування і характеристика дефекту	Основні причини утворення дефекту	Основні заходи щодо виправлення дефекту
Недогрів — неповний відпал	Відпал при температурі нижче заданої	Повторний відпал або при нормальній температурі
Перегрів. Низькі пластичні властивості, особливо ударна в'язкість.	Тривалий відпал або при температурі вище нормальної.	При невеликому перегріві дрібних виробів — повторний відпал при нормальній температурі з тривалою витримкою. При невеликому перегріві крупних виробів — повторні двократний відпал при нормальній температурі з нормальною витримкою. При великому перегріві виробів — повторний двократний відпал (перший відпал — при температурі $750 + 100\text{—}150^{\circ}\text{C}$), другий — при нормальній температурі)
Воднева крихкість	Обумовлена виникненням і розвитком тріщин унаслідок накопичення водню на різних ділянках	Усувається внаслідок десорбції водню з металу

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Дипломний проект присвячений термічній обробці сплаву ВТ8 для титанових дисків компресору.

4.1 Аналіз потенційних небезпек

Можливість ураження електричним струмом, внаслідок порушень правил електробезпеки, несправності електроспоживчого обладнання, відсутність захисного заземлення або занулення, що може призвести до електричних травм або летального наслідку.

Можливість отримання механічних травм через потрапляння верхніх кінцівок в зону обертання абразивного круга при виконанні операції зачищення, внаслідок захаращеності робочої зони.

Можливість отримання термічних опіків, внаслідок торкання нагрітих поверхонь обладнання або деталей.

Негативний вплив теплового випромінювання, яке може призвести до ушкодження системи кровообігу.

Важкість праці – це така характеристика трудового процесу, що відображає переважне навантаження на опорно-руховий апарат і функціональні системи організму (серцево-судинну, дихальну та ін.), що забезпечують його діяльність. Важкість праці характеризується фізичним динамічним навантаженням, масою вантажу, що піднімається і переміщується, загальним числом стереотипних робочих рухів, розміром статичного навантаження, робочою позою, ступенем нахилу корпусу, переміщенням в просторі.

Незадовільні параметри повітряного середовища робочої зони через неефективну роботу системи опалення та вентиляції, що може призвести до захворювань через підвищену концентрацію в повітрі газоподібних хімічних елементів, які входять до складу насичуючих атмосфер, через порушення герметичності підводу газопроводів, як наслідок – до отруєння.

Незадовільне освітлення робочої зони, що може призвести до погіршення.

Можливість загорянь, причинами яких можуть бути порушення правил пожежної безпеки, короткі замикання, що може призвести до пожежі.

Неправильні дії персоналу в умовах надзвичайних ситуацій. Причинами неправильних дій можуть бути не досконале управління персоналу в таких умовах, відсутність навчання, інструктажів та тренінгів, що може призвести до паніки і як наслідок травмування або летального наслідку.

4.2 Заходи по забезпеченню безпеки

Для виключення ураження електричним струмом в проекті передбачені:

Організаційні заходи: проведення навчання з правил електробезпеки, перевірка знань та атестація персоналу на другу або третю групу з електробезпеки, експлуатація та ремонт обладнання повинні здійснюватись спеціально підготованим персоналом згідно НПАОП 0.00.-4.12-05 «Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці», ДНАОП 1.1.10-1.01-2000 «Правила безпечної експлуатації електроустановок».

Технічні заходи: використання захисного заземлення та занулення згідно ГОСТ 12.1.030-81. ССБТ. «Защитное заземление, зануление», ПУЕ-

2009 «Правила улаштування електроустановок»; устрій захисного відключення електроустановок при аварійній ситуації згідно ГОСТ 12.4.155-85 ССБТ «Устройство защитного отключения. Классификация. Общие технические требования», розташування струмопровідних частин на недоступній висоті згідно ГОСТ 12.2.007.14-75 ССБТ. Кабели и кабельная арматура. Требования безопасности.

Для виключення механічних травм необхідно передбачити наступні заходи захисту: устрій підлокітника, абразивний круг повинен бути захищений кожухом згідно НПАОП 27.4-7.15-86 ОСТ 48.264-86 «Огородження рухомих частин устаткування. Загальні технічні вимоги», НПАОП 28.52-1.22-64 «Правила і норми безпечної роботи з абразивним інструментом»

Для уникнення термічних опіків передбачено використання індивідуальних засобів захисту згідно ГОСТ 12.4.010-75 «Средства индивидуальной защиты. Рукавицы специальные. Технические условия», а також ГОСТ 12.4.221-2002 ССБТ «Одежда специальная, для защиты от повышенных температур теплового излучения, конвективной теплоты. Общие технические требования».

Важкість праці визначається згідно ГН 3.3.5-8-6.6.1-2002 «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу»

Для профілактики втоми застосовують скорочену тривалість робочого дня, враховують засоби механізації, автоматизації, застосовують раціональну організацію трудового процесу, максимально скорочують статичні операції, усувають зайві прийоми у роботі і т. ін.

Важкість праці виражається функціональним напруженням організму, яке виникає під впливом м'язового і нервово-емоційного навантаження, а також зовнішніх виробничих умов. У такому розумінні поняття «важкість праці» можна застосовувати як до фізичних, так і розумових та нервово-напружених робіт.

Завдяки періодам відпочинку, що регламентується законодавством, працездатність відновлюється, що є функціональною властивістю організму людини.

Отруєння аргоном у випадку втрати герметичності трубопроводів визначається згідно з НАОП 1.4.32-2.58-78 (ОСТ 4Г 0.091.241-87) „Легкозаймисті, горючі, хімічно небезпечні та шкідливі речовини. Вимоги безпеки при зберіганні, транспортуванні та використанні”.

4.3 Заходи по забезпеченню виробничої санітарії та гігієни праці

Для забезпечення задовільних параметрів повітряного середовища робочого простору (температура, вологість, швидкість переміщення повітряних мас) обов'язковим є устрій загальної приточно-витяжної вентиляції приміщення згідно ГОСТ 2.2.137-96 «Оборудование для кондиционирования воздуха и вентиляции. Общие требования безопасности», СНиП 2.04.05-91 «Отопление, вентиляция и кондиционирование», ГОСТ 30646-99 «Кондиционеры центральные общего назначения. Общие технические условия», ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.

Вибір системи освітлення залежить від зорових робіт і визначається за Державними будівельними нормами України ДБН В.2.5–28–2006 «Природне і штучне освітлення», ГОСТ 12.2.007.13-2000 ССБТ «Лампы электрические. Требования безопасности», ГОСТ МЭК 60598-2-2-2002 «Светильники. Часть 2. Частные требования. Раздел 2. Светильники встраиваемые».

В термічних цехах в якості робочого освітлення, як правило використовується система загального освітлення. Комбіноване освітлення вимагається лише на робочих місцях .

Для освітлення робочих приміщень слід використовувати світильники з люмінесцентними лампами , а також з лампами типу ДРЛ, ДРИ.

Освітленість робочих поверхонь повинна складати не менше 200лк.

Освітленість проходів і діляниць ,де роботи не проводяться , повинна складати 25% освітленості.

Перевірка освітленості на робочих поверхнях , допоміжних площах приміщень та в проходах повинна проходити регулярно , але не рідше 1 раза на рік.

Основними розрахунковим рівнянням методу світлового потоку є:

$\Phi_{\text{л}}$

де - розрахункове значення світлового потоку однієї лампи в кожному світильнику, лм;

$E_{\text{н}}$

- нормоване значення освітленості, лк;

S - площа освітлюваної поверхні, м²;

K_z - коефіцієнт запасу;

z – коефіцієнт мінімальної освітленості;

n - загальна кількість світильників;

τ - кількість ламп у одному світильнику;

η - коефіцієнт використання світлового потоку.

Для розрахунку необхідно визначити площу освітлюваної поверхні, в даному випадку використано приміщення розмірами 72X36X8(м), тобто площа освітлюваної поверхні 2592 м².

Вибираємо систему освітлення: на виробництві використовується загальне освітлення.

Визначаємо рівень нормованої освітленості (E_n) в залежності від найменшого розміру об'єкта розрізнення (більше 5 мм). Розряд зорових робіт – VII, $E_n = 200$ лк.

Вибираємо джерела світла. Так як в приміщенні замало природного світла, доцільно обрати газорозрядні лампи (ДРЛ).

Обираємо тип світильника для обраних ламп з урахуванням умов навколишнього середовища, характеристики і класу освітлювального приміщення. Світильники типу РПП: згідно ГОСТ 14254–80 IP=54, $L/h=1,4$.

Оцінюємо коефіцієнт запасу та коефіцієнт нерівномірності освітлення: $k_z = 2$; $z = 1,15$.

Оцінюємо коефіцієнт відбиття поверхонь приміщення в залежності від виділення пилу у процесі роботи. Так як робоче приміщення – темне, то маємо значення коефіцієнтів: $\rho_c = 30\%$; $\rho_{ст} = 10\%$; $\rho_{п} = 10\%$.

Розраховуємо кількість рядів світильників у приміщенні:

$$N_p = B / ((H - h) \cdot [L / h]) = 36 / ((8 - 0,8) \cdot 1,4) = 4 \text{ ряди}$$

Визначаємо максимально припустиму відстань між рядами світильників:

$$L_{\max} = B / N_p = 36 / 4 = 9 \text{ м}$$

Висота підвісу світильника над робочою поверхнею:

$$H = L_{\max} / [L / h] = 9 / 1,4 = 6,43 \text{ м}$$

Висота звисання світильника від стелі:

$$h_3 = H - h_p - h = 8 - 0,8 - 6,43 = 0,77 \text{ м}$$

Чисельне значення індексу приміщення;

$$i = A \cdot B / (h \cdot (A + B)) = 72 \cdot 36 / (6,43 \cdot (72 + 36)) = 3,73$$

Значення коефіцієнта використання світлового потоку η

$$\eta = 64\% = 0,64$$

Визначаємо сумарний світловий потік освітлювальної установки у даному приміщенні

$$\Phi_{\Sigma} = (E_n \cdot S \cdot k_z \cdot z) / \eta = (200 \cdot 36 \cdot 72 \cdot 2 \cdot 1,15) / 0,64 = 1863000 \text{ лм}$$

Визначаємо умовну загальну кількість світильників у приміщенні, виходячи з позиції розташування їх у вершинах квадрата:

$$N^* = AB / L_{\max}^2 = 36 \cdot 72 / 9^2 = 32 \text{ шт}$$

Розраховуємо світловий потік умовного джерела світла:

$$\Phi_{\text{л}}^* = \Phi_{\Sigma} / N_{\text{л}} = 1863000 / 32 = 58218,75 \text{ лм}$$

де $N_{\text{л}}$ – загальна кількість ламп у приміщенні, шт;

$$N_{\text{л}} = N^* \times n = 32 \cdot 1 = 32 \text{ шт}$$

де n – кількість ламп у світильнику

тип стандартної лампи з найближчим значенням фактичного світлового потоку лампи $\Phi_{\text{л}}$ – ДРЛ, $\Phi_{\text{л}} = 59000$, потужність 1000 Вт

$$m = \Phi_{\text{л}}^* / \Phi_{\text{л}} = 58218,75 / 59000 = 0,99$$

Оптимальна кількість світильників у приміщенні:

$$N = N^* \cdot m = 32 \cdot 0,99 = 31,68 \text{ шт}$$

Фактична кількість

$$N_{\text{ф}} = 32 \text{ шт}$$

Визначаємо розрахункову освітленість E_p у приміщенні, що створюється при застосуванні стандартних ламп:

$$E_p = (\Phi_{\text{л}} \cdot N_{\text{л}} \cdot \eta) / (S \cdot k_z \cdot z) = (59000 \cdot 32 \cdot 0,64) / (36 \cdot 72 \cdot 2 \cdot 1,15) = 202,7 \text{ лк}$$

Розраховуємо загальну потужність освітлювальної установки:

$$P_{\Sigma} = N_{\text{л}} \cdot P_{\text{л}} = 32 \cdot 1000 = 32000 \text{ Вт}$$

4.4 Заходи з пожежної безпеки

Для уникнення можливості загорянь необхідно дотримуватись правил протипожежної безпеки НАПБ А.01.001-2004. «Правила пожежної безпеки в Україні», здійснювати інструктажі та перевірки знань згідно ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ Пожарная безопасность. Общие требования, ГОСТ 12.1.033-81 ССБТ Пожарная безопасность. Термины и определения, встановлення систем пожежогасіння згідно ГОСТ 12.3.046-91 ССБТ Установки

пожаротушенияавтоматические. Общитехническиетребования, ДСТУ 3675-98 «Пожежна техніка. Вогнегасники переносні. Загальні технічні вимоги та методи випробувань», ДСТУ 3734-98 (ГОСТ 30612-99) «Пожежна техніка. Вогнегасники пересувні. Загальні технічні вимоги»

Пожежа – неконтрольоване горіння поза спеціальним вогнищем, яке призводить до матеріальної шкоди.

Горіння – це процес окислення який супроводжується інтенсивним виділенням тепла і променевої енергії. Горіння виникає коли є горюча речовина ,окислювач та джерело запалювання. Окислювачами можуть бути кисень повітря, бертолетова сіль,пероксид натрію, азотна кислота,хлор, фтор, бром, окисли азоту, тощо.

Горіння може бути повним і неповним. Повне – при достатній або надлишковій кількості окислювача і при такому горінні виділяються токсичні речовини.

Неповне – відбувається при недостатній кількості окислювача. При неповному горінні утворюються продукти неповного згорання,серед яких є токсичні речовини (чадний газ,водень).

Первинні засоби пожежогасіння – це пристрої, інструменти та матеріали, призначені для локалізації і ліквідації загоряння на початковій стадії (вогнегасники, внутрішній пожежний кран, вода, пісок, кошма, азбестове полотно, відро, лопата та ін.). Ці засоби завжди повинні бути наготові. Гасіння пожежі – це робота пожежників-професіоналів, а боротьба з загорянням посиljena для неспеціалістів. Потрібно пам'ятати, що первинні засоби застосовуються для боротьби із загорянням, але не з пожежею.

Для забезпечення пожежної безпеки в установах проводять пожежну профілактику, яка включає в себе комплекс організаційних і технічних заходів, спрямованих на забезпечення безпеки людей,запобігання пожежі, обмеження її поширення, а такожна створення умов для успішного гасіння пожежі.

Основними організаційними заходами є наявність інструкцій з пожежної безпеки, планів евакуації співробітників в разі пожежі. Основними технічними засобами пожежної безпеки є оснащення будівлі пожежним інвентарем і підтримка його в робочому стані, а також первинними засобами пожежегасіння: вогнегасниками, системами сповіщення.

4.5 Заходи безпеки у надзвичайних ситуаціях

Для забезпечення безпеки персоналу в умовах надзвичайної ситуації необхідною умовою є навчання, проведення інструктажів та тренажів згідно ДСТУ 3891-99 Безпека у надзвичайних ситуаціях. Терміни та визначення основних понять, встановлення систем передавання тривожних сповіщень та устаткування згідно ДСТУ prEN 50136-1-1:2004 Системи тривожної сигналізації. Системи передавання тривожних сповіщень та устаткування. Частина 1-1. Загальні вимоги до систем передавання тривожних сповіщень.

Надзвичайною ситуацією називається порушення нормальних умов життя людей на об'єкті або території, які викликані аварією, катастрофою, стихійним лихом, епідемією, епіфіотією, епізотією, великими пожежами, застосуванням засобів ураження, що призвели або можуть призвести до людських втрат і матеріальних збитків.

Важливим фактором забезпечення безаварійної роботи є вивчення і суворе дотримання всіма інженерно-технічними працівниками правил і норм техніки безпеки. Основними заходами по ліквідації наслідків аварій і стихійних лих є:

- оповіщення робітників і службовців, ЦО і населення, що проживає поблизу об'єкту, екстрена евакуація;
- комплексна розвідка об'єкту на якому виникла аварія;
- рятування людей з-під завалів, із оточуючих і ушкоджених будівель і споруд;

- надання медичної допомоги потерпілим від аварії, вивіз у лікувальні установи;
- гасіння пожеж;
- локалізація аварії на комунально-енергетичних мережах, перешкоджаючих веденню рятувальних робіт;
- улаштування проїздів і підходів до місць аварій;
- руйнування ненадійних конструкцій, розбирання завалів;
- демонтаж вцілілого устаткування, якому загрожує небезпека;
- організація комендантської служби.

Таким чином в проекті надано основні заходи з охорони праці для ділень термічної обробки.

Для виключення ураження електричним струмом в проекті передбачені організаційні та технічні заходи, які передбачають : проведення навчань з правил електробезпеки, перевірку знань та атестацію персоналу на четверту або третю групу з електробезпеки, експлуатація та ремонт обладнання повинні здійснюватись спеціально підготованим персоналом, використання захисного заземлення та занулення, розташування струмопровідних частин на недоступній висоті.

Для виключення механічних травм на абразивних кругах необхідно щоб, устрій підлокітника повинен знаходитися в правильному положенні, відстань між кругом і підлокітником не перевищувала 3 мм, абразивний круг повинен бути захищений кожухом.

Для уникнення термічних опіків та теплового випромінювання передбачено використання індивідуальних засобів захисту.

Для забезпечення задовільних параметрів повітряного середовища робочого простору (температура, вологість, швидкість переміщення повітряних мас) обов'язковим є кондиціонування приміщення.

Робоче приміщення повинно бути оснащене штучним освітленням, яке рівномірно має заповнювати весь простір. В проекті передбачено визначення

необхідного світлового потоку світильників для забезпечення нормованого значення освітленості робочої площини.

Для уникнення можливості загорянь необхідно дотримуватись правил протипожежної безпеки. Основними організаційними заходами є наявність інструкцій з пожежної безпеки, план і евакуації співробітників в разі пожежі. Основними технічними засобами пожежної безпеки є оснащення будівлі пожежним інвентарем і підтримка його в робочому стані, а також первинними засобами пожегасіння: вогнегасниками, системами сповіщення.

Для забезпечення безпеки персоналу в умовах надзвичайної ситуації необхідною умовою є навчання, проведення інструктажів та тренажів.

5 ЕКОНОМІКО-ОРГАНІЗАЦІЙНА ЧАСТИНА

Забезпечення високої якості та надійності виробів є ключовим чинником у підтриманні конкурентоспроможності авіаційної промисловості, де особлива увага приділяється матеріалам, які використовуються у критично важливих компонентах, таких як диски та лопатки компресору газотурбінних двигунів (ГТД). Термічна обробка титанових сплавів є однією з ключових технологій, яка дозволяє оптимізувати їх властивості для задоволення вимог до високотемпературної міцності, корозійної стійкості та довговічності.

Жароміцні титанові сплави, завдяки своїм унікальним характеристикам, зокрема високій міцності при високих температурах, малій густині та відмінній корозійній стійкості, відіграють важливу роль у підвищенні ефективності та надійності газотурбінних двигунів. Термічна обробка таких сплавів, включаючи відпал, закалювання та старіння, дозволяє досягнути оптимального балансу між міцністю та пластичністю, що є критично важливим для компонентів, які піддаються значним циклічним навантаженням та високотемпературному впливу.

Застосування передових методів термічної обробки, таких як ізотермічне старіння та багатоступеневе закалювання, дозволяє управляти мікроструктурою титанових сплавів, зокрема розміром та розподілом фаз у матриці сплаву. Це призводить до підвищення межі текучості, міцності при розтягу та стійкості до втомного руйнування при високих температурах. Окрім того, точне керування процесами термічної обробки дозволяє мінімізувати втрату пластичності, що є важливим для забезпечення довготривалої експлуатації в складних умовах роботи ГТД.

У процесі дослідження та розробки нових жароміцних титанових сплавів важливу роль відіграє також впровадження інноваційних елементів легування та технологій мікролегування, які спрямовані на подальше

підвищення їх властивостей. Використання елементів, таких як алюміній, ванадій, молібден, та рідкісноземельних металів, дозволяє досягнути значного поліпшення жаростійкості, міцності та стійкості до корозії, розширюючи тим самим можливості застосування титанових сплавів у сучасних авіаційних двигунах. Основна ідея розгляду даної роботи викладена у таблиці 5.1

Таблиця 5.1– Основна ідея проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для споживачів (користувачів)
Оптимізація термічної обробки титанових сплавів для підвищення жароміцності та втомної міцності	Виготовлення дисків та лопаток компресору газотурбінних двигунів (ГТД)	Підвищення надійності та довговічності критичних компонентів двигуна, зниження витрат на обслуговування та ремонт.
	Виробництво високонавантажених елементів авіаційної техніки, де вимагається висока жаростійкість і міцність	Забезпечення вищої безпеки польотів, підвищення ефективності авіаційної техніки за рахунок зниження маси при збереженні високих експлуатаційних характеристик.

Задля того, щоб реалізувати ідею із найбільшою для підприємства вигодою, необхідно проаналізувати характеристику потенційного ринку. Дана характеристика представлена у вигляді таблиці 5.2:

Визначаємо попередні характеристики потенційних груп клієнтів, їх та сформуємо орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи.

Таблиця 5.2 - Попередня характеристика потенційного ринку

№ п/п	Показники стану ринку моторобудування	Характеристика
1	2	3
1	Головні конкуренти АТ «Мотор Січ»	Pratt & Whitney, компанія зі Сполучених Штатів, спеціалізується на виробництві газотурбінних двигунів для авіації. Вона є частиною United Technologies Corporation і входить до лідерів галузі поряд з Rolls-Royce та General Electric у "великій трійці" виробників такого типу двигунів. Окрім двигунів для літаків, Pratt & Whitney також виготовляє газотурбінні агрегати для електрогенеруючих станцій, двигуни для локомотивів та ракетні мотори.
2	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Обсяг авіаційних перевезень постійно збільшується, що призводить до швидкого зносу двигунів і необхідності їхньої негайної заміни. Великі виробники авіаційних двигунів зазнають труднощів із встиганням за динамікою росту ринку, оскільки вони також зайняті постійним оновленням та модернізацією своєї продукції.
3	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	1. Комплексне та дороговартісне обладнання; 2. Як наслідок, значні інвестиції у придбання та обслуговування обладнання; 3. Виклики в організації технологічних процесів, включаючи розробку, імплементацію та застосування технологій, а також навчання персоналу; 4. Потреба у високому рівні інтелектуального капіталу для ефективного (швидкого та точного) застосування досягнень науково-технічного прогресу у створенні нових двигунів; 5. Строгі вимоги до стандартизації та сертифікації, як для виробника, так і для його продукції.
4	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Державна авіаційна служба України (ДАСУ) відповідає за ліцензування та сертифікацію операторів відповідно до українських авіаційних правил, які узгоджуються з

		міжнародними стандартами.
--	--	---------------------------

Таблиця 5.3 - Попередня характеристика потенційних клієнтів

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів (користувачів)
1	2	3	4	5
1	Потреба у надійному і економічному цивільному авіаперевезенні	Авіакомпанії (Ukraine Air Alliance, Мотор Січ, Antonov Airlines)	Державні стандарти з авіаперевезення, державні екологічні норми; Цінова політика;	- Висока економічність; - Мінімальне забруднення навколишнього середовища; - Якісне обслуговування після продажу (інформаційне забезпечення з ремонту та експлуатації, своєчасні поставки запчастин та ін.); - Надійність двигуну, згідно статистики;
2	Потреба в покращенні мобільності збройних сил та обороноздатності країни	ДП «Укроборонпром»	Швидкість перенавчання персоналу; Здатність до стабільної роботи при відхиленнях навколишніх факторів більших за допустимі;	- Можливість безперебійної роботи у надзвичайних ситуаціях; - Простота ремонту та експлуатації;
3	Потреба в стабільному та ефективному отриманні електроенергії у містах та віддалених районах	Мала енергетична галузь (енергетичні компанії)	Цінова політика; Норми екологічності; Строки поставки;	- Висока автоматизація процесу; - Якісне обслуговування (швидке введення в експлуатацію, профілактичні та ремонтні заходи в будь-якому районі)

Черговим етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу (таблиця 5.4) на основі виділених ринкових загроз та можливостей, та сильних і слабких сторін.

Таблиця 5.4 - SWOT- аналіз ПАТ «Мотор Січ»

Сильні сторони:	Слабкі сторони:
Виробництво економічно вигідних двигунів із високими технічними характеристиками; Незалежне виробництво авіадвигунів у співпраці з КБ «Івченко-Прогрес»; Наявність великої кількості кваліфікованого персоналу; Стабільне фінансове становище компанії.	Обмежений обсяг внутрішнього ринку; Орієнтація на ринки країн, що розвиваються; Відсутність контролю за операційною діяльністю зі сторони іноземних інвесторів.
Можливості:	Загрози:
Державні замовлення на постачання вертольотів для цивільної та військової сфер; Збільшення попиту на авіаційну техніку; Експансія на ринки Китаю та країн Південно-Східної Азії; Розробка авіадвигунів нового покоління у найближчі роки; Потреба в оновленні авіаційних парків	Політична невизначеність, що впливає на довіру до управлінських інституцій; Волатильність національної валюти; Війна росії проти України ускладнює доступ до ринків інших країн; Зростання конкуренції в секторі авіадвигунів; Підвищення цін на імпортовану сировину.

Перелік ринкових можливостей та ринкових загроз складається на основі аналізу факторів загроз та факторів можливостей маркетингового середовища. Ринкові загрози та ринкові можливості є наслідками (результатами за прогнозом) впливу факторів, і, на відміну від них, ще не є реалізованими на ринку та мають певну ймовірність здійснення.

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

Таблиця 5.5 - Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота вхо- ду у сегмент
1	Авіакомпанії	Середня	Стабільний	Висока	Складний
2	Оборонна промисловість	Висока	Зростаючий	Висока	Складний
3	Енергетична промисловість	Низька	Стабільний	Низька	Середня складність
Які цільові групи обрано: ЗСУ та ДСНС (ГТД для вертольотів та літаків)					

Отже, пріоритетом даного проекту є фокус на розвиток газотурбінних двигунів для вертольотів та літаків у секторах військової авіації та служби надзвичайних ситуацій. Ринок цивільної авіації має обмежені можливості, а поточний попит на продукцію від АТ «Мотор Січ» також є обмеженим, з огляду на їх ключову роль у цивільній авіації. Лише три з дванадцяти авіакомпаній країни використовують літаки з місцевими двигунами, і вони мають найменшу частку в пасажирських перевезеннях. Більшість внутрішніх авіаперевезень здійснюється за допомогою літаків Boeing і Airbus, двигуни до яких постачаються компаніями Rolls-Royce та Pratt & Whitney відповідно.

Зіткнувшись з проблемами у модернізації двигунів для Boeing, Rolls-Royce зазнає значних фінансових втрат через затримки в експлуатації літаків. Це підкреслює важливість вибору двигуна з точки зору ваги, ефективності споживання пального, злітно-посадкових характеристик, ресурсу мотора, стабільності роботи та вартості виробництва. Використання інноваційних жароміцних сталей, легованих поверхнево-активними елементами, може підвищити ресурс двигунів і покращити паливну ефективність, що, у свою

чергу, відкриває нові можливості для покращення конструкції лопаток та загальних характеристик двигуна.

АТ «Мотор Січ» має всі шанси розширити свою присутність на ринку, компенсуючи втрати від російського ринку. З високим науково-технічним потенціалом як конкурентною перевагою, компанія може навчитися від європейських колег щодо модернізації двигунів, а також використати новітні матеріали, розроблені спільно з ВНЗ, як «Запорізька політехніка». Швидке тестування нових двигунів та міжнародна стандартизація дозволять компанії заявити про себе на міжнародному ринку. Враховуючи вибір Pratt & Whitney як постачальника двигунів для Ан-178 на Паризькому авіасалоні 2016, АТ «Мотор Січ» має працювати над зміцненням своїх позицій у конкуренції з провідними світовими виробниками.



Про економічну доцільність використання вказаної у роботі технології термообробки необхідно судити виходячи з розрахунку фінансового результату, та врахування виробничих і невиробничих ризиків.

Визначаємо витрати на оплату праці з урахуванням балансу робочого часу одного працівника (таблиця 5.6, 5.7), визначаємо суму ЄСВ. Питома вага виробництва лопаток, над якими здійснюється експеримент складає 10% від загального випуску продукції на даних дільницях, тому баланс робочого часу становитиме 10% від річного для даного розрахунку.

При виробництві лопаток застосовують виробничі потужності плавильної дільниці, дільниці токарної обробки, поверхневої обробки, термічної дільниці та дільниці травлення. Таким чином формується собівартість лопатки безпосередньо перед передачею до складального цеху, де здійснюється збірка робочих дисків різних ступенів.

Таблиця 5.6 - Склад, чисельність та фонд заробітної плати виробничих працівників

Категорії працівників	Наявна чисельність, осіб		Тарифна ставка за розрядом виконуваних робіт, грн / годину	Ефективний фонд робочого часу, годин	Тарифний заробіток, грн.	Преміальний відсоток до тарифного заробітку	Розмір премії, тис. грн.	Річний фонд заробітної плати, тис. грн.	ЄСВ, тис. грн.
	за зміну	на добу							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Виробничі працівники, в тому числі:									
1.Основні працівники	30	45	43,52	190	372 096,0	30	111 628,8	483 724,8	81 861,12
2.Допоміжні працівники	20	25	36,50	198	180 675,0	30	54 202,5	234 877,5	39 748,5
3.Черговий та ремонтний персонал	15	20	42,10	206	173 452,0	30	52 035,6	225 487,6	38 159,4
Разом виробничих працівників	65	90	X	Всього	700 573,0	-	210 171,9	910 744,9	154 126,0

Отже, загальна сума витрат на заробітну плату для виробничого персоналу, включаючи бонуси, дорівнює 910,744.9 грн, або 50.6 грн на кожну

лопатку, з яких 483,724.8 грн припадає на основних працівників. Розмір єдиного соціального внеску (ЄСВ) визначено на рівні 22% від основної зарплати, сумуючи до 154,126 грн, у тому числі 81,861.12 грн за основних працівників. Далі аналізуємо склад, кількість та заробітну плату адміністративного персоналу (згідно таблиці 5.7), вираховуючи загальний оклад як результат множення тарифу на 10% від щорічного часового фонду (186 годин) для відповідної кількості співробітників. У результаті, щорічні витрати на заробітну плату адмінперсоналу, враховуючи бонуси, складуть 759,080.2 грн, включно з 94,116 грн для керівників дільниць. Щорічний ЄСВ для адміністративного персоналу складе 139,164.7 грн, зокрема для керівників дільниць – 20,705.52 грн.

Таблиця 5.7 - Склад, чисельність та фонд заробітної плати адмінперсоналу

Посада	Наявна Кількість осіб	Загальний Посадовий оклад, грн	Преміаль ний відсоток до окладу, %	Сума премії грн	Загальний фонд оплати праці, грн	ЄСВ, грн
1	2	3	4	5	6	7
Начальник цеху	1	17093,4	20,0	3 418,7	20 512,1	3 760,6
Заступники	2	29760,0	20,0	5 952,0	35 712,0	6 547,2
Керівники груп	5	51 708,0	20	10 341,6	62 049,6	11 375,76
Майстри дільниць	5	42 408,0	20	8 481,6	50 889,6	9 329,76
Керівник ПДБ	1	11346,0	20,0	2 269,2	13 615,2	2 496,1
Керівник ТБ	1	11904,0	20,0	2 380,8	14 284,8	2 618,9
Керівник ФЕУ	1	10230,0	20,0	2046,0	12276,0	2250,6
Керівник БВ	1	11160,0	20,0	2232,0	13392,0	2455,2
Керівник БТЗ	1	9858,0	20,0	1971,6	11829,6	2168,8
Керівник ВТК	1	11160,0	20,0	2232,0	13392,0	2455,2
Механік цеху	1	9858,0	20,0	1971,6	11829,6	2168,8
Енергетик	1	9114,0	20,0	1822,8	10936,8	2005,1
Робітники ПДБ	3	22096,8	20,0	4419,4	26516,2	4861,3
Робітники ТБ	5	39060,0	20,0	7812,0	46872,0	8593,2
Робітники ФЕУ	2	15810,0	20,0	3162,0	18972,0	3478,2
Робітники БО	2	16963,2	20,0	3392,6	20355,8	3731,9
Робітники БТЗ	2	14359,2	20,0	2871,8	17231,0	3159,0

Секретарі	2	13950,0	20,0	2790,0	16740,0	3069,0
Керівники лабораторій	5	55800,0	20,0	11160,0	66960,0	12276,0
Керівник відділу УК	1	11160,0	20,0	2232,0	13392,0	2455,2

Продовження таблиці 5.7

Робітники УК	2	16740,0	20,0	3348,0	20088,0	3682,8
Керівник Юр. Відділу	1	12090,0	20,0	2418,0	14508,0	2659,8
Робітники Юр. Відділу	2	18079,2	20,0	3615,8	21695,0	3977,4
Диспетчер	1	7440,0	20,0	1488,0	8928,0	1636,8
Голов. Інженер	1	15047,4	20,0	3009,5	18056,9	3310,4
Конструктор	1	14061,6	20,0	2812,3	16873,9	3093,6
Майстри КБ	5	54498,0	20,0	10899,6	65397,6	11989,6
Головний металург	1	15177,6	20,0	3035,5	18213,1	3339,1
Головний метролог	1	11122,8	20,0	2224,6	13347,4	2447,0
Метролог	1	9653,4	20,0	1930,7	11584,1	2123,7
Головний технолог	1	11160,0	20,0	2232,0	13392,0	2455,2
Паяльник	1	9597,6	20,0	1919,5	11517,1	2111,5
Зав. Канцелярією	1	7551,6	20,0	1510,3	9061,9	1661,4
Зав. Складом	1	8370,0	20,0	1674,0	10044,0	1841,4
Майстер контролер	5	7179,0	20,0	1435,8	8614,8	1579,4
Всього	68	632566,8	-	126513,4	759080,2	139164,7

Розраховуємо витрати на матеріали для річного виробництва програми лопаток з титанових сплавів ВТ8 та ВТ3-1 для виготовлення 18 000 штук, призначених для 60 двигунів. Вага однієї лопатки складає 0,2 кг. Отже, визначаємо обсяг сировини, необхідний для виробництва зазначеної кількості лопаток згідно з вимогами до складу сплавів. В результаті, загальні матеріальні витрати на виробництво 18 000 лопаток, що відповідають річній виробничій програмі, становлять 648 524,42 грн, або 36 гривень і 3 копійки за кожну лопатку. Сукупні витрати на матеріали для виготовлення 18,000 титанових лопаток за річну виробничу програму складають 648,524.42 грн, або 36 гривень і 3 копійки за кожну одиницю. До цього додаються витрати на

виробничі матеріали, такі як титанова губка, відрізні та шліфувальні диски, токарні різці, свердла, полірувальні матеріали, упаковка, оснащення та інструменти, у загальній сумі 350,025.58 грн.

Загальна сума витрат на сировину та матеріали досягає 998,550 грн, що виливається в середню вартість 55,475 грн на одну лопатку.

При розрахунку витрат на використанні послуги в процесі виробництва, включаючи електроенергію для переплавлення, токарної обробки, зачистки, полірування, термічної обробки, травлення та освітлення, виходячи з тарифів «Запоріжжяобленерго», сумарна вартість електроенергії на одиницю продукції включає витрати на освітлення, токарну та поверхневу обробку, термічну обробку та травлення, складаючи в цілому 33,4949 грн на лопатку.

Враховуючи витрати на водопостачання та водовідведення, а також вартість тепла та газу, зокрема аргону для термічної обробки та кисню для охолоджувачів, загальні витрати на спожиті послуги становлять 895,050 грн, або 48,225 грн на одну лопатку, відповідно до розрахунків у таблиці 5.8.

Таблиця 5.8 - Розрахунок вартості спожитих послуг

Вид послуг	Норматив у розрахунку на один. продук. (послуг)	Виробнича програма	Тарифи	Сума грн
1	2	3	4	5
Електропостачання	33,49	18 000	2,356	602 908,2
Водопостачання	3,21	18 000	54,888	57 841,2
Теплопостачання	5,76	18 000	34,56	103 680,0
Газопостачання	7,25	18 000	-	130 620,6
Разом	49,72	-	-	895 050,0

Визначаємо річну суму амортизації з урахуванням первісної вартості основних засобів та норми амортизації (табл. 5.9). Час використання

становить 10% від загального річного на ділянці. Амортизація розраховується за наступною формулою:

$$B_p = (B_n^n - Z_n^n + \sum Z_n^{n-1}) * A^n / 100 \quad (5.1)$$

де B_n^n – початкова вартість основних засобів n-ного періоду;

Z_n^n – вартість засобів, що вибули за відповідний період;

Z_n – вартість засобів, що надійшли за відповідний період;

Оскільки важко здогадатися в якому з місяців біли введені які кошти, зробимо загальний розрахунок витрат на рік за остаточною вартістю ОЗ із нормою амортизації, і віднесемо 10 % її до вартості випуску лопаток.

Таблиця 5.9 - Розрахунок амортизації

Група основних засобів	Норма амортизації, %	Первісна вартість ОЗ тис.грн	Надійшло ОЗ, тис. грн.	Вибуло ОЗ тис. грн.	Сума А, тис. грн.
1	2	3	4	5	6
Будівлі	2	23 667,00	-	-	946,68
Споруди	3	7 560,00	-	-	378,00
Передавальні пристрої	5	5 540,00	230,00	250,00	554,00
Машини та обладнання	8	73 720,00	1200,00	5810,00	5 602,72
Інструменти, прилади, меблі, інвентар	10	2 250,00	150,00	-	240,00
Інші основні засоби	10	275,00	25,00	-	30,00
Інвентарна тара	20	500,00	120,00	100,00	104,00
Предмети прокату	10	1 280,00	120,00	200,00	120,00
Разом	-	114 792,00	1 845	6 360	7 975,40

Таким чином загальна амортизація складає 7 975 400 грн.

Амортизація основних засобів, яку можна віднести на виробництво лопаток за відповідний період становить 797 540 грн, або 44,31 грн на одну лопатку.

Визначаємо повну собівартість одиниці продукції.

Повна собівартість продукції складається з виробничої собівартості продукції та витрат звітного періоду.

Виробнича собівартість продукції складається з наступних груп:

- прямі матеріальні витрати;
- прямі витрати на оплату праці;
- інші прямі витрати (втрати від браку близько 2% напівфабрикатів від загальної кількості продукції);
- змінні та постійні розподілені загальновиробничі витрати;
- постійні нерозподілені загальновиробничі витрати;
- наднормативні витрати.

Витрати звітного періоду складаються з наступних груп:

- адміністративні витрати;
- витрати на збут;
- інші операційні витрати.

В свою чергу загальновиробничі витрати складаються з наступних груп:

- витрати на управління виробництвом (витрати на оплату праці керівників ділень, відрахування на соціальні заходи апарату управління);
- амортизація основних засобів та інших необоротних матеріальних активів загальновиробничого (цехового, діленьного, лінійного) призначення;
- амортизація нематеріальних активів загальновиробничого (цехового, діленьного, лінійного) призначення
- витрати на утримання та експлуатацію основних засобів (витрати на допоміжні матеріали з догляду за обладнанням, оплата праці допоміжних працівників, відрахування на соціальні заходи допоміжних працівників,

витрати на опалювання, освітлення, водопостачання, водовідведення та інше утримання виробничих приміщень);

- Витрати, пов'язані з утриманням пожежної та сторожової охорони виробничих приміщень;

- Витрати на ремонт основних засобів;

- Суми орендної плати за користування отриманими в операційну оренду необоротними активами загальновиробничого призначення;

- Витрати на утримання, експлуатацію та ремонт об'єктів необоротних матеріальних активів загальновиробничого призначення, отриманих в операційну оренду;

- Витрати на страхування основних засобів, інших необоротних активів загальновиробничого призначення;

- Витрати некапітального характеру на вдосконалення технології та організації виробництва;

- Витрати на обслуговування виробничого процесу;

- Витрати на охорону праці та техніку безпеки;

- Витрати на охорону природного довкілля;

- Податки, збори (обов'язкові платежі);

- Інші витрати.

Інші витрати становитимуть 10% від заробітної плати основних працівників.

Всі статті відображені в таблиці 5.10.

Таким чином ВУЕО становлять 323,55 % від заробітної плати основних виробничих працівників, що на 7,85% більше за середній показник.

ЗВВ становлять 473,75 % від заробітної плати основних виробничих працівників, що на 18,44% більше за середній показник.

Таким чином повна собівартість однієї лопатки становитимуть 283,16 гривень. Загальна вартість виробництва партії лопаток складатиме 5 096 115,51. Розрахункова вартість складає 5 096 880,00 грн. Різниця між

вартістю в таблиці і розрахунковою пояснюється математичною похибкою. Похибка дорівнює 0,015%.

Таблиця 5.10 - Кошторис витрат

Калькуляційні статті	Витрати	
	у розрахунку на одиницю продукції, грн.	у розрахунку на весь обсяг продукції, грн.
Прямі матеріальні витрати	55,49	998 550,00
Прямі витрати на оплату праці	26,87	483 724,80
ЄСВ основних працівників	4,55	81 861,12
Інші прямі витрати	1,79	32 204,00
Загальновиробничі витрати		
Витрати на управління виробництвом		
Заробітна плата керівників дільниць	6,28	112 939,20
ЄСВ	1,15	20 705,52
Амортизація основних засобів	44,31	797 540,00
Витрати на утримання та експлуатацію основних засобів		
Заробітна плата допоміжних працівників	13,05	234 877,50
ЄСВ	2,21	39 748,50
Електропостачання	33,50	602 908,20
Водопостачання	3,21	57 841,20
Теплопостачання	5,76	103 680,00
Газопостачання	7,26	130 620,60
Витрати з пожежної безпеки	2,28	40 998,70
Заробітна плата чергового та ремонтного персоналу	12,53	225 487,6
ЄСВ	2,12	38 159,4
Витрати на ремонт основних засобів	11,37	204 603,20
Витрати на вдосконалення технології	2,56	46 000,00
Витрати на охорону праці	1,26	22 550,00
Разом ВУЕО	97,11	1747 474,90
Разом ЗВВ	148,85	2 678 659,62
Виробнича собівартість	237,55	4 274 995,40

Адміністративні витрати:	
--------------------------	--

Продовження таблиці 5.10

Робітники УК	2	16740,0	20,0	3348,0	20088,0	3682,8
Керівник Юр. Відділу	1	12090,0	20,0	2418,0	14508,0	2659,8
Робітники Юр. Відділу	2	18079,2	20,0	3615,8	21695,0	3977,4
Диспетчер	1	7440,0	20,0	1488,0	8928,0	1636,8
Голов. Інженер	1	15047,4	20,0	3009,5	18056,9	3310,4
Конструктор	1	14061,6	20,0	2812,3	16873,9	3093,6
Майстри КБ	5	54498,0	20,0	10899,6	65397,6	11989,6
Головний металург	1	15177,6	20,0	3035,5	18213,1	3339,1
Головний метролог	1	11122,8	20,0	2224,6	13347,4	2447,0
Метролог	1	9653,4	20,0	1930,7	11584,1	2123,7
Головний технолог	1	11160,0	20,0	2232,0	13392,0	2455,2
Паяльник	1	9597,6	20,0	1919,5	11517,1	2111,5
Зав. Канцелярією	1	7551,6	20,0	1510,3	9061,9	1661,4
Зав. Складом	1	8370,0	20,0	1674,0	10044,0	1841,4
Майстер контролер	5	7179,0	20,0	1435,8	8614,8	1579,4
Всього	68	632566,8	-	126513,4	759080,2	139164,7

Визначаємо ціну реалізації інноваційного продукту виходячи з повної собівартості продукції, відсотка податку на додану вартість, та відсотка очікуваного прибутку:

$$Ц_p = П_c \times (1 + (\%ПДВ + \% \text{ очікуваного прибутку})) \quad (5.2)$$

$Ц_p$ – ціна реалізації, грн;

$П_c$ – повна собівартість інноваційного продукту (послуги чи робіт), грн;

$$Ц_p = 283,16(1 + (0,2 + 0,15)) = 382,27 \text{ гривень.}$$

Умовно спростимо інфляційні очікування та реальну зміну вартості сировини та послуг упродовж періоду.

Визначаємо очікуваний дохід та фінансовий результат.

Таблиця 5.12 - Розрахунок фінансового результату

№ періоду	Обсяги виробництва	Обсяги реалізації	Залишок нереалізованої продукції	Собівартість, грн	Дохід, грн	Чистий дохід, грн	Прибуток, грн
1	2700	1800	900	764 532,0	688 086,0	585 968,4	(178 563,0)
2	4550	4600	-50	1 288 378,0	1 758 442,0	1 497 934,8	209 556,8
3	6400	6400	0	1812 224,0	2 446 528,0	2 084 083,2	271 859,2
4	4350	5200	-850	1 231 746,0	1 987 804,0	1 693 317,6	461 571,6
Разом	18000	18000	0	5 096 880,0	6 880 860,0	5 861 304,0	764 424,0

Таким чином при виконанні плану з виробництва двигунів завдяки виробництву нових типів лопаток матимемо прибуток в розмірі 764 424,0 гривень, що становить 15% від собівартості. Після виплати податку на

прибуток, що становить 18% від фактичного прибутку у другому, третьому, четвертому кварталі матимемо чистий прибуток у розмірі 594 686,83 гривні.

Не дивлячись на високу вартість легуючих елементів, їх доля в вартості виробництва дуже мала (близько 2,5%). Результатом розумного мікролегування жароміцних сплавів на нікелевій основі може бути підвищення моторесурсу до 15% від номінального.

Розрахуємо економічну ефективність проекту.

Ефективність розраховується за формулою:

$$E = (C_6 \times K_m - C_n) \times V_n \quad (5.3)$$

де C_6 – собівартість одиниці продукції базова (270 грн/шт.);

K_m – коефіцієнт збільшення моторесурсу (1,15);

C_n – собівартість одиниці продукції номінальна (283,16 грн/шт.);

V_n – обсяг виробництва лопаток за проектом (18000 шт.).

$$E = (270 \times 1,15 - 283,16) \times 18\,000 = 492\,120 \text{ гривень.}$$

Таким чином економічна ефективність реалізації проекту становитиме 492 120 гривень.

Найважчим і найбільш вартісним етапом щодо впровадження випуску таких елементів є розробка технології шляхом практичного виконання. Разом із цим пов'язано багато ризиків:

- важкість розрахунку кількості елементів, що вводяться задля необхідних нових механічних властивостей матеріалу;
- збільшення кількості бракованих деталей (як таких, що не відповідають новим вимогам щодо механічних властивостей);
- завчасний вихід з ладу машин і технологічного устаткування, а відповідно до цього, зміна строку введення технології у виробництво.

Не дивлячись на це саме шлях модернізації виробництва и введення нових технологій (завдяки гарній науково-технологічній базі підприємства АТ «Мотор Січ») є найбільш сприятливим шляхом розвитку.

ВИСНОВКИ

Метою цього дослідження є вивчення впливу термічної обробки на структуру та властивості компонентів газотурбінних двигунів, виготовлених з двофазних титанових сплавів, а також розробка технології термічної обробки дисків зі сплавів BT3-1, BT8, BT9.

В аналітичному розділі проведено дослідження, яке включало аналіз особливостей впливу легування та термічної обробки на структуроутворення у двофазних титанових сплавах та їх вплив на експлуатаційні властивості виробів. Також було визначено методи та матеріали для дослідження.

На основі оцінки, проведеної в третьому розділі, щодо впливу термічної обробки на структуру матеріалу, було запропоновано оптимальний варіант термічної обробки, який забезпечує найкраще співвідношення властивостей матеріалу. Розділ містить аналіз маршрутних технологій для виробів зі сплавів BT3-1, BT8, BT9. Було розраховано маси садок, тривалості нагрівання, витримки та охолодження для кожної деталі. На основі отриманих даних була розроблена технологічна карта термічної обробки. Також у цьому розділі розглянуто можливі дефекти при термічній обробці, їхні типи, причини появи, а також заходи щодо їх запобігання та усунення.

У розділі, присвяченому охороні праці та навколишньому середовищу, проаналізовано потенційні небезпеки у технологічному відділенні механічного цеху машинобудівного заводу та визначено заходи для забезпечення безпеки. Ці заходи включають залучення кваліфікованого персоналу, атестацію робочих місць, застосування правил електробезпеки, перевірку герметичності трубопроводів, дотримання протипожежних правил, навчання та інструктаж з безпеки, а також освітлення робочих місць.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Boyer R., Welsch G., Collings E.W. Materials Properties Handbook: Titanium Alloys / R. Boyer, G. Welsch, E.W. Collings. - Materials Park, OH: ASM International, 1994. - 1169 с. ISBN 978-0-87170-481-8.
2. Степнов М.Н. О сопротивлении усталости титанового сплава ВТЗ-1 в связи с поверхностным наклепом / М.Н. Степнов // Проблемы прочности. - 1985. - № 3. - С. 20-22.
3. Davydenko L.V. et al. Comparison of the Strength Properties of HeatResistant Titanium Alloys at Elevated Temperatures / L.V. Davydenko et al. // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. - 2020. - Vol. 969, 012007.
4. Ogunmefun O.A., Bayode B.L., Jamiru T., Olubambi P.A. A critical review of dispersion strengthened titanium alloy fabricated through spark plasma sintering techniques / O. Anthony Ogunmefun, B. Lawrence Bayode, T. Jamiru, Peter A. Olubambi // Journal of Alloys and Compounds. - 2023. - Vol. 960, 170407.
5. Winstone M.R. Titanium Alloys at Elevated Temperature: Structural Development and Service Behaviour (Microstructure of High Temperature Materials) / M. Winstone. - Boca Raton, FL: CRC Press, 2001. - 322 с. ISBN 978-1861251404.
6. Singh P., Pungotra H., Kalsi N.S. On the characteristics of titanium alloys for the aircraft applications / Paramjit Singh, Harish Pungotra, Nirmal S. Kalsi // Materials Today: Proceedings. - 2017. - Vol. 4, Issue 8, P. 8971-8982.
7. Moiseyev V.N. Titanium Alloys: Russian Aircraft and Aerospace Applications / V.N. Moiseyev. - London: Taylor & Francis Group, LLC, 2006. - 226 с.

8. Солонина О.П., Глазунов С.Г. Современные жаропрочные титановые сплавы и перспективы их применения в двигателях / О.П. Солонина, С.Г. Глазунов. - М.: Металлургия, 1974. - 360 с.
9. Boyer R.R. Titanium for aerospace: Rationale and applications / R.R. Boyer // *Adv Perform Mater.* - 1995. - Vol. 2, P. 349–368.
10. Gogia A.K. High-temperature Titanium Alloys / A.K. Gogia // *Defence Science Journal.* - 2005. - Vol. 55, № 2. - P. 143-173.
11. Poletti C., Kremmer S., Degischer H.P. Hot deformation studies on discontinuously reinforced Ti-Alloys / C. Poletti, S. Kremmer, H.P. Degischer // *Ti-2003 Science and Technology.* - 2003. - Vol IV. - P. 2531-2538.
12. Yolton C.F., Moll J.H. Evaluation of a Discontinuously Reinforced Ti-6Al-4V Composite / C.F. Yolton, J.H. Moll // *Titanium '95: Science and Technology.* - pp. 2755-2762.
13. Xiao B.L., Ma Z.Y. Creep behavior of TiBw/Ti and (TiBw+TiCp)/Ti in situ composite / B.L. Xiao, Z.Y. Ma // *Journal of Materials Science Letters.* - 21, 2002. - P. 859–861.
14. Хорев А.И. Фундаментальные исследования легирования титановых сплавов редкоземельными элементами / А.И. Хорев // *Вестник машиностроения.* - 2011. - №11. - С. 54-61.
15. Lutjering G., Williams J.C. Titanium & Titanium Alloys Fundamentals / G. Lutjering, J.C. Williams. - Weinheim: Springer-Verlag Berlin and Heidelberg GmbH & Co. KGaA, 2005.
16. Barussad A., Desvalles Y., Guedou J.Y. Control of the microstructure in large titanium discs. Application to the high pressure compressor of the GE90 aeroengine / A. Barussad, Y. Desvalles, J.Y. Guedou // In: *Titanium-95: Science and Technology.* - UK: The Institute of Materials, 1996. - P. 1599-1608.
17. Tan C., Sun Q., Zhang G., Zhao Y. Remarkable increase in high-cycle fatigue resistance in a titanium alloy with a fully lamellar microstructure / Changsheng Tan, Qiaoyan Sun, Guojun Zhang, Yongqing Zhao // *International Journal of Fatigue.* - 2020. - Vol. 138, 105724.

18. 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.

19. Катренко Л.А., Кіт Ю.В., Піскун І.П. Охорона праці. Курс лекцій. Практикум. / Л.А. Катренко, Ю.В. Кіт, І.П. Піскун. - Суми: ВТД "Університетська книга", 2007. - 260 с.

20. Березуцький В.В. та ін.; за ред. проф. В.В. Березуцького. Основи охорони праці: підручник / В.В. Березуцький та ін.; за ред. проф. В.В. Березуцького. - Х.: Факт, 2005. - 327 с.

21. Шоботов В.М. Цивільна оборона: Навчальний посібник / В.М. Шоботов. - К.: Центр навчальної літератури, 2006. - 438 с.

ДОДАТОК А. ПРЕЗЕНТАЦІЯ ДО ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ