

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: Оцінка впливу термічної обробки на структурні та механічні властивості титанових сплавів для виробництва лопаток компресору ГТД

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

Спеціальності 132 «Матеріалознавство»
(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)
Прикладне матеріалознавство

СМАГІН Вадим Валерійович
(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Керівник ТКАЧ Даря Володимирівна
(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Рецензент _____
(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

ВСТУП

У сучасній промисловості, зокрема в авіаційній і енергетичній сферах, велике значення має розробка та вдосконалення матеріалів, здатних ефективно працювати в умовах високих навантажень та температур. Титанові сплави, завдяки своїм унікальним властивостям, таким як висока міцність, стійкість до корозії та низька щільність, займають особливе місце серед матеріалів, що використовуються для виробництва критично важливих деталей газотурбінних двигунів, зокрема лопаток компресора.

Однак, експлуатаційні характеристики титанових сплавів значною мірою залежать від їх структурних та механічних властивостей, які, у свою чергу, можуть бути оптимізовані шляхом термічної обробки. Тому дослідження впливу різних режимів термічної обробки на структуру та властивості титанових сплавів набуває актуальності та практичного значення для підвищення надійності та довговічності лопаток компресора ГТД.

Мета даної дипломної роботи полягає в оцінці впливу термічної обробки на структурні та механічні властивості титанових сплавів, що використовуються для виробництва лопаток компресора газотурбінних двигунів. Дослідження базується на аналізі наукової літератури, експериментальних методів оцінки структурних змін та механічних випробувань, що дозволяє встановити оптимальні умови термічної обробки для забезпечення максимальної міцності, пластичності та стійкості до втомних руйнувань.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

1.1 Характеристика та умови експлуатації виробів, вимоги до матеріалів.

Лопатки компресорів є найбільш відповідальними і визначаючими елементами конструкцій газотурбінних двигунів (рис.1.1). Від досконалості конструкцій лопаток залежать надійність, легкість конструкцій авіаційних двигунів в цілому. лопатки компресорів, відповідно до умов роботи, відрізняються тонкими стінками і легкістю конструкцій. Як правило, вони виготовляються з кованих і штампованих титанових сплавів[4].

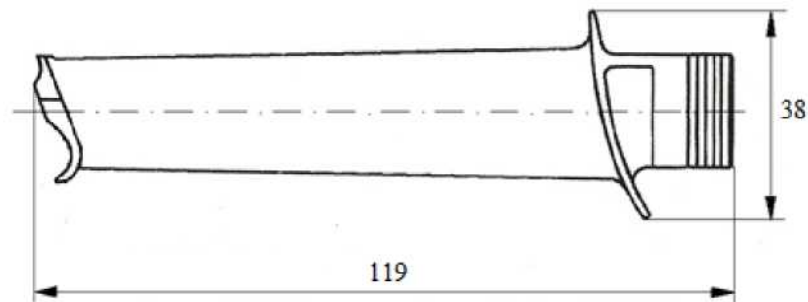


Рисунок 1.1 – Ескіз лопатки

Умови роботи лопаток складні і вельми важкі. Лопатки знаходяться під впливом величезних радіальних інерційних сил, що виникають при обертанні від лопаток і власної маси лопаток. Іншим виглядом навантаження, що діє на лопатки, є газодинамічні і газостатичні осьові сили. Вісьові газодинамічні сили виникають на лопатках, а газостатичні — внаслідок різниці статичного тиску на передню і задню сторони лопатки. Внаслідок великої поверхні, що оточується лопатками, і власній поверхні лопатки вісьова сила також може досягати великих значень, обчислюючись сотнями кілоньютонів (десятками тон). Ці осьові сили призводять до згинання лопаток. Напруження згину, що виникає при цьому, залежить від способу з'єднання лопаток з диском і з

валом, від розподілу тиску вздовж радіусу диска, від місць розташування повітряних ущільнень і інших конструктивних особливостей [4]. Напруження вигину може досягати великих значень, особливо в дисках компресорів і вентиляторів, що мають тонкі стінки і лопатки великих розмірів.

Згинання лопаток відбувається також від дії поперечних інерційних сил, які виникають при еволюціях літального апарату і при згинанні ротора на резонансних частотах обертання. Інерційні сили можуть досягати великих значень і являють небезпеку при великих розмірах лопаток і тонких дисках на рівнях компресорів і вентиляторів.

Особливі умови роботи лопаток виникають внаслідок вібрацій. Вібрації викликаються двома причинами: неоднорідністю і пульсаціями повітряного і газового потоків, що діють на лопатки і диск, і механічними діями з боку суміжних валів і корпусів, що передаються на диски через опори. Вібрації стають особливо небезпечними, якщо при певних частотах обертання роторів виникають резонансні явища. Тоді в лопатках і дисках з'являється велике додаткове динамічне напруження, яке з часом може привести до появи тріщини і інших дефектів, а в окремих випадках — до негайного руйнування.

Основні вимоги до лопаток :

- границя міцності при кімнатної температурі 1000 МПа, короткочасна 100-годин, міцність при 400°C - 750 МПа.
- границя міцності при кімнатної температурі 1200 МПа, 100-годин міцність при 500°C -650 МПа;
- задовільні пластичні властивості при кімнатній температур;
- високий опір втомі при кімнатній і високих температурах;
- високий опір повзучості.

Для лопаток і дисків компресора використовують титанові сплави ВТ8, ВТЗ-1, ВТ8М-1.

1.2 Номенклатура виробів та маршрутна технологія їх виготовлення

Номенклатура - це перелік виробів, які обробляються у виробничому підрозділі, що проектується. Для розробки технології термічної обробки виробів, вибору обладнання для виробничого підрозділу необхідно мати дані про форму, розміри, масу та основні вимоги до матеріалу. Ці дані наведені табл. 1.1.

Таблиця 1.1 - Номенклатура виробів

Назва виробу	Матеріал виробу	Маса виробу, кг	Розміри виробу, мм			Вимоги до матеріалу
			a	b	c	
1	2	3	4	5	6	7
Лопатка 1 ступені КВТ	BT8	3,3	322,3	101	93,5	>1000...1200МПа
Лопатка 2 ступені КВТ	BT8	3	349,65	101	47,75	>1000...1200МПа
Лопатка 3 ступені КВТ	BT8	2,75	359,9	101	39,25	>1000...1200МПа
Лопатка 4 ступені КВТ	BT8	2,6	367,4	101	38,5	>1000...1200МПа
Лопатка	BT3-1	22	651		123	>980МПа
Лопатка	BT3-1	16,9	676		47	>980МПа
Лопатка	BT3-1	18,78	696		142	>980МПа
Лопатка	BT8M-1	9	689		33,5	>1000...1200МПа
Лопатка	BT8M-1	9,33	703,14		84,6	>1000...1200МПа

Маршрутна технологія являє собою рух заготовок по цехам та відділенням підприємства, в ній зазначають технологічні операції, які можуть повторюватися, але мати різні призначення, режими та забезпечувати зміну

форми, розмірів, шорсткості поверхні, мікроструктури та властивостей. Схеми маршрутної технології виробів наведено в табл. 1.2

Таблиця 1.2 - Схема маршрутної технології виготовлення лопатки

№ п/п	Назва операції (комплексу	Цех (дільниця) де виконується	Призначення операції
1.	Вхідний контроль	Заготівельний цех (або заготівельна дільниця)	Контроль хімічного складу, розмірів, макроструктури, відсутності дефектів прокату
2.	Гаряча пластична деформація	Ковальський цех	Отримання заготовок необхідної форми, розмірів та створення
3.	Попередня механічна	Механічний цех	Надання заготовці необхідної форми та розмірів
4.	Основна термічна обробка	Термічне відділення	Надання матеріалу необхідної структури, механічних та
5.	Кінцева механічна	Механічний цех	Надання виробу остаточних розмірів, геометрії, шорсткості у
6.	Додаткова термічна обробка	Термічне відділення	Зняття залишкових напружень
7	Контроль	Механічний цех	Контроль ЛЮМ1-ОВ, контроль параметрів, які зазначені на

1.3 Характеристика матеріалів виробів

Титан - корозійностійкий метал, утворює на поверхні щільну окисну плівку. Наявність домішок зменшує опір корозії. При температурі понад 500°C титанові сплави легко окислюються, активно насичуються воднем з пари, що викликає явище водневої крихкості. [6] Механізм водневої

крихкості залежить від фазового складу титанових сплавів. В двофазних сплавах гідриди не утворюються через присутність Р-фази, що добре розчиняє водень, проте виникають зони пересичених воднем твердих розчинів, що викликають крихке руйнування при низьких швидкостях деформації. Із збільшенням кількості Р- фази чутливість сплавів до водневої крихкості зменшується.

Із збільшенням кількості домішок міцність титану зростає, пластичність - зменшується. Шкідливими домішками для чистого титану є вуглець, кисень, водень, азот. Ці елементи утворюють сполуки з високою твердістю, що викликають окрихчення металу. До переваг титану слід віднести високу питому міцність, здатність працювати в широкому діапазоні температур, в тому числі при температурах від 250 до 500°C.

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

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

До першої групи належать елементи, що сприяють розширенню α -області. Ці елементи - α -стабілізатори (Al, Ga, V, C, N), вони підвищують температуру поліморфного перетворення (рис.1.2)

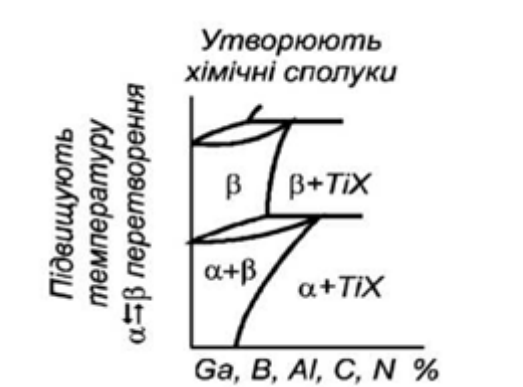


Рисунок 1.2 - Вплив елементів першої групи на поліморфізм титану

Друга група елементів - β -стабілізатори (Mo, Mn, Cr, Fe, Ni, Si, Ta, Co). Ці елементи знижують температуру поліморфного перетворення, збільшують обсяг β -області (рис.1.3).

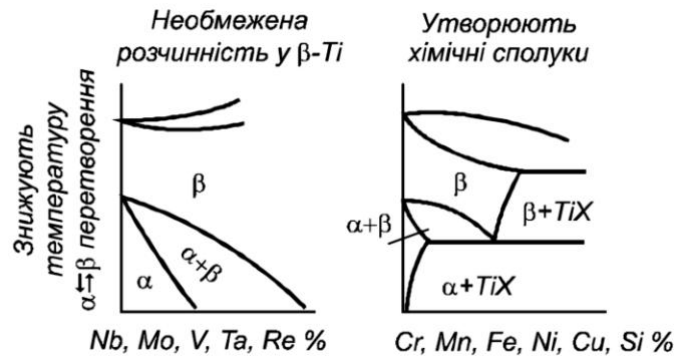


Рисунок 1.3 – Вплив елементів другої групи на поліморфізм титану

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

Хімічний склад титанових сплавів для лопаток наведено в табл. 1.3.

Таблиця 1.3 - Хімічний склад титанових сплавів

Марка сплаву	Масова частка елементів, %										
	Ti	Al	Mo	Cr	Si	Fe	C	O ₂	Zr	H ₂	N ₂
BT8	решта	5,8-7,0	2,8-3,8	-	0,2-0,4	≤0,25	≤0,10	≤0,15	≤0,5	≤0,015	≤0,05
BT3-1		5,5-7,0	2,0-3,0	0,8-2,3	0,15-0,4	0,2-0,7	≤0,10	≤0,18	≤0,5	≤0,015	≤0,05
BT8M-1		4,86-0-	3,5-4,5	0,5-1,5	0,08-0,25	-	-	-	0,3-1,5	-	-

Сплав BT8 - жароміцний титановий сплав системи Ti-Al-Mo-Si, із структурою $\alpha+\beta$. Титановий сплав, що легований алюмінієм, ізоморфними β -

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

Сплав VT3-1 - жароміцний титановий сплав системи Ti-Al-Mo-Cr-Fe-Si - деформівний. За структурним класом в рівноважному стані відноситься до двофазних, має структурою $\alpha+\beta$. Такі сплави здатні зміцнюватися термічною обробкою. В загартованому стані відноситься до мартенситного класу. Обмежена зварюваність. Деталі з цього сплаву працюють при температурі до 400°C (6000 год) і до 450°C (2000 годин).

Сплав VT8-M1 – деформівний жароміцний титановий сплав системи Ti-Al-Mo-Zr-Si відноситься до двофазних $\alpha+\beta$ -сплавам мартенситного класу. Використовується для виготовлення великогабаритних зварних і збірних конструкцій літальних апаратів, для виготовлення балонів, що працюють під внутрішнім тиском в широкому інтервалі температур до 500°C, і цілого ряду інших конструктивних елементів. Алюміній у сплавах цієї системи підвищує міцність та жароміцність. Сплав добре деформуються в гарячому стані.

Алюміній переважно розчиняється в α -фазі та зміцнює її. Алюміній – основний легувальний елемент (рис. 1.4). Переваги алюмінію в порівнянні з іншими легувальними елементами: він широко доступний та дешевий;

густина алюмінію менше ніж густина титану, тому підвищується питома міцність, ефективно зміцнює сплави при збереженні задовільної пластичності, зі збільшенням вмісту алюмінію підвищується жароміцність, підвищує модуль пружності, з підвищенням вмісту алюмінію зменшується схильність до водневої крихкості. Однак з підвищенням вмісту алюмінію зростає чутливість титанових сплавів до сольової корозії, а також зменшується технологічна пластичність.

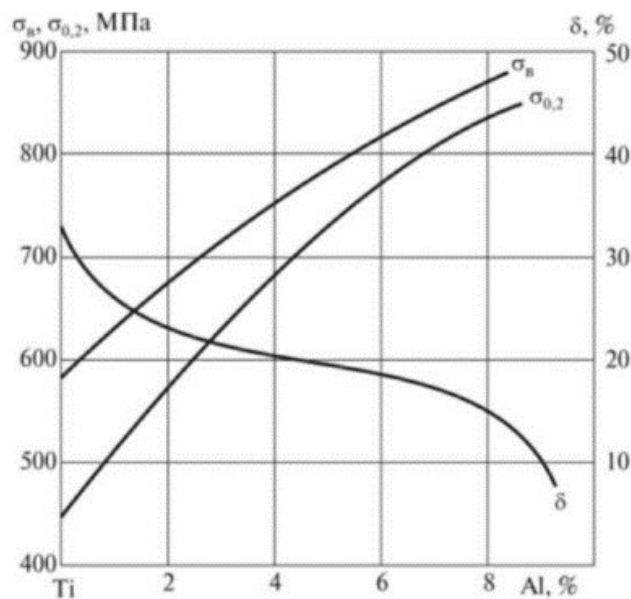


Рисунок 1.4 – Вплив алюмінію на механічні властивості титану [1].

У діапазоні концентрацій алюмінію 5-25% було виявлено присутність впорядкованої α_2 -фази (Ti_3Al), що заміщає попередньо очікувану область α -твердого розчину. Втрата термічної стабільності спостерігається при концентрації алюмінію понад 6-8%, пов'язана із формуванням α_2 -фази, що призводить до збільшення крихкості матеріалу. Додавання малих кількостей β -стабілізаторів обмежує формування α_2 -фази, дозволяючи підвищити вміст алюмінію в титані до 9% і знижуючи температуру поліморфного перетворення.

За даними дослідження [8], високий вміст алюмінію в γ -фазі забезпечує кращу стійкість до окислення порівняно з α_2 -фазою. Встановлено, що α_2 -фаза

має сильний металевий зв'язок з низькою механічною анізотропією, в той час як γ -фаза характеризується ковалентним зв'язком з високою механічною анізотропією.

Молибден утворює із β -модифікацією титану безперервний ряд твердих розчинів та обмежено розчиняється у α -модифікації. Молибден є ізоморфним β -стабілізатором, який в процесі гарячої обробки призводить до збільшення кількості пластичної β -фази. Легування молибденом ефективно підвищує міцність як і при кімнатній так і при підвищених температурах, крім того збільшує термічну стабільність сплавів, легованих хромом та залізом. Перевага молибдену – відсутність інтерметалідних фаз, які можуть окрихчувати сплав.

Хром в титанових сплавах забезпечує високу міцність при добрій пластичності та ефективність зміцнювальної термічної обробки. Водночас наявність евтектоїдного розпаду β -фази, яке може відбутися при тривалих нагріваннях загартованого сплаву при температурі нижче евтектоїдної, але вище 350°C призводить до окрихчення титанових сплавів через наявність інтерметалідної сполуки TiCr_2 .

Кремній вважається небажаною домішкою в технічному титані та конструкційних сплавах, де потрібна висока ударна в'язкість, оскільки навіть мінімальний його вміст може значно погіршити цю властивість. Проте, в жароміцних сплавах кремній є важливою легуючою добавкою, що підвищує жароміцність і жаростійкість. Оптимальна концентрація кремнію становить 0,15-0,35%, що корелює з його максимальною розчинністю в α -Ti, при цьому можуть формуватися дрібні включення силіциду титану Ti_5Si_3 , що сприяють збільшенню жароміцності [2].

Залізо, будучи одним з найсильніших β -стабілізаторів, може забезпечити створення 100% β -структури через процес гартування за наявності 6% Fe. Проте, сплави Ti-Fe виявляються термічно нестабільними, з можливістю розпаду β -твердого розчину навіть при кімнатних температурах.

Азот, як і кисень, сильно знижують пластичність титанових сплавів, тому їх вміст строго регламентується, складаючи 0,04-0,05% для азоту. Вуглець, з іншого боку, при концентрації понад 0,2% спричиняє утворення твердих карбідів, що негативно впливає на ударну в'язкість та оброблюваність сплавів, хоча в жароміцних сплавах його легування в межах розчинності може бути корисним [2].

Залізо та кремній обмежено розчиняються як в β - так і в α -модифікаціях титану та при концентраціях більших за граничну утворюють з титаном інтерметалідні сполуки Ti_5Si , $TiFe$, $TiFe_2$, Ti_2Fe . Залізо відносно мало впливає на механічні властивості титану. Однак при збільшенні вмісту заліза міцність зростає, пластичність знижується, що пояснюється утворенням при прискореному охолодженні мартенситних структур. При повільному охолодженні з β -області знижується і міцність, і пластичність внаслідок так званої β -крихкості. Підвищення вмісту кремнія на 0,1% призводить до зростання міцності, однак пластичність і особливо в'язкість при цьому суттєво знижуються. Кремній підвищує жароміцність та жаростійкість титанових сплавів[10].

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

Додавання ніобію, як автори публікації [6] зазначають, виступає в ролі ефективного β -стабілізатора в сплавах на основі $TiAl$, включаючи α_2-Ti_3Al та $\gamma-TiAl$, сприяючи формуванню організованих фаз, таких як $B_2-Ti(Al, Nb)$ або орторомбічні $O-Ti_2AlNb$. Аналогічно, ніобій та молібден, як β -

стабілізує агенти, вносять вклад у збільшення пластичності сплавів на основі TiAl через утворення обмежених кількостей β/β_2 фаз. Ванадій, який також є стабілізатором β -фази в титані, значно знижує температуру поліморфного перетворення титану зі зростанням його концентрації. Зміст ванадію понад 15% дозволяє фіксувати β -фазу через процес гартування, навіть при кімнатних температурах, тоді як при менших концентраціях можливе отримання різних співвідношень α - і β -фаз залежно від температури гартування, а також фіксація метастабільних фаз (α' , α'' і ω) [2].

Ванадій, завдяки своїй значній розчинності в титані (понад 3%), має важливе значення для створення промислових титанових сплавів, дозволяючи комбінувати переваги як однофазних α -сплавів, так і двофазних ($\alpha + \beta$)-сплавів, що забезпечує можливість термічної обробки для зміцнення та підвищену технологічну пластичність порівняно з α -сплавами [2]. Відсутність евтектоїдних реакцій і металоїдних фаз у системі Ti-V майже повністю усуває ризик крихкості через помилки у технологічних процесах, пов'язаних з нагріванням, забезпечуючи сплавам Ti-V дуже вузький діапазон кристалізації.

Як ізоморфні, так і евтектоїдоутворюючі β -стабілізатори знижують температуру мартенситного перетворення в титані [10].

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

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

ковзанню дислокацій внаслідок переходу дислокацій від α до β структури, тобто β -фаза може відігравати роль зміцнювальної фази. Водночас краща пластичність β -складової структури обумовлює кращу пластичність $\alpha+\beta$ -сплавів.

Дослідження [9] дозволяє зробити висновок, що такі елементи, як W, Ta, Mo, Cr і V, сприяють розділенню α_2 або α -фази в фазових рівновагах α/γ і α_2/γ , тоді як Zr впливає аналогічно в γ -фазі. При цьому Nb, Cu, Ni, Co, Fe та Mn з температурним зростанням переходять з γ -утворювачів в α -утворювачі. Ці зміни у поведінці розподілу пояснюються різницею у стабільності кристалічних решіток між легуючими елементами. Для фазових рівноваг лише Zr впливає на β -фазу, на відміну від інших елементів, що розділяються на γ , α_2 або α -фази.

Множинне легування вважається перспективним підходом. Жароміцність сплавів титан-цирконій-олово значно перевищує жароміцність двокомпонентних сплавів. Проте, зазвичай кількість стабілізаторів обмежують за алюмінієвим еквівалентом, запропонованим Розенбергом, щоб уникнути формування α_2 -фази:

$$\%Al + \%Sn/3 + \%Zr/6 + 10\% (O + C + 2N) < 9 \text{ мас. \%}$$

Результати численних досліджень свідчать, що для досягнення високої стійкості до повзучості при високих температурах важливо мати в структурі стабільний твердий розчин з домішками з низькою дифузійною активністю. Зазвичай використовують псевдо- α та двофазні ($\alpha+\beta$)-сплави з відносно низьким коефіцієнтом β -стабілізації (менше 0,5) для створення жароміцних матеріалів.

Жароміцні титанові сплави знаходять застосування у виробництві авіаційних двигунів, дисків, робочих і направляючих лопаток вентиляторів і компресорів, іноді кожухів компресора. Для роботи при температурі до 550 °C перевагу віддають двофазним сплавам через їх вищу міцність у

холодному стані, тоді як для експлуатації при температурах до 600 °С найкраще підходять псевдо- α -сплави.

Титанові авіаційні сплави класифікують наступним чином (рис. 1.5): сплави для виготовлення деталей вентилятора та компресора низького тиску (до температур 300–350 °С) VT6, VT22, Ti-6-4, Ti6246, Ti-17; сплави для виробництва деталей компресора високого тиску для температур до 450–500 °С – VT8-1, VT9, Ti6242S, IMI550, IMI685; сплави, призначені для виготовлення деталей компресора високого тиску для температур до 550 °С – VT25y, IMI829, IMI834; температури 600 °С, – VT18y, IMI829, IMI834.

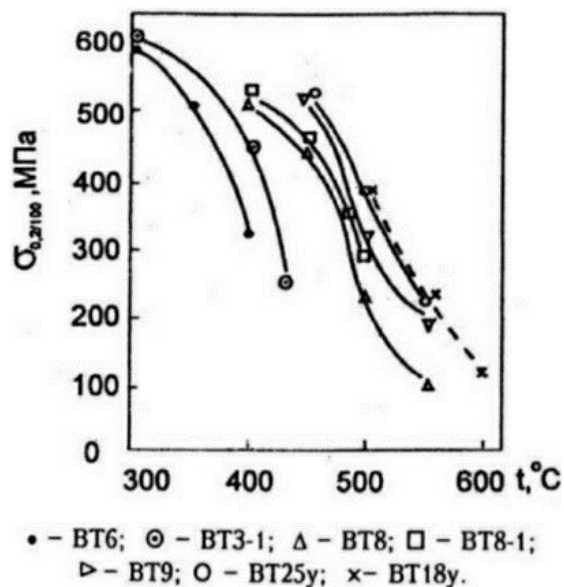


Рисунок 1.5 – Вплив температури на границю плинності титанових сплавів [4]

Сплави в одній групі мають схожі рівні міцнісні властивості, що дозволяє їх порівнювати в рамках цієї групи. Втім, таке порівняння не враховує відмінності у фазовому складі сплавів, тому не може вважатися універсальним методом, але є корисним для первинного аналізу використовуваних сплавів. Важливу роль у формуванні властивостей титанових сплавів відіграє термічна обробка. Основною вимогою до жароміцних сплавів є опір повзучості. До середини 1970-х років

термообробка сплавів проводилася в $(\alpha+\beta)$ -області, але з метою поліпшення опору повзучості згодом почали використовувати β -обробку, яка сприяє формуванню двофазної пластинчастої чи голчастої структури, збільшуючи опір повзучості [3].

Двофазні титанові сплави піддають різним видам термічної обробки .В табл. 1.4 надані механічні властивості титанових сплавів після термічних обробок.

Таблиця 1.4 - Механічні властивості титанових сплавів після різних режимів термічної обробки[ГОСТ 26492–85]

Марка сплаву	Режим термічної обробки	σв	δ	ψ	КСУ,
		МПа	%		Дж/см ²
BT8	Ізотермічний відпал 920±10°С, охолодження до 570±10°С аргон, витримка1 година, охолодження з піччю	>1000	>10	>30	>30
BT3- 1	Відпал І - 870±10°С, аргон. Відпал ІІ- 550±10°С, повітря	>980	>8	>22	>30
BT8М-1	Відпал І - 960±10°С, повітря. Відпал ІІ- 570±10°С, повітря	>1000	>10	>30	>35

1.4 Підвищення експлуатаційних характеристик титанових сплавів за рахунок термічної обробки

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

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

1.4.1 Види термічної обробки титанових сплавів

Термічна обробка використовується для зміцнення ($\alpha+\beta$) та β -сплавів титану, охоплюючи процеси, такі як рекристалізаційний відпал, фазова перекристалізація, загартовування та старіння. Титанові сплави також піддаються хіміко-термічній обробці, включаючи азотування, цементацію або окислення, для покращення зносостійкості [10].

Відпал застосовується до всіх видів титанових сплавів з метою досягнення однорідності структури та механічних властивостей, а також для завершення формування структури. Температура відпалу встановлюється вище рівня рекристалізації, але нижче точки переходу в β -фазу ($T_{\text{пп}} = 882^\circ\text{C}$) для уникнення зростання зерен. Використовуються різноманітні методи відпалу, включаючи стандартний, подвійний та ізотермічний відпал, з метою стабілізації структури і властивостей або зняття внутрішніх напружень [10].

Рекристалізаційний відпал важливий для титану та α -сплавів, особливо після холодної обробки тиском, з метою зняття наклепу. Температура рекристалізації коливається від 520 до 850 °С, залежно від хімічного складу сплаву та типу напівфабрикату [10].

Гартування і старіння використовуються для жароміцних титанових сплавів з метою отримання метастабільних фаз за допомогою загартування та їх подальшого розпаду при старінні, що сприяє виділенню дисперсних частинок α - та β -фаз. Така зміцнююча термообробка підвищує міцність сплаву за рахунок дисперсності частинок, що утворилися [10].

Хіміко-термічна обробка спрямована на поліпшення твердості, зносостійкості, стійкості до "схоплювання" при терті, втомної міцності, а також корозійної стійкості, жаростійкості та жароміцності. Використовуються методи, такі як азотування, силікування та деякі види дифузійної металізації [10].

Сплав ВТ8 вирізняється високими міцнісними та жароміцними властивостями завдяки вмісту алюмінію та легуванню кремнієм, з максимальною робочою температурою 480 °С. Сплави ВТ8-1 і ВТ8-1М переважають такі сплави, як ВТ3-1 і ВТ9, за термічною стабільністю, пластичністю, технологічністю та тріщиностійкістю. Оптимальне поєднання властивостей досягається за рахунок подвійного та ізотермічного відпалів; вміст β -фази в відпаленому сплаві становить приблизно 10%. Сплав піддається термічному зміцненню, основними видами напівфабрикатів є прутки, поковки, штампування та плити. Він добре деформується у гарячому стані, але зварювання не рекомендується. Сплав зазвичай використовується в деталях високоміцних дисків, лопатках компресора низького тиску, деталях кріплення вентилятора [1].

Проте, така обробка не забезпечує високої пластичності при кімнатних температурах та опору втомі. Вищі межі втоми спостерігаються після обробки у двофазній області, коли у сплавах формується глобулярна структура. Розроблені режими обробки для отримання бімодальної структури

забезпечують найкраще поєднання властивостей. При використанні сплавів на максимальних температурах перевагу має пластинчаста структура з більш високим рівнем жароміцності порівняно з глобулярно-пластинчастою структурою [1].

Пластинчаста структура має більшу перевагу за тривалою міцністю та опором повзучості при вищих температурах і довшому часі випробувань. При температурах нижче 400 °С глобулярна структура може забезпечити порівнянню або навіть вищу жароміцність. Різноманітність зміни властивостей при різних параметрах структури значна. Підвищення короточасної міцності, тривалої міцності (при $t \leq 450$ °С) та межі витривалості можливе при зменшенні будь-якого структурного параметра [3].

Підвищення характеристик пластичності, в'язкості руйнування, опору повзучості і тривалої міцності (при $t > 450\text{--}500$ °С) досягається в глобулярній структурі за рахунок укрупнення всіх елементів структури, тоді як у пластинчастій структурі - через збільшення розмірів α -колоній. Жароміцні властивості титанових сплавів, особливо короточасна міцність, тривала міцність і опір повзучості при високих температурах, детально вивчені. В сплавах з глобулярно-пластинчастою структурою тривала міцність і опір повзучості залежать від балансу між цими типами структур, при цьому збільшення частки пластинчастої структури підвищує ці показники [1].

1.4.2 Стабілізуюча термічна обробка титанових сплавів

Стабілізуючий відпал широко застосовується для дисків компресора метою зняття напружень, що виникають на поверхні деталей при механічній обробці. Цей відпал проводять на готових деталях при температурах, близьких до експлуатаційних [2]. Стабілізуючий відпал проводили в вакуумі при 550 °С

протягом 2 годин і вивчали його вплив на тривалу і втомну міцність сплавів ВТЗ-1, ВТ8. Було встановлено, що стабілізуючий відпал не впливає на властивості сплаву ВТЗ-1. Витривалість сплаву ВТ8 після стабілізуючого відпалу підвищується на 7 - 15%. Тривала міцність цих сплавів не змінюється. Оскільки механічну обробку дисків компресорів з титанових сплавів, на фінішних операціях проводять вручну, на поверхні дисків виникають напруги, різні за знаком і величиною. Тому рекомендується все диски піддавати стабілізуючому відпалу. Відпал проводять при температурах 530 - 600 ° С. Стабілізуючий відпал забезпечує підвищення витривалості дисків з титанових сплавів не менше ніж на 10-20%.

1.4.3 Фазові перетворення в титанових сплавах після гартування і старіння

Гартуванням і старінням зміцнюються двофазні титанові сплави. Схема утворення структур при гартуванні і старінні показана на рис. 1.6.

При гартуванні з β -області в ряді сплавів буде протікати мартенситне перетворення. На діаграмі рис 1.6 нанесені лінії початку (M_p) і кінця (M_f) мартенситного перетворення[7].

У сплавах з відносно невеликою концентрацією легувальних елементів під час гартування відбувається мартенситне перетворення $\beta \rightarrow \alpha'$ зсувного типу. Титановий мартенсит α' є пересичений твердий розчин β -стабілізуючих легуючих елементів в α -титані. Кристалічна ґратка у нього гексагональна щільнопакована, напружена. Мартенситна α' фаза не володіє високою твердістю і міцністю, однак її твердість і міцність тим більше, чим вище ступінь пересичення α' -твердого розчину легувальним елементом. Під мікроскопом ця структура голчата рис. 1.7.

Зі збільшенням вмісту β -стабілізуючого елемента при гартуванні можливе утворення α'' -фази, що представляє собою тяж пересичений твердий розчин на основі титану. Але спотворена кристалічна ґратка цієї фази швидше ромбічна, ніж гексагональна. Ромбічну α'' -фазу можна розглядати як проміжну між структурами з об'ємноцентрованої і гексагональної ґратками. Сплави титану, які містять тільки таку структуру, володіють помірною міцністю і підвищеною пластичністю, близькою до β -фази [7].

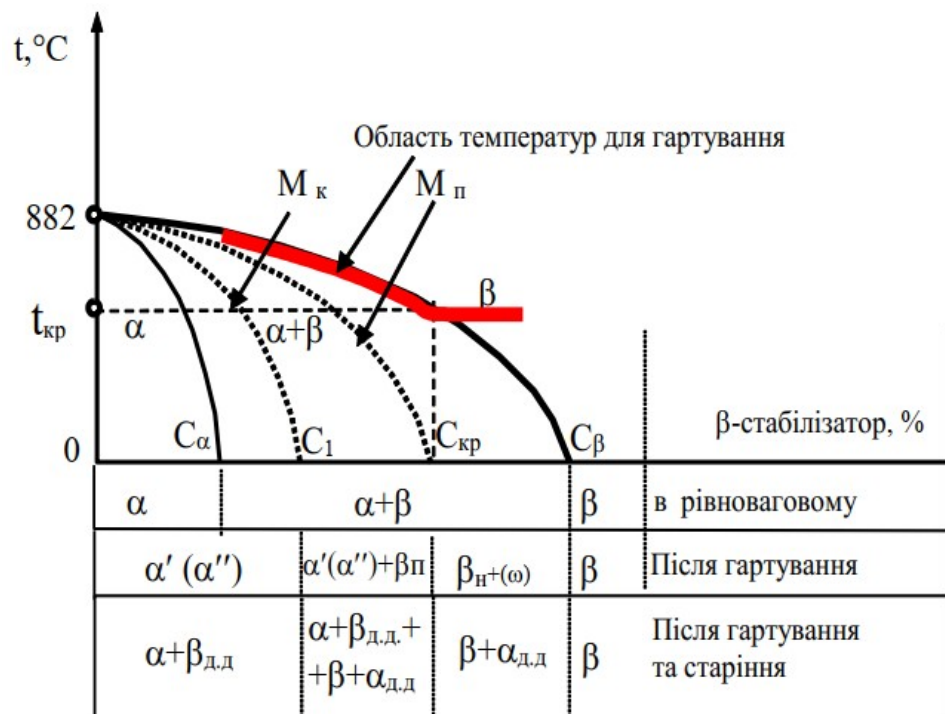


Рисунок 1.6-Загальна діаграма стану «Ті - -стабілізуючі легувальні елементи» і схема утворення структур при гартуванні і старінні титанових сплавів



Рисунок 1.7 - Титановий мартенсит $\alpha'(\alpha'')$, х400

Оскільки обидві ці фази нероздільні, то в загальному випадку титановий мартенсит позначають $\alpha'(\alpha'')$. Він утворюється при гартуванні сплавів з концентрацією легувальних елементів до точки C_1 , так як рис 2.1 в цих сплавах при гартуванні мартенситне перетворення протікає повністю. В сплавах з концентрацією легувальних елементів від C_1 до $C_{кр}$ при гартуванні мартенситне перетворення починається на лінії M_n , але не протікає повністю. В результаті утворюється титановий мартенсит $\alpha'(\alpha'')$ і фіксується нестабільна β -фаза – β_n . Співвідношення між $\alpha'(\alpha'')$ і β_n залежить від легувальних елементів і ступеня легування сплавів. Так, в сплаві ВТ 3-1 (5,5% Al, 2% Mo, 2% Cr, 1% Fe) після гартування утворюється близько 60% $\alpha'(\alpha'')$ - і близько 40% β_n -фази.

В сплавах з концентрацією легувальних елементів від $C_{кр}$ до C_β в результаті гартування фіксується нестабільна β -фаза – β_n .

Однорідний β -твердий розчин характеризується зазвичай доброю пластичністю і невисокою твердістю. Сплави з концентрацією легувальних елементів дещо більше $C_{кр}$ після гарту мають високі твердість і крихкість. Це пов'язано з появою в структурі загартованого сплаву ω -фази з гексагональної кристалічною ґраткою. Процес цей небажаний, ω -фаза усувається в процесі подальшого старіння шляхом перегріву сплаву в кінці старіння на 100 - 150 ° С протягом 30 - 60 хв[10].

При старінні відбуваються фазові перетворення дифузійного характеру, пов'язані з перетворенням фаз які утворились після гартування $\alpha'(\alpha'')$, β п і ω . Кінцевий продукт перетворення - стабільна $(\alpha+\beta)$ - структура. Можливе також утворення інтерметалідних сполук. Розпад мартенситної фази інтенсивно протікає при температурі вище 350 - 400 °С і проходить в кілька стадій. Спочатку утворюється і виділяється збіднена рівновісна α -фаза. Та, що залишилась $\alpha'(\alpha'')$ фаза збагачується легуючими елементами, стає термодинамічно нестійкою і перетворюється в дрібнодисперсну β -фазу.

Схематично цей процес можна описати так:



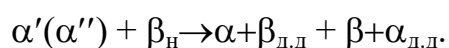
Перетворення в нестабільній β н-фазі може початися вже при 100–200 °С, але більш інтенсивно воно протікає при температурах вище 250–300 °С. У сплавах, в яких утворюється ω -фаза при гартуванні, її кількість може збільшуватися при старінні. В цьому випадку схема процесів старіння виглядає так:



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



Таким чином, сплави з концентрацією легувальних елементів від С1 до Скр зазнають перетворення під час старіння за схемою:



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

До цього часу всі перетворення в титанових сплавах при гартуванні розглядалися за умови нагріву їх до β -області (вище лінії $882\text{ }^{\circ}\text{C} - \text{C}\beta$). Однак експериментально встановлено, що при цьому можливе утворення в сплавах крупногочатої структури, що призводить до окрихчування сплавів. Для запобігання такого явища режими нагріву для гартування обираються для кожного сплаву індивідуально.

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

2 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Матеріали дослідження

У авіаційній та космічній галузях активно використовуються титанові сплави ВТ3-1 та ВТ8 для створення компонентів, що експлуатуються в умовах елевоаних температур (150 – 500 °С) завдяки їхній високій міцності та еластичності. Ці сплави вирізняються не тільки чудовими показниками міцності на одиницю маси, що лише незначно поступаються берилієвим сплавам, але й низькою електро- та теплопровідністю, високою зносостійкістю та стійкістю до абразивного зношування. Окрім того, титанові сплави демонструють відмінну корозійну стійкість проти гідроксидів, сольових розчинів, азотної кислоти та ряду інших агресивних середовищ.

Сплав ВТ3-1 є титановим матеріалом, легованим алюмінієм, β -стабілізаторами та елементами, що сприяють евтектоїдним перетворенням, як перехідними, так і неперехідними. Під час використання при високих температурах β -фаза в сплаві може розпадатися, сприяючи зміцненню матеріалу через евтектоїдну реакцію. Сплав ВТ3-1, що належить до системи Ti – Al – Cr – Mo – Fe – Si, оптимізований для тривалого застосування в температурному діапазоні 400 - 450 °С. Ізотермічний відпал на рівнях температур 850 – 880 °С та 600 – 650 °С дозволяє отримати структуру $\alpha+\beta$ з вмістом β -фази близько 15%, забезпечуючи максимальну гнучкість і термічну стабільність сплаву.

ВТ8 представляє собою деформівний жароміцний титановий сплав, легований алюмінієм, β -стабілізаторами та елементами, що утворюють евтектоїди, переважно неперехідними. Він відноситься до двофазних $\alpha+\beta$ -сплавів мартенситного типу в системі Ti – Al – Mo – Si. Додавання алюмінію, кремнію та цирконію ефективно збільшує опір матеріалу до повзучості та

забезпечує його тривалу міцність. Відпалений ВТ8 містить α -фазу, приблизно 10% β -фази та дисперсійні силіциди, що робить його придатним для застосування при температурах до 450 – 500 °С.

Розглянемо характерні властивості для вибраних матеріалів, які наведені в таблицях 2.1-2.2.

Таблиця 2.1 – Хімічний склад матеріалів [4]

Матеріал	Хімічний склад, %															
	Al	Mo	Cr	Si	Fe	C	Zr	Ni	Mn	S	P	O ₂	N ₂	H ₂	Ti	ін.ел.
ВТЗ-1	5,2 – 6,8	2,0 – 3,0	1,5 – 2,5	0,15 – 0,25	0,2 – 0,7	≤ 0,10	≤ 0,50	-	-	-	-	≤ 0,18	≤ 0,05	≤ 0,015	≤ 88	≤ 0,30
ВТ8	5,8 – 7,0	2,8 – 3,8	-	0,2 – 0,4	≤ 0,3	≤ 0,10	≤ 0,5	-	-	-	-	≤ 0,15	≤ 0,05	≤ 0,015	≤ 88	-

Таблиця 2.2 – Механічні властивості матеріалів в стані постачання [4]

Матеріал	Напрямок вирізки зразка; товщина, мм	Термічна обробка	$\sigma_{0,2}$	σ_B	δ_5	ψ	КСУ, кДж/м ²	НВ
			МПа		%			
ВТЗ-1	Повздовжнє, 10 - 60	Подвійний відпал – нагрів 880 °С, вит- римка 1 год., охолод- ження на повітрі; по- тім нагрів 550 °С, вит- римка 2–5 год., охо- лодження на повітрі	1150	1300	7	20	250	340
ВТ8	Повздовжнє, 10 - 60	Подвійний відпал – нагрів до 920 - 950°С, витримка 1 – 4 год., охолодження на повітрі; потім нагрів при 570 - 600°С, витримка 1 год., охолодження на	950	981	9	30	300	285

		повітрі					
--	--	---------	--	--	--	--	--

В таблиці 2.3 розглянемо механічні властивості сталі 20Х13 та сплавів ВТЗ-1 і ВТ8 при різних температурах.

Таблиця 2.3 – Механічні властивості при різних температурах [4]

Матеріал	t, °C	$\sigma_{\text{пц}}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	δ_5 , %	Ψ_5 , %	КСУ, кДж/м ²
ВТЗ - 1	Ізотермічний відпал – нагрів при 870 °C, витримка 1 год., охолодження до 650 °C, витримка 2 год., охолодження на повітрі						
	20	850	930	1000	10	30	-
	100	750	820	950	15	45	-
	200	650	730	900	14	52	-
	300	550	650	830	14	52	-
	400	520	630	800	15	55	-
	450	440	600	750	17	63	-
	500	370	550	670	16	69	-
	600	-	-	550	-	-	-
ВТ8	Подвійний відпал – нагрів до 920 - 950°C, витримка 1 – 4 год., охолодження на повітрі; потім нагрів при 570 - 600°C, витримка 1 год., охолодження на повітрі						
	20	780	950	1100	12	54	-
	300	550	-	880	12	52	-
	400	450	650	820	12	54	-
	450	410	-	800	12	55	-
	500	380	570	750	12	60	-
	550	300	530	720	16	68	-
	600	150	400	680	18	76	-
	650	-	-	600	22	80	-
	700	-	-	400	40	85	-

	800	-	-	200	80	92	-
--	-----	---	---	-----	----	----	---

Титанові сплави, в порівнянні зі сталлю, при температурі 500 °С мають майже 4 рази більшу питому міцність. А це означає, що вони значно легші за масою, ніж сталь, що позитивно впливає на виробництво авіаційних двигунів.

2.2 Методи дослідження

2.2.1 Метод випробування твердості за Брінелем

Визначення твердості за Брінелем є одним з найбільш поширених методів вимірювання механічних властивостей матеріалів, зокрема металів та сплавів. Суть методу полягає у вдавлюванні сталеві кульки стандартного діаметру D у поверхню випробуваного зразка під дією сталого навантаження P протягом певного часу. Після зняття навантаження на поверхні зразка залишається відбиток у формі круглого вм'ятини, діаметр d якої вимірюється за допомогою спеціалізованих приладів, таких як ТШ-2.

Твердість за Брінелем (НВ) обчислюється за формулою, яка враховує навантаження P , діаметр вдавлюваної кульки D та діаметр відбитка d , залишеного на зразку. Формула дозволяє визначити твердість як відношення навантаження до площі поверхні відбитка, що утворився, та виражається у кілограм-силах на квадратний міліметр (кгс/мм^2) або в МПа (мегапаскалях), що дозволяє оцінити механічну стійкість матеріалу до пластичної деформації.

Цей метод широко застосовується у металургії, машинобудуванні та інших галузях промисловості для контролю якості матеріалів, дозволяючи легко ідентифікувати матеріали з різною твердістю та прогнозувати їхню поведінку під час експлуатації. Однак, важливо зауважити, що метод

Брінелля найкраще підходить для вимірювання твердості м'яких та середньо твердих матеріалів, оскільки використання цього методу на дуже твердих матеріалах може призвести до пошкодження індентора (вдавлюваної кульки).

2.2.2 Випробування на розтяг

Випробування на розтяг є ключовим методом оцінки механічних властивостей матеріалів, що виконується за стандартизованими процедурами відповідно до ГОСТ 1497-73 «Методы испытания на растяжение» для кімнатних температур та ГОСТ 9651-73 «Методы испытания на растяжение при повышенных температурах» для випробувань при високих температурах. Ці стандарти забезпечують єдині підходи до проведення випробувань, дозволяючи точно та об'єктивно оцінити характеристики матеріалів.

Для випробувань використовуються універсальні випробувальні машини, здатні точно застосовувати та вимірювати навантаження на зразок. Під час випробувань величина навантаження має бути визначена з точністю до 0,5 найменшого ділення індикатора силомірного механізму, що забезпечує високу точність отриманих результатів. Діапазон навантажень підбирається таким чином, щоб забезпечити оптимальне співвідношення між мінімальною та максимальною силою опору зразка, гарантуючи тим самим надійність визначення механічних характеристик.

В процесі випробувань на розтяг фіксуються такі важливі параметри, як крива зміни сили опору деформації в залежності від абсолютного видовження зразка. Це дозволяє отримати повну картину поведінки матеріалу під час деформації, включаючи межу текучості, максимальну міцність, відносне видовження та звуження.

Завдяки випробуванню на розтяг можливо одночасно оцінити кілька ключових характеристик матеріалу, які є важливими для визначення його придатності до використання в конкретних умовах експлуатації. Такі

характеристики включають межу пропорційності, межу текучості, міцність при розтягу, відносне подовження та зменшення площі поперечного перерізу зразка. Ці параметри служать критеріями якості матеріалу та необхідні для точних конструкторських розрахунків, зокрема при проектуванні конструкцій, які піддаються механічним навантаженням.

2.2.3 Випробування на ударну в'язкість

Випробування на ударний ізгиб згідно з ГОСТ 9454-78 «Методы испытаний на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах» є стандартним методом для оцінки здатності матеріалів абсорбувати енергію під час динамічного навантаження. Цей вид випробувань дозволяє визначити властивості матеріалу під дією швидких імпульсних навантажень, які можуть виникати в реальних умовах експлуатації.

Для випробувань використовується стандартний зразок 8 типу з вказаними розмірами: довжина $L = 55$ мм, загальна висота $H = 10$ мм, висота робочого перетину $H_1 = 5$ мм, ширина $B = 10$ мм. Такі розміри зразків дозволяють стандартизувати умови випробувань та забезпечити їх відтворюваність та порівнянність результатів.

Випробування здійснюють на маятникових установках (копрах), які забезпечують ударне навантаження з граничною енергією до 300 Дж. Маятникові копри призначені для нанесення удару по зразку і вимірювання кількості енергії, поглинутої матеріалом під час деформації та руйнування. Енергія удару, яка не витрачається на деформацію і руйнування зразка, визначається за різницею між початковою потенційною енергією маятника до удару та його кінетичною енергією після проходження через нижню точку після удару.

Випробування на ударний ізгиб дозволяє оцінити такі важливі характеристики матеріалу, як ударна в'язкість, тобто здатність матеріалу поглинати енергію до моменту руйнування, що є критично важливим для матеріалів, які використовуються в конструкціях, підданих ударним навантаженням або в умовах, де можливий вплив низьких температур. Результати таких випробувань допомагають визначити придатність матеріалів для певних застосувань, оцінити їх надійність та довговічність.

2.2.4 Випробування на повзучість

Стандартні випробування на повзучість за ГОСТ 3248-81 «Метод испытания на ползучесть» спрямовані на оцінку здатності матеріалів витримувати довготривалі статичні навантаження при високих температурах без значного деформування. Головною метою таких випробувань є визначення границі повзучості матеріалу σ при певній температурі T , коли вказаний рівень деформації δ досягається протягом заданого часу τ .

Випробування на повзучість застосовують для визначення довгострокової міцності матеріалів, які використовуються в конструкціях, підданих впливу високих температур та статичних навантажень, наприклад, в енергетиці, авіації та космічній промисловості. Особливу увагу при цьому приділяють точному контролю температури на протязі всього експерименту, адже характеристики повзучості суттєво залежать від температурного режиму. Стабільність температури забезпечується завдяки ретельно контрольованому тепловому середовищу та використанню термопар для точного вимірювання температури безпосередньо на зразку.

Зразки для таких випробувань зазвичай мають плоску форму з розрахунковою довжиною 100 мм та загальною довжиною 200 мм. Точність вимірювань видовження зразка під час випробувань має бути не меншою ніж

0,002 мм, що досягається за допомогою використання високоточних індикаторів з ціною поділки 0,001 мм. Така висока точність необхідна для адекватної оцінки поведінки матеріалів під час довготривалого навантаження, дозволяючи інженерам та дослідникам розробляти більш надійні та довговічні матеріали для критично важливих застосувань.

2.2.5 Випробування на довготривалу міцність

Випробування на довготривалу міцність згідно з ГОСТ 10145-81 «Метод испытания на длительную прочность» мають на меті визначення межі довготривалої міцності або довговічності матеріалу. Цей процес є критично важливим для оцінки здатності матеріалів витримувати статичні або повільно змінювані навантаження протягом тривалого часу без втрати несучої спроможності. Визначення довготривалої міцності є ключовим для розробки та застосування матеріалів у таких галузях, як будівництво, машинобудування, авіація та енергетика, де матеріали піддаються довготривалим навантаженням при різних температурах та умовах експлуатації.

Методика випробувань на довготривалу міцність схожа на методику випробувань на повзучість, що включає використання схожих схем навантаження (розтяг) та однакових випробувальних машин. Однак, основна відмінність полягає в критеріях оцінки результатів. Під час випробування на повзучість основна увага приділяється змінам деформації матеріалу під дією постійного навантаження протягом визначеного часу, тоді як під час випробувань на довготривалу міцність фокус зміщується на визначення максимального навантаження, яке матеріал може витримати протягом тривалого періоду без руйнування.

За результатами випробувань на довготривалу міцність можна оцінити довговічність матеріалу, тобто його здатність зберігати механічні властивості та структуру під впливом постійного навантаження на протязі багатьох років або десятиліть. Ця інформація є незамінною для розробників і конструкторів, дозволяючи їм робити обґрунтовані вибори матеріалів для критично важливих застосувань, де надійність та довговічність є первинними вимогами.

2.2.6 Дослідження мікроструктури

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

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

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

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

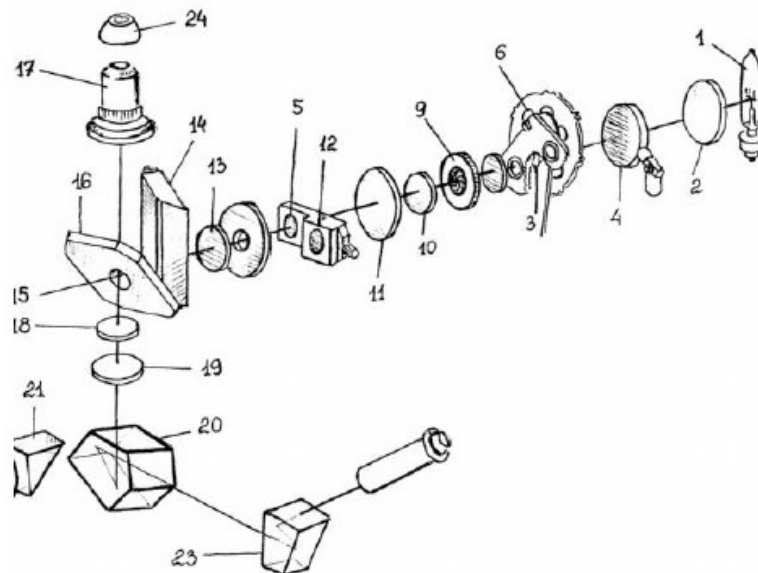


Рисунок 2.1 – Оптична схема мікроскопу МІМ-8М

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

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

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

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

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

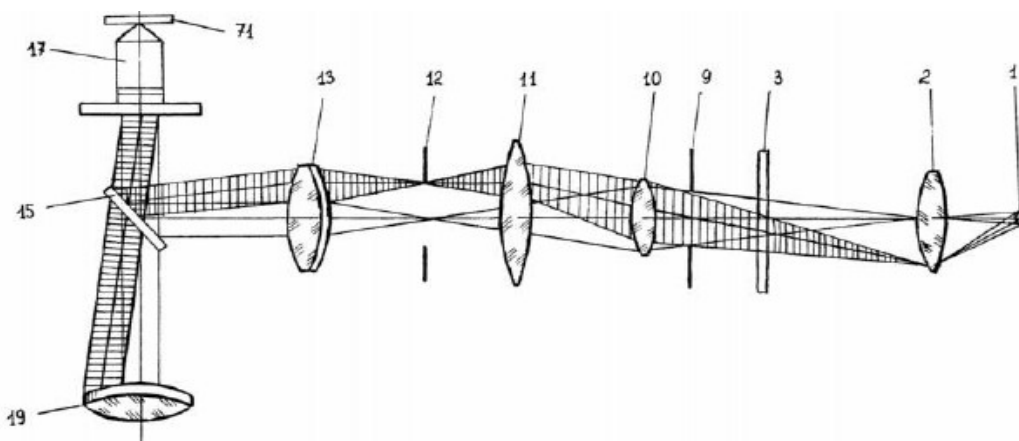


Рисунок 2.2 – Хід променів в мікроскопі при дослідженні в світловому полі

Світло, який надходить від лампи К-30 проходить через апертурну і польову діафрагму і падає на відбивальну пластину 15, котра відбиває частину світла на зразок через об'єktiv 17, а найбільша частина світла

проходить через пластину і не приймає участі в освітленні зразка. Якщо в хід променів вести призму 14 косого освітлення, то потік світла відобразиться нею на зразок через об'єктив.

Правильне використання мікроскопа відбувається завдяки раціональній комбінації об'єктивів та окулярів. Об'єктиви апохромати поєднанні з окулярами дають збільшення наведенні в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Об'єктиви апохромати та окуляри

Об'єктиви	Окуляри				
	5 ^x	7 ^x	10 ^x	15 ^x	20 ^x
F=15,7; A=0,30	-	-	150	225	300
F=8,4; A=0,65	-	-	300	450	600
F=4,3; A=0,95	-	420	600	900	-
F=2,8; A=0,30	-	630	900	1350	-
F=2,8; A=1	450	630	900	1350	-

Окрім правильної комбінації об'єктивів та окулярів, суттєве значення має і правильне використання світлофільтрів.

3 ПІДВИЩЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ ТЕРМІЧНОЮ ОБРОБКОЮ

3.1 Розробка режимів та технологій термічної обробки

Термічна обробка металів і сплавів являє собою сукупність технологічних операцій, пов'язаних з нагріванням, витримкою і охолодженням. Технологічний процес термічної обробки – це сукупність послідовно або одночасно виконуваних технологічних операцій (допоміжних, основних).

Мета термічної обробки – зміна в потрібному напрямку механічних, фізико-хімічних і технологічних властивостей без зміни основних розмірів і форми деталей чи заготовок. Таким чином термічна обробка є технологічним процесом, в результаті якого вироби з металів і сплавів отримують властивості, відмінні від тих, якими вони володіли до проведення термічної обробки.

Для лопатки із сплаву ВТ8 пропонується термічна обробка - ізотермічне відпалення [2] у вакуумній печі. Перша стадія передбачає нагрівання до 800- 950°C, на цьому етапі усувається нагартівка. Надалі сплав охолоджуються з піччю до температури (500-650°C), витримується при цій температурі, це стабілізує β-фазу, та охолодження на повітрі або у аргоні. Ізотермічне відпалення забезпечує поєднання високої міцності, жароміцності та пластичності сплаву.

При розрахунку загальної тривалості перебування виробів в печі (нагріваючому пристрої) користуються формулою:

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

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

τ_n – час нагрівання до заданої температури, хв.;

τ_b – час витримки для вирівнювання температури по поперечному перерізі, хв.;

τ_{ox} – час охолодження виробів з піччю, хв.

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

$$\tau_n = S \cdot k \cdot f \cdot L_{л}, \quad (3.2)$$

де S – характеристичний розмір виробу, мм ($93/2=46,5$ мм);

k – коефіцієнт форми (визначається за довідником) (1);

f – коефіцієнт розташування виробів у нагрівальному пристрої, який впливає на тривалість нагрівання (1,7);

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

$L_{спл}$ розраховується за формулами:

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

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

$$L_{спл} = 0,27 (0,712 \cdot 47 / 0,549 \cdot 31,275) = 1,5$$

де $L_{спл}$ – модифікований коефіцієнт легування сплаву;

c - теплоємність, кДж/(кгК), λ -теплопровідність Вт/(мК)

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

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

$$L_{Ti}=1,5 \text{ для } 920^{\circ}\text{C}, L_{ст}=0,27.$$

Для дисків компресора ГТД із сплаву ВТ8 розрахуємо необхідний час для нагрівання до 920°C для відпалення:

$$\tau_n = S \cdot k \cdot f \cdot L_{л} = 46,5 \cdot 1 \cdot 1,7 \cdot 1,5 = 118,57 \text{ хв.} = 1,58 \text{ годин.}$$

Тривалість витримки вибирається технологічно і становить 4 години при 920°C .

Час охолодження визначається за формулою:

$$\tau_{ох} = (t_{вп} - t_{вк}) / v_{ох}, \quad (3.5)$$

$$\tau_{ох} = (920 - 580) / 40 = 8,5 \text{ хв}$$

де $t_{вп}$ – температура, з якої починається охолодження виробів, $^{\circ}\text{C}$;

$t_{вк}$ – кінцева температура охолодження, $^{\circ}\text{C}$;

$v_{ох}$ – задана для матеріалу виробів швидкість охолодження в середовищі аргону, $^{\circ}\text{C}/\text{хв.}$

Для температури 580°C :

$$\tau_{вит} = 1 \text{ година (60 хв).}$$

$$\tau_{ох} = (580 - 20) / 40 = 14 \text{ хв.}$$

$$\tau_{заг} = 118,578 + 240 + 8,5 + 60 + 14 + 15 = 464,564 \text{ хв.} = 7,30 \text{ годин.}$$

Графік термічної обробки лопатки компресора зі сплаву ВТ8 на рис 3.1

Технологічну карту термічної обробки диску компресора зі сплаву ВТ8 представлено в табл. 3.1.

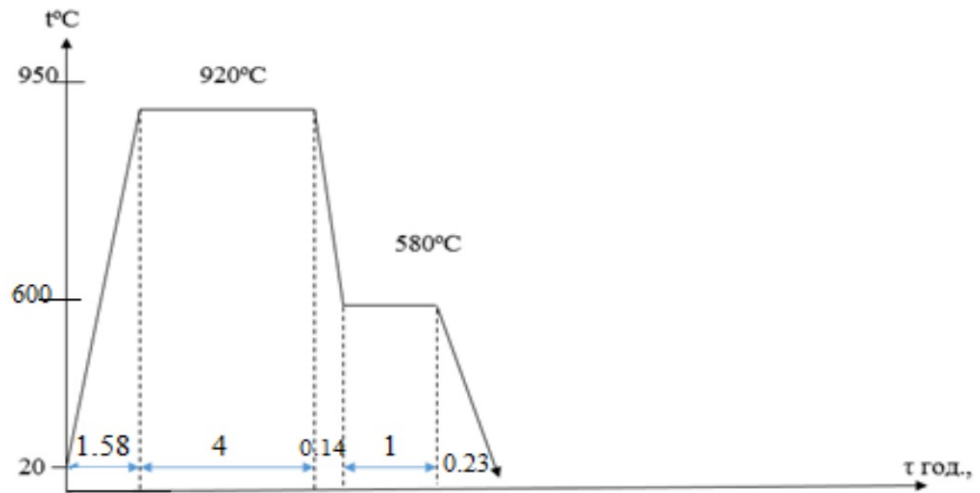


Рисунок 3.1 - Графік термічної обробки лопатки компресора зі сплаву ВТ8

Таблиця 1.9 - Технологічна карта термічної обробки сплаву ВТ8

Ескіз виробу			Технічні умови			
			Марка сплаву	Властивості		Структура
			ВТ8	$\sigma_{0,2}=1100$ МПа , $\sigma_B=1200$ МПа, $\delta_5=6\%$, $\psi=20\%$ $KCU=20$ Дж/см ²		$\alpha+\beta$
№	Назва операції	Обладнання	Режим нагрівання: t , τ , середовище та його витрати.	Режим охолодження: середовище, його тиск, температура; склад; витрати; тривалість, хв.	Назва пристосування, маса садки, кг	Умови обробки та контролю
1	2	3	4	5	6	7
1	Вхідний контроль	Стилоскоп, штангенциркуль, мікрометр				Хімічний склад, розміри, відсутність поверхневих дефектів, гострих кромки.
2	Ізотермічний відпал					

Продовження таблиці 3.1

1	2	3	4	5	6	7
2.1	Нагрівання	СЭВ - 11.8/13	$t_{п}=20^{\circ}\text{C}$; $t_{к}=920\pm 30^{\circ}\text{C}$; вакуум $\tau_{н}=1,58\text{хв}$		Кошик - 3шт	Температура нагрівання, тривалість нагрівання, кількість виробів в садці, рівень вакууму.
2.2	Витримка	СЭВ - 11.8/13	$\tau_{в}=920\pm 30^{\circ}\text{C}$ $\tau_{в}=240\text{хв}$; вакуум		Кошик - 3шт	Температура, тривалість витримки, кількість виробів, маса садки, рівень вакууму.
2.3	Охолодження	СЭВ - 11.8/13		$t_{ох}=580\pm 30^{\circ}\text{C}$ $\tau=8.5\text{хв}$ аргон		Температура початкова та кінцева, тривалість та швидкість охолодження.
3	Витримка	СЭВ - 11.8/13	$\tau_{в}=580\pm 30^{\circ}\text{C}$ $\tau_{в}=60\text{хв}$; вакуум			Температура, тривалість витримки, кількість виробів, маса садки, рівень вакууму
4	Охолодження	СЭВ - 11.8/13		$t_{ох}=20^{\circ}\text{C}$ $V_{ох}=40^{\circ}\text{C}/\text{хв}$ $\tau=14\text{хв.}$ аргон	Камера охолодження у аргоні	Температура початкова та кінцева, тривалість та швидкість охолодження
5	Контроль вихідний	ТШ, металографічний мікроскоп МИМ-8	$t_{к}=20^{\circ}\text{C}$			Контролюються: структура, властивості.

3.2 Вибір і розрахунок кількості обладнання

Вихідними даними для розрахунку кількості обладнання є річна виробнича програма, режим роботи термічного відділення, річний фонд часу роботи обладнання, режим термообробки виробів, карти технологічних процесів термообробки.

Річний фонд часу роботи обладнання

Режим роботи термічного відділення одно, двох і трьохзмінний із зупинкою на вихідні та святкові дні.

Дійсний фонд часу роботи обладнання (Φ_d) зазвичай менше (Φ_k).

Дійсний фонд часу роботи обладнання, розраховується за формулою:

$$\Phi_d = (365 - D_{\text{вих}} - D_{\text{свят}}) \cdot C \cdot t \cdot K_{\text{вик}},$$

де $D_{\text{вих}}$ – кількість вихідних днів в році (суботи і неділі – 105);

$D_{\text{свят}}$ – кількість святкових, неробочих днів – 10;

C – кількість змін у добі–2;

t – середня тривалість однієї зміни – 8;

$K_{\text{вик}}$ – коефіцієнт використання обладнання (0,90...0,94).

Дійсний фонд часу роботи обладнання Φ_d залежить від прийнятого режиму роботи, тривалості зміни, витрат часу.

Для двох змін:

$$\Phi_d = 251 \cdot 0,92 \cdot 8 \cdot 2 = 3694,72$$

Для трьох змін:

$$\Phi_d = 251 \cdot 0,92 \cdot 8 \cdot 3 = 5542,08$$

В таблиці 3.2 надана річна виробнича програма

Таблиця 3.2 – Річна виробнича програма термічного відділення

Назва виробу	матеріал	Маса 1шт.,кг	Габаритні розміри, мм	Виробнича програма
Лопатка 1ступенні КВТ	BT8	3,3	H=322.3 L=93.5	2114
Лопатка 2ступенні КВТ	BT8	3	H =349.65 L=47.75	2114
Лопатка 3ступенні КВТ	BT8	2,75	H =359.9 L=39.25	2114
Лопатка 4ступенні КВТ	BT8	2,6	H =367.4 L=38.5	2114
Лопатка	BT3-1	22	H =651 L=123	2114
Лопатка	BT3-1	16,9	H =676 L=47	2114
Лопатка	BT3-1	18,78	H =696 L=142	2114
Лопатка	BT8M-1	9	H =689 L=33.5	2114
Лопатка	BT8M-1	9,33	H =703.14 L=84.6	2114
Лопаток				185300

Розрахунок кількості обладнання проводиться за завантажувальними відомостями. Завантажувальна відомість для титанових сплавів представлена в табл. 3.3. Операція –Ізотермічний відпал. Обладнання – СЕВ-11.8/13.

Розраховуємо кількість одиниць обладнання за формулою:

$$П_p = \frac{T_o}{\Phi_d},$$

де $П_p$ – розрахункова кількість обладнання, шт,

Φ_d – дійсний фонд часу, годин

Таблиця 3.3 – Завантажувальна відомість для виробів із титанових сплавів

Найменування виробу	Матеріал	Річна програма $Q_{\text{год}}$		Маса 1 шт, кг	Вмістимість садки P_c		Кількість садок в рік, кг, M_c	Час нагріву на одну садку Σ год	Необх. час роботи печі з, год
		шт	кг		шт	кг			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Лопатка 1ступенні КВТ	BT8	2114	6975,07	3,3	21	69,3	100	7,30	730
Лопатка 2ступенні КВТ	BT8	2114	6341,5	3	42	126	50	7,30	365
Лопатка 3ступенні КВТ	BT8	2114	5813,08	2,75	42	115,5	50	7,30	365
Лопатка 4ступенні КВТ	BT8	2114	5496	2,6	42	109,2	50	7,30	365
Лопатка	BT3-1	2114	46504,6	22	5	110	422	7,30	3080,6
Диск	BT3-1	2114	35724,04	16,9	14	236,6	151	7,30	1102,3
Лопатка	BT3-1	2114	39698,08	18,78	4	75,12	528	7,30	3854,4
Лопатка	BT8M-1	2114	19024,64	9	17	153	124	7,30	905,2
Лопатка	BT8M-1	2114	19722,21	9,33	8	74,64	264	7,30	1927,2
Тз						12694,7			

$$P_p = \frac{12694.7}{3694.72} = 3,43 \text{ шт},$$

де $P_{\text{пр}}$ – прийнято кількість обладнання, шт., $P_{\text{пр}} = 4$

K_z – коефіцієнт завантаження обладнання:

$$K_z = \frac{P_p}{P_{np}} = \frac{3.43}{4} = 0,85$$

Таблиця 3.4 – Зведена відомість обладнання

№ п/п	Обладнання	Технологічна операція	Річний випуск виробів, кг	Кількість обладнання, шт		Коефіцієнт завантаження K_z
				Пр	Ппр	
1	СЭВ-11.8/13	Ізотермічний відпал	185300	3,43	4	0,85
3	Мийна машина ММК-600	Промивання виробів	536000		1	
4	Ванна для ультра- звукового очищення	Очищення виробів	536000		1	
5	Твердомір	Контроль твердості			2	
6	Мікроскоп	Контроль мікроструктури			2	
	Усього				10	

Загальна площа ділянки розраховується за формулою:

$$P_{\text{заг}} = P_{\text{кор}} + P_{\text{доп}} + P_{\text{прох}}$$

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

$P_{\text{кор}} = \text{норма} = 50 \dots 90 \text{ м}^2 \text{ на одиницю обладнання}$

$$P_{\text{кор}} = 10 \cdot 80 = 800 \text{ м}^2$$

де $P_{\text{доп}}$ – допоміжна площа, яка включає склади для деталей, що надходять на термічну обробку, міжопераційні склади, склади допоміжних матеріалів, пристосувань та ін.

$$P_{\text{доп}} = 25\% P_{\text{кор}} = 800 \cdot 0,25 = 180 \text{ м}^2$$

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

$$P_{\text{прох}} = 25\% P_{\text{кор}} = 800 \cdot 0,25 = 180 \text{ м}^2$$

$$P_{\text{заг}} = 800 + 180 + 180 = 1080 \text{ м}^2$$

Побутові приміщення проектується у вигляді прибудови, розташованої з торця будівлі і збоку.

Термічне відділення прямокутної форми, що забезпечує ефективне видалення шкідливих виділень аерації. Для спорудження будівлі застосовуються збірні залізобетонні конструкції.

Несучими елементами будівлі є колони. Ширина ділянки 12 м. Довжина визначається наступним чином:

$$L = \frac{P_{\text{заг}}}{Ш} = \frac{1080}{18} = 60 \text{ м}$$

де Ш – ширина відділення.

Довжина приймається кратною кроку колони (крок колони 6 м).

Приймаються $L = 60 \text{ м}$.

Загальна площа ділянки:

$$P_{\text{заг}} = 18 \cdot 60 = 1080 \text{ м}^2$$

Ширина ворот 4,0 м.

Відстань між обладнанням і стінами або колонами – 2,0 м, між печами та обладнанням 1,0-1,5 м. Транспортні проїзди 3,0 м. Відділення має 2 виходи. Відділення оснащено кран-балкою, кара. За пожежонебезпеки термічне відділення відноситься до категорії Г. Підлога в термічному відділенні термостійка – рифлена металева плитка, легко очищується від забруднень.

3.3 Технічний контроль, попередження та виправлення браку

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

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

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

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

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

Контроль здійснюється відповідно до технічних умов (ТУ), в яких перераховані об'єкти, що підлягають перевірці, контрольовані

характеристики і методичні засоби контролю, відсоток контролю від партії, садки, розкид, що допускається, у властивостях, а також відповідно до ГОСТу. Контроль може бути вибіркоvim і стовідсотковим.

У багатьох випадках великий вплив на експлуатаційну стійкість готових виробів робить стан поверхні, наявність шорсткості. Поверхневі дефекти значною мірою знижують довговічність виробів, що піддаються в процесі експлуатації знакозмінним навантаженням. Усе це, природно, вимагає дуже ретельного контролю стану поверхні[12].

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

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

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

В табл. 3.5 надані дефекти дисків зі сплаву BT8 , причини їх виникнення та можливість виправлення.

Таблиця 3.5 - Дефекти після ізотермічного відпалу диску зі сплаву BT8.

№	Вид дефекту	Причина появи	Засоби по запобіганню	Заходи з усунення
1	2	3	4	5
1	Крупнозерниста + структура	Перегрів (нагрівання вище температури поліморфного перетворення)	Дотримання заданих температури та часу нагрівання	Повторна термічна обробка

Продовження таблиці 3.5

2	Тріщини	Неметалеві включення та інші концентратори напружень	Вилучення неметалевих включень додатковою обробкою (переплав)	Дефект не виправний
		Завищена швидкість нагрівання	Нагрівання з регламентованою швидкістю	
		Завищена температура нагрівання	Дотримуватися регламентованої температури нагрівання	
3	Короблення	Нераціональне розташування виробів в садці	Дотримання схеми садки при її формуванні	Рихтування або механічна обробка
4	Окислення	Несправність обладнання - низький вакуум	Дотримання високого вакууму	Невиправний дефект
5	Не відповідна структура	Перегрів або не достатня температура нагріву	Дотримання заданих температур	Повторна термічна обробка
		Невідповідний сплав за хімічним складом	Проведення контролю	Невиправний дефект

3.4 Обладнання відділення

Обладнання термічного відділення поділяється на основне та допоміжне. До основного відноситься обладнання, яке застосовується для

виконання технологічних операцій, пов'язаних з нагріванням та охолодженням виробів: печі. До допоміжного обладнання відносяться:

- установки для приготування контрольованих атмосфер;
- засоби механізації – кран-балки, тельфери, тощо.

У відділенні, яке було спроектовано, декілька видів обладнання (печі СЭВ, СШВ, гартівний, мийна машина), передбачено встановлювати дане обладнання згідно порядку термічної обробки.

Піч СЭВ складається з нагрівальної камери, камери охолодження, роздільної заслінки, опори для піддону та пристрою для підйому і опускання піддону, візка для завантаження та вивантаження, піддону з деталями, вакуумних відкачуючих насосів та клапанів, пристроїв постачання охолоджувального газу, джерела живлення нагрівачів, пульту керування, підставки та пульту керування для подачі і відводу води.[3]

Нагрівальна камера являє собою сталений герметичний водоохолоджуваний кожух. Всередині камери встановлені теплоізоляційні матеріали із графітової вати і графітові трубчаті нагрівачі. Зверху камера

закривається водоохолоджуваною кришкою. В кожусі передбачені виводи нагрівачів, термопари, трубопровід для вводу аргону, вакуумний затвор бустерного насосу.

Камера охолодження також являє собою сталевий герметичний водоохолоджуваний кожух, який встановлюється на фундамент на чотирьох стійках. Зверху до камери охолодження прифланцюється камера нагрівання з розділовою заслінкою. Камера охолодження має герметичні дверцята для завантаження та вивантаження піддонів з деталями, клапан для вводу газу, клапан для напуску повітря та оглядове вікно. Дверцята камери охолодження герметично закриваються за допомогою чотирьох затискачів.

Всередині камери охолодження знаходиться пристрій для підйому і опускання піддону з камери охолодження в камеру нагрівання і навпаки. Пристрій приводиться в рух стисненим повітрям. Всередині камери

охолодження є теплообмінник і вентилятор, який забезпечує швидке охолодження садки за допомогою газу охолодження (аргону).

Коли піддон з деталями знаходиться в нижньому положенні, камера нагрівання перекривається розділовою заслінкою.

Розділова заслінка призначена для вакуумної ізоляції і теплоізоляції, що забезпечує збереження вакууму всередині камери нагрівання в той час, коли в камері охолодження можна вести охолодження деталей в вакуумі або охолоджуючим газом. Розділова заслінка приводиться в рух стисненим повітрям.

Візок служить для завантаження та вивантаження піддону з деталями з печі і являє собою горизонтально розміщений рогац, встановлений на платформі.

Вакуумний блок складається з двох масляних насосів, механічного бустерного насосу, паромасляного дифузійного насосу, вакуумних трубопроводів з клапанами і вентелями, які забезпечують тиск в робочому об'ємі камери нагрівання і охолодження.

Автоматичне управління температурою виконується за допомогою пристрою «Протерм», який програмно регулює встановлену температуру.

Температура всередині печі реєструється багатоточковим самопишучим пристроєм. Одночасно реєструється тиск всередині камери нагрівання.

Управління вакуумною відкачкою, нагріванням та охолодженням виконується в ручному режимі і в автоматичному за заздалегідь заданою програмою.

Газоочисник служить для очищення аргону за допомогою водню.

Принцип роботи пароструминних масляних вакуумних насосів заснований на випаровуванні масла і захоплення його частинками відкачуваного газу. Масло випаровується електричним нагрівачем і, виходячи через зонтичні сопла з високими швидкостями, захоплює частинки газу, потім пари масла конденсуються під впливом охолоджуваних водою

стінок насоса. Чим нижче температура охолодження газу, тим вищий вакуум може створити насос. Пристрій спеціальних відбивачів дозволяє зменшити кількість мастила, що виходить із насоса. У термічних печах використовуються пароструминні насоси.

Високовакуумні дифузійні, що працюють при тиску 10^{-2} - 10^{-4} Па, і брустерні, що відкачують великі кількості газу при тисках $1,0$ - 10^{-2} Па. У високовакуумних дифузійних насосах (рис. 3.2, а).

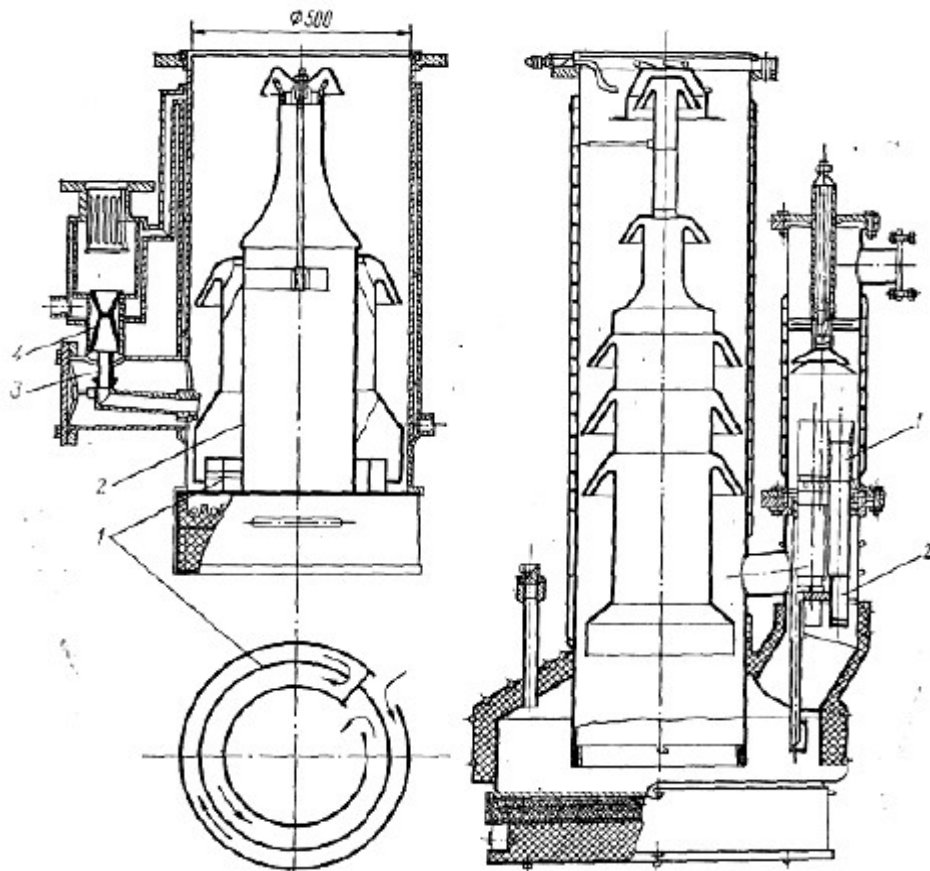


Рисунок 3.2 - Високовакуумні насоси для створення вакууму в термічних печах

Остання ступень виконується у вигляді електронного сопла 3 з дифузором 4, що дозволяє підвищити випускний тиск. У насосах застосовуються силіконові (ВКЖ-94А, ВКЖ-94Б) масла.

У високовакуумних дифузійних масляних насосах вони розганяються по фракціям. Для цього в насос вводять розділові циліндри 2, лабіринтові

кільця Тоді летючі фракції мастила випаровуються на ділянках зовнішніх паропроводів, а важкі фракції доходять до центру, створюючи центральну струміль пари і забезпечуючи тим самим швидкодію насоса. Легкі фракції завдяки високому тиску насиченої пари підвищують випускний тиск відкачуваного газу.

Транспортні засоби призначені для доставки до робочих місць різних матеріалів, заготовок, напівфабрикатів і перевезення готових виробів. Від їх чіткої та оперативної роботи залежить безперервність виробничого процесу і, отже, продуктивність праці на робочих місцях.

В термічному відділенні для підйому, завантаження і розвантаження важких виробів і деталей застосовуються кран-балки. Кран-балки є основним вантажопідйомним устаткуванням виробничих цехів, відкритих і закритих складів, загального призначення з електричним приводом, являє собою різновид підйомного мостового типу кранів. По конструкції вони однобалочні. Вони використовуються також для внутрішньо цехового транспортування вантажів і для підйому устаткування при монтажі і ремонті. Іноді за допомогою кран-балок виконують транспортні операції при термічній обробці (наприклад, вивантаження виробів і деталей з печі, занурення їх в гартівний бак).

На рисунку 3.3 зображена опорна кран-балка, яка використовується в спроектованому термічному відділенні.

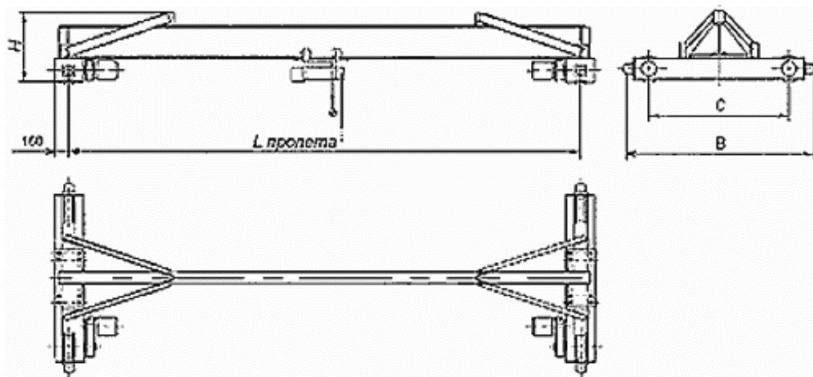


Рисунок 3.3 – Опорна кран-балка

В однобалочних кранах замість візка зазвичай встановлюється тельфер. В деяких конструкціях управління тельфером і пересування крана проводиться підвісним кнопковим механізмом з підлоги цеху. Такі крани називаються електричними кран – балками.[1]

Тельфер - підвісний вантажопідйомний пристрій (таль) з електричним приводом, забезпечує значну швидкість як підйому вантажу по вертикалі, так і переміщення його уздовж балок.

Схема тельфера зображена на рисунку 3.4.

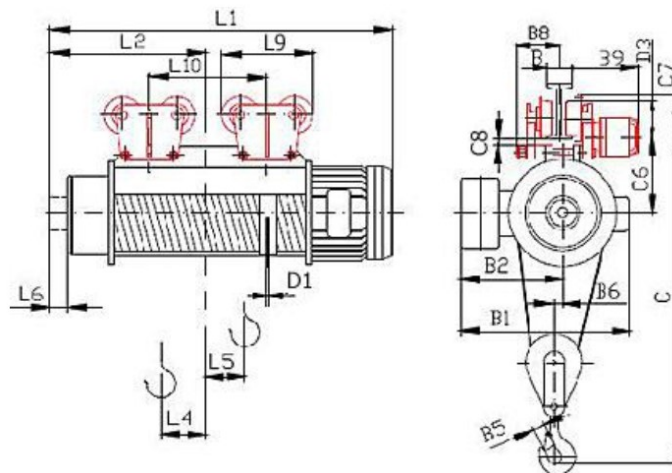


Рисунок 3.4 – Схема тельфера

3.5 Зміцнювальна термічна обробка сплаву ВТ8

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

За допомогою рентгеноструктурного фазового аналізу і електронноструктурного мікродослідження встановлено, що зміцнення при термічній обробці двофазних ($\alpha + \beta$) - сплавів досягається за рахунок

утворення під час гартування метастабільних β -, α'' - і α' -фаз і розпаду їх при подальшому старінні з виділенням дисперсних частинок α - і β - фаз [16].

Зміцнювальна термічна обробка сплаву ВТ8 зберігає свою ефективність тільки при температурах експлуатації не більше 450°C.

Фазовий склад сплаву ВТ8 зманюється в залежності від температури нагрівання і швидкості охолодження процесу гартування з 1000°C поряд з α' -фазою фіксується β -фаза, а після гартування з 900 °C фіксується α'' - α - і β - фази.

Після нагрівання до 650 - 850 °C швидкість охолодження не впливає на тимчасовий опір розриву. Пластичність деформованого сплаву ВТ8 підвищується, а міцність знижується після нагрівання до 850 — 900 °C незалежно від швидкості охолодження. Після нагрівання до 950 — 1000°C з підвищенням швидкості охолодження тимчасовий опір розриву зростає, а пластичність падає[6].

Межа повзучості сплаву з підвищенням температури гартування знижується і досягає мінімального значення після гартування з 900°C, а потім зростає з подальшим підвищенням температури до 950 — 1000°C. Після гартування з 1000 — 1200°C різко знижуються пластичні властивості.

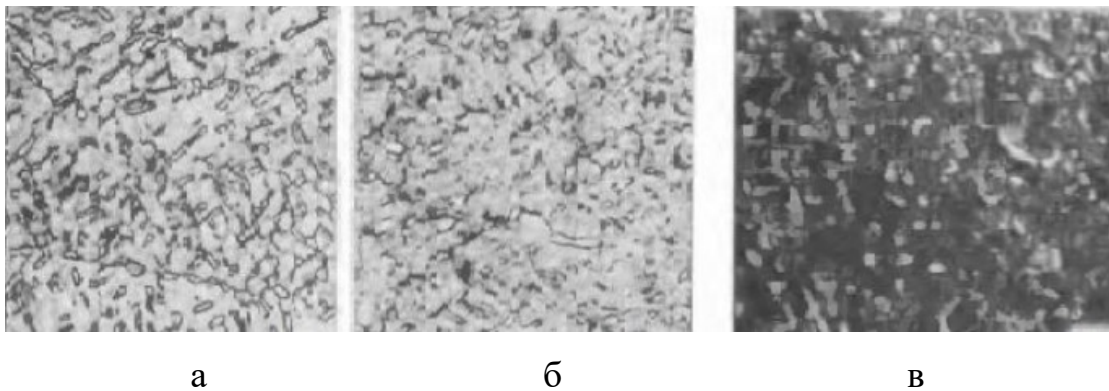
Після гартування з 975 °C в структурі сплаву спостерігається зерна первинної α -фази на фоні метастабільної β -фази. При швидкому охолодженні з 1000°C мікроструктура буде α' -мартенсит рис 3.5.

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

Чим повільніше охолодження, тим грубіша структура метастабільної β -фази, кількість виділеної α -фази більше і їх розміри крупніші.

Старіння сплаву ВТ8 призводить до збільшення границі міцності і зниженню пластичності із-за розпаду нестабільних фаз. Найбільш висока міцність досягається після старіння при 400 і 500 °C впродовж 1-ї години. Збільшення температури старіння до 700 °C знеміцнює сплав. На рис 3.6

показана мікроструктура ВТ8 після гартування та старіння при температурах 400, 500, 600 °С.



а - 400 °С; б - 500 °С; в - 600 °С

Рисунок 3.5 - Мікроструктура сплаву ВТ8 після гартування 950°С та старіння, х500

Зниження температури нагрівання при гартуванні з 975 до 950 °С майже не впливає на властивості після старіння рис. 1.7 [6].

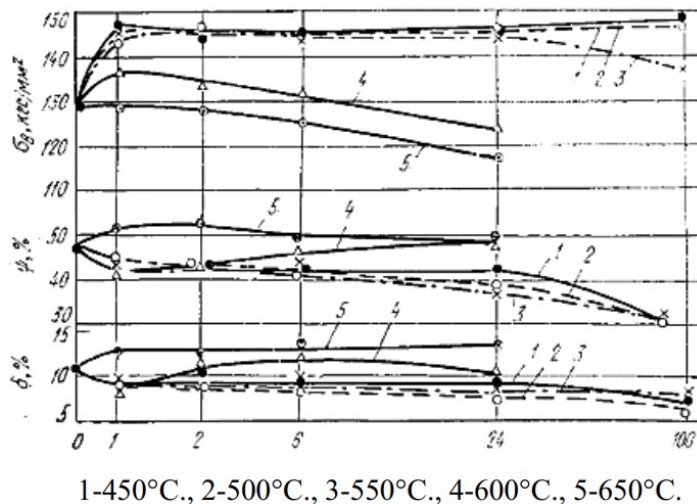


Рисунок 3.6 - Вплив часу старіння на механічні властивості сплаву ВТ8 після гартування 950°С[6]

В процесі повільного охолодження з піччю відбувається стабілізація структури і утворення рівновісних α - і β -фаз. Міцність зменшується у всьому

інтервалі температур. Зниження пластичності при переході в β -область пов'язано з інтенсивним ростом зерна.

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

Сплав значно знеміцнюється в результаті старіння при температурах вище 550°C . Після старіння при 750°C міцність знижується на 250 МПа, пластичність при цьому незначно підвищується (відносне звуження не більше ніж на 10%) рис. 3.6.

По різному щавленні первинної α -фази і продуктів розпаду можна судити про ступінь розпаду метастабільних фаз. В інтервалі температур $200\text{--}530^{\circ}\text{C}$, утворюється гетерофазна високодисперсна структура, яка складається з рівновісних α - і β -фаз рис. 3.5 а). При 530°C виділяється максимальна кількість цих фаз. При подальшому підвищенні температури старіння до 750°C продукти розпаду коагулюють, що приводить до зниження характеристик міцності.

Таким чином:

- після гартування і охолодження на повітрі в сплаві ВТ8 утворюються метастабільні α' і β -фази;

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

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

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

Максимальне зміцнення сплаву ВТ8 отримано в результаті розпаду при старінні мартенситної α' -фази. Утворення рівновісних α і β -фаз в результаті

старіння α і β -фаза менше зміцнює сплав, хоча абсолютні значення характеристик міцності при цьому вище.

Оптимальний режим зміцнювальної термічної обробки двофазного титанового сплаву VT8 з урахуванням ресурсу 2000 годин, є:

- гартування в воді з температури 950 ° С, подальше старіння при 550 °С протягом 6 годин з охолодженням на повітрі;
- гартування в аргоні з температури 950 ° С, подальше старіння при 550 °С протягом 6 годин з охолодженням в вакуумі.

3.6 Дослідження впливу термічної обробки на властивості жароміцного титанового сплаву

Науковці активно досліджують методики оптимізації термічної обробки для ефективного підвищення загальних характеристик титанових сплавів, враховуючи індивідуальні особливості фазових трансформацій у кожному типі сплаву. В ході термообробки відбуваються комплексні фазові зміни, що включають перерозподіл легуючих добавок та створення множини метастабільних фаз з різною концентрацією легувальних елементів [19]. Це має значний вплив на фізико-механічні, технологічні та експлуатаційні характеристики титанових сплавів. Завдяки унікальним властивостям титанових сплавів, можливе регулювання властивостей продукції у широкому діапазоні шляхом модифікації співвідношення фаз, рівня їх легованості та морфології структурних компонентів.

В роботі було виявлено закономірностей фазових трансформацій у складнолегованому титановому сплаві для вдосконалення температурно-часових параметрів термічної обробки.

Експериментальне вивчення фазових перетворень охоплювало широкий температурний, де зразки були нагріті до вказаних температур з

кімнатної температури та охолоджені після витримки в однофазній області, щоб мінімізувати вплив початкової структури зразків та нерівномірний розподіл легуючих елементів. Термічна обробка сплаву ВТЗ-1 включала декілька кроків: нагрівання сплаву до температур у діапазоні від 960 до 1000 °С, що відповідає температурі витримки перед гартуванням ($T_{пп}$); після цього зразок охолоджувався до температур від 860 до 900 °С ($T_{зак}$), що є температурою закалки; зразок піддавався старінню при температурах від 500 до 620 градусів Цельсія ($T_{стар}$) протягом часу від 1 до 6 годин (режим 1 - 4). Цей процес мав на меті вихід міцних метастабільних фаз і сприяє підвищенню механічних властивостей сплаву, включаючи його міцність та стійкість до деформацій.

Фазовий склад зразків в залежності від умов термообробки деталізовано у таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 -Фазовий вміст зразків титанового сплаву в залежності від температури витримки

Обробка в β -області	Температура витримки, °С	Час витримки, хв	Фазовий склад	Кількість β -фази, %
980 °С, 10 хв	960	5	α - α' - β	-
		90	α - α' - β	-
	930	5	α - α' - α'' - β	10
		30	α (α')- α'' - β	8
		60	α - α'' - β	7
	900	3	α - α' - α'' - β	10
		5	α - α' - α'' - β	6
		20	α - α'' - β	9
		30	α - α'' - β	7
	600	5	α - β	25
		60	α - β	23

Буловстановлено, що зміна температури витримки та часу впливає на фазовий склад сплаву та кількість β -фази у структурі.

Незалежно від часу витримки при температурі 960 °C (5 або 90 хвилин), сплав має фазовий склад α - α' - β , проте при дослідженні β -фази не спостерігалось. Короткочасна витримка при 930°C (5 хвилин) призводить до формування фаз α - α' - α'' - β з вмістом β -фази близько 10%. Зі збільшенням часу витримки до 30 та 60 хвилин кількість β -фази зменшується до 8% та 7% відповідно. Витримка при 900°C від 3 до 30 хвилин веде до формування подібного фазового складу (α - α' - α'' - β), але з варіюванням вмісту β -фази від 10% до 6%, залежно від часу витримки. Це підкреслює чутливість фазового складу до часу витримки. Температурна обробка При 600°C призводить до значного збільшення кількості β -фази до 25% та 23% при 5 та 60 хвилинах відповідно.

Отже, температурні та часові параметри обробки суттєво впливають на фазовий склад та вміст β -фази в титанових сплавах. Вищі температури витримки та коротші часи схильні до формування міксу α - та мартенситних фаз з меншим вмістом β -фази. Нижчі температури з довшим часом витримки сприяють збільшенню кількості β -фази.

На рис. 3.7 представлено залежність фазового складу зразків в залежності від температури гартування. залежність фазового складу зразків титанового сплаву від температури гартування. В діапазоні 100-600°C спостерігається зменшення вмісту β -фази з 24% при 100°C до 4% при 600°C. . Скоріш за все, це пов'язано з тим що під час нагрівання відбувались фазові перетворення лише при досягненні певного рівня температур. При гартуванні з температури 700°C спостерігається незвичайне збільшення вмісту β -фази до 14%, що може вказувати на початок фазових перетворень, що сприяють утворенню β -фази. При підвищенні температури гартування (800-860°C): відбувається значне збільшення вмісту β -фази, що досягає максимуму в 50,5% при 820°C, після чого знижується до 34% при 860°C. При зростанні

температури вище 900°C де кількість β -фази різко знижується до 4%, і повністю відсутня у зразках, оброблених при температурах 980°C і вище, що свідчить про формування мартенситної фази α' .

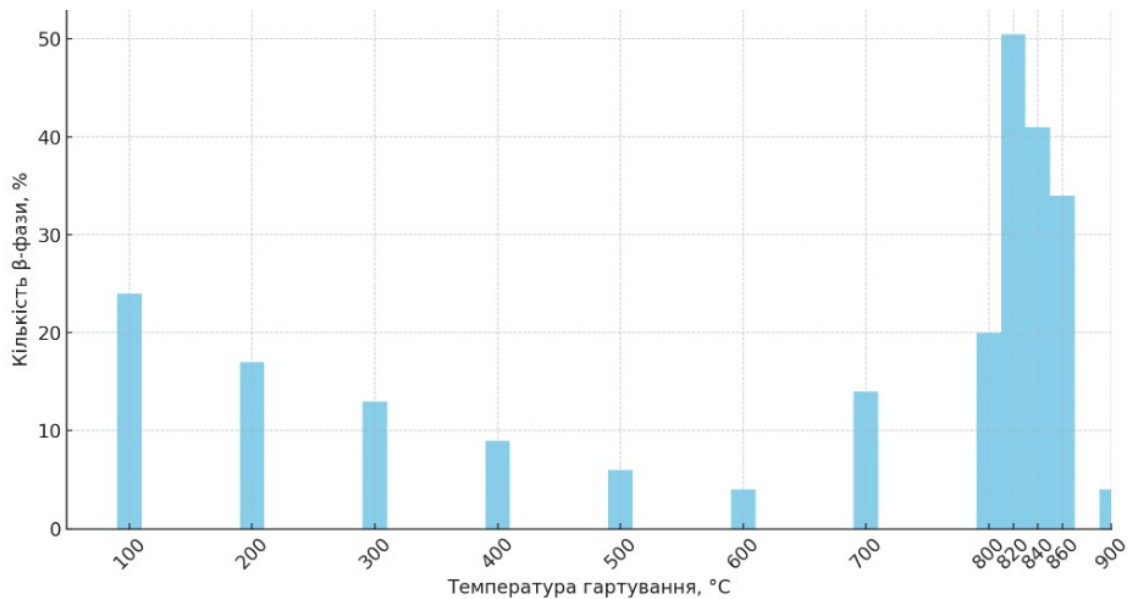


Рисунок 3.7 - Фазовий склад зразків титанового сплаву в залежності від температури гартування

Фазові трансформації у сплавах титану відбуваються через розподіл компонентів між фазами α і β , що мають різну схильність до розчинення різних елементів. Аналіз розчинності легуючих елементів у α - та β -фазах титану виявляє важливі відмінності, які можуть значно впливати на вибір способу термічної обробки та кінцеві властивості сплавів:

- розчинність алюмінію у α -фазі становить 6,0% при 500°C, що вказує на його роль як α -стабілізатора. У β -фазі розчинність значно вища – до 35,5% при 1460°C, що підкреслює здатність Al збільшувати стабільність β -фази при високих температурах.

- цирконій має широкий діапазон розчинності в обох фазах (0-100% при температурах вище 545°C для α -фази та вище 662°C для β -фази), що робить його універсальним легуючим елементом, сприяючи стабільності як α -, так і β -фаз.

-у α -фазі молібден має досить обмежену розчинність, лише 0,75% при 600°C, але у β -фазі розчинність може досягати до 100%, що робить Мо потужним β -стабілізатором.

- розчинність ванадію у α -фазі становить 3,3% при 600°C, що є порівняно високим показником, але як і Мо, у β -фазі може бути розчинений до 100%, що сприяє формуванню та стабільності β -фази.

- залізо виявляє дуже низьку розчинність у α -фазі (0,02% при 390°C), що робить його малоефективним для стабілізації α -фази, але значно підвищує розчинність у β -фазі (25,5% при 1085°C), вказуючи на його роль як β -стабілізатора.

- кремній має обмежену розчинність як в α -фазі (0,2% при 600°C), так і в β -фазі (3% при 1330°C), що робить його менш значущим у процесі стабілізації фаз порівняно з іншими легуючими елементами.

Елементи з високою розчинністю в β -фазі, такі як Мо та V, є ключовими для зміцнення та стабілізації β -фаз, водночас, Al як сильний α -стабілізатор, забезпечує баланс між фазами, дозволяючи точно налаштувати властивості сплаву через термічну обробку.

Під час переходу між фазами, швидкість дифузійного розподілу легуючих елементів часто виявляється недостатньою, що призводить до створення ділянок, збагачених або обеднених β -стабілізаторами. Під час загартування, обеднені ділянки перетворюються в α' -фазу, тоді як збагачені трансформуються в α'' -фазу. У випадках, коли концентрація β -стабілізаторів перевищує певний поріг, вони залишаються у вигляді β -фази. Ключові чинники, які сприяють утворенню мікрообластей β -фази з різним ступенем легування при високих температурах, включають: високу загальну концентрацію легуючих елементів у титанових сплавах, де для сплаву ВТЗ-1 загальний вміст легуючих елементів варіюється від 8,7 до 13,9%; складність складу сплавів, з наявністю елементів, що значно відрізняються за характером їхньої дії, таких як α -стабілізатори (Al, O), β -стабілізатори ізоморфного типу (Mo, V), β -стабілізатори евтектоїдного типу (Fe, Si), та

нейтральні елементи, що зміцнюють сплав (Zr); формування твердих розчинів, де титан заміщується кожним із легуючих елементів; різні значення розчинності легуючих елементів у α - та β -фазах, наявність концентраційного градієнту між цими фазами; низькі коефіцієнти дифузії елементів у титані, що ускладнює рівномірний розподіл легуючих елементів.

Механічні властивості зразків зі сплаву ВТЗ-1 після різних режимів зміцнюючої термообробки та їх фазовий склад після високотемпературного етапу обробки зведено в таблицю 3.8.

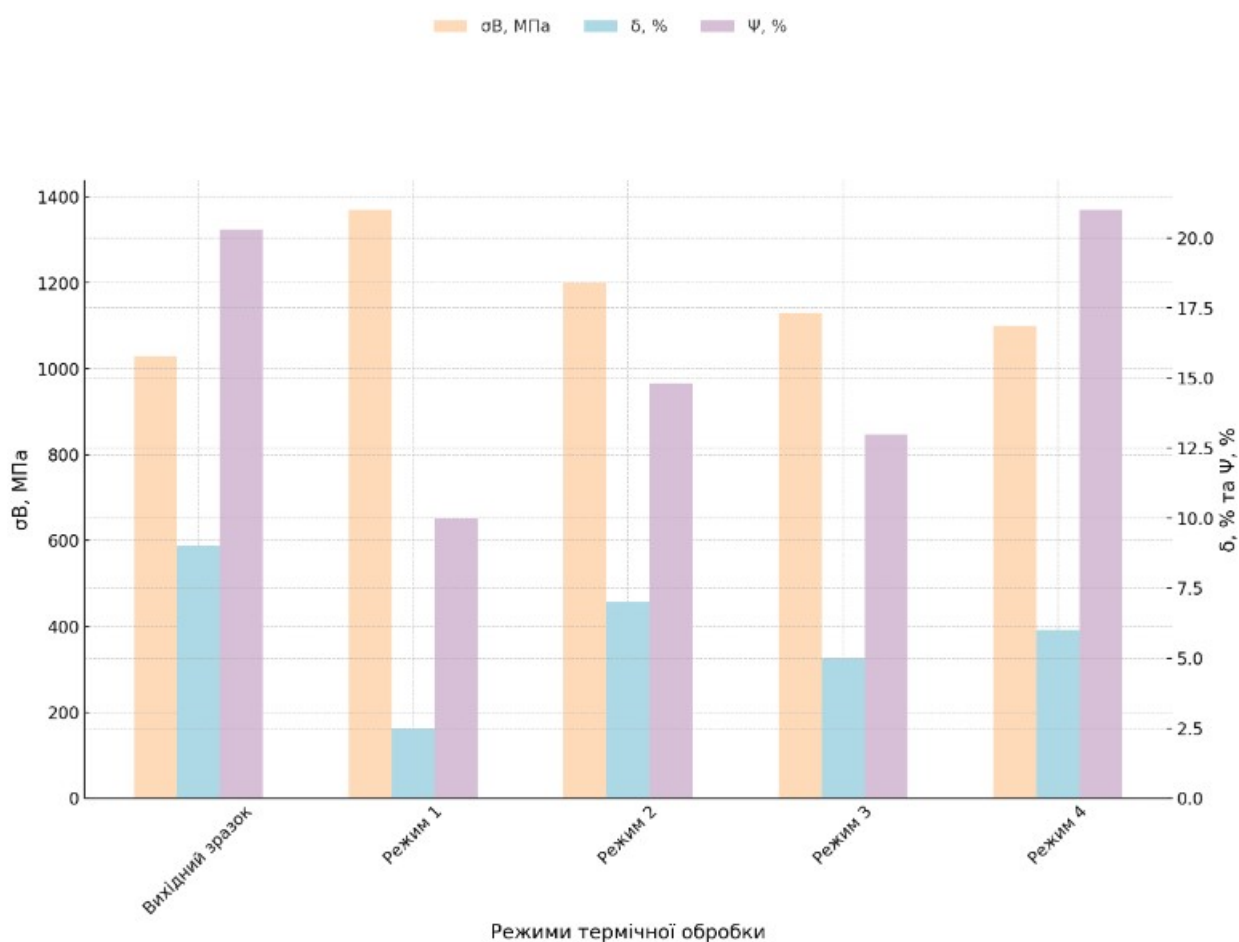


Рисунок Механічні властивості зразків до та після термічної обробки

Зміцнююча термічна обробка сплаву ВТЗ-1 дозволила підвищити межу міцності з збереженням задовільної пластичності. Однак, обробка за режимом 1 призвела до значного зниження відносного подовження та звуження через утворення великогальчастої α' -фази, яка при старінні

перетворювалася на голчасті виділення вторинної α -фази, що підкреслює необхідність уникнення формування мартенситної α' -фази під час гартування.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

В розділі наданні основні заходи з охорони праці, при розробленні технології вакуумної термічної обробки жароміцних та титанових сплавів.

4.1 Аналіз потенційних небезпек

Можливість ураження електричним струмом. Основною причиною є порушення правил з електробезпеки, зокрема допуск до виконання робіт осіб які не пройшли навчання та перевірку знань з електробезпеки, або несправності енергоспоживального обладнання, що може призвести до електричних травм або до летальних наслідків.

Можливість отримання механічних травм. Основними причинами можуть бути захаращеність робочої зони або непередбачений контакт з частинами обладнання які рухаються чи обертаються.

Незадовільна організація робочих місць. В наслідок не врахування величини ергономіки, зокрема нераціональне розташування обладнання і не використання засобів індивідуального захисту.

Небезпеки які пов'язані з порушенням правил з охорони праці при транспортуванні, зберіганні та експлуатації судин для зберігання газів під тиском, зокрема отруєння газами які не придатні для дихання при їх протіканні через вентиль балону або в місцях з'єднання.

Небезпеки що пов'язанні з незадовільною професійною підготовкою фахівців, зокрема виникнення аварійних ситуацій при виконанні хибних дій у

приміщенні з технологічним обладнанням, що може призвести до руйнування обладнання та тяжких випадків травматизму.

Небезпеки які пов'язанні з порушенням правил експлуатації вантажопідійомних машин, механізмів та вантажозахватних пристосувань, зокрема допуск до експлуатації без проведення обов'язкових випробувань, що може призвести до аварійних ситуацій та тяжкого травматизму.

Незадовільне освітлення виробничого цеху в наслідок хибного розрахунку систем природного та штучного освітлення або виходу з ладу освітлювальних приладів, що може призвести до зниження можливості розрізнення об'єктів.

Незадовільні метеорологічні параметри повітряного середовища виробничого цеху в наслідок неефективної роботи систем опалення та повітрообміну.

Можливість загоряння в наслідок порушення правил пожежної безпеки, зокрема порушення правил зберігання легкозаймистих, горючих речовин, які використовуються для очищення деталей перед вакуумною термічною обробкою.

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

4.2 Заходи по забезпеченню техніки безпеки

Основними заходами захисту від можливості ураження електричним струмом є:

Організаційні. До виконання робіт допускаються особи не молодше 18 років, які пройшли навчання та перевірку знань з електробезпеки, та отримали допуск відповідно групи(2 чи 3).

Згідно ДНАОП 1.1.10-1.01-200 «Правила безпеки експлуатації електроустановок споживачів» експлуатацію та ремонт електрообладнання повинен здійснювати тільки спеціально підготовлений персонал. Для кожного виду обладнання повинні бути складені схеми нормування роботи та роботи в аварійних ситуаціях.

Технічні. сі неізолювані струмопровідні елементи обладнання повинні бути надійно огороженні, відкриття яких можливе тільки ключем. Розташування струмоведучих елементів на недосяжній висоті

Основними заходами від механічного травмування є: дотримання чистоти та порядку на робочому місці; наявність попереджувальних знаків; проведення інструктажів, навчання, згідно НПАОП 0.00-4.12-05.

Типового положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці.

Забезпечення індивідуальними засобами захисту брезентові захисні костюми згідно ГОСТ 12.4.045-87 «Костюмы мужские для защиты от повышенных температур» Технические условия; рукавиці брезентові згідно ГОСТ 12.4.010-75 ССБТ «Средства индивидуальной защиты». Рукавицы специальные. Технические условия; спеціальне взуття з захисним носком згідно ГОСТ 12.4.050-78 ССБТ Обувь специальная валяная для защиты от повышенных температур. Технические условия..

Робочі місця термістів повинні відповідати відповідним вимогам ГОСТ 12.2.061-81 «ССБТ». Оборудование производственное. Общие требования безопасности к рабочим местам», ГОСТ 12.2.032-84 «ССБТ. Рабочее место при выполнении работ стоя. Общие эргономические требования».

Структуру ділянок термічної та хіміко-термічної обробки можна уявити в наступному вигляді:

Норми безпечності визначають: площу одного працюючого не менше 4,5 м, висоту робочої зони від підлоги до стелі не менше 3.2 м., об'єм, що припадає на одного працюючого, не менше 15 м.

Розташування тепло випромінюючого обладнання повинно виконуватися з урахуванням потоків повітря при використанні природної, або штучної вентиляції.

Кольорове рішення технологічного обладнання повинно відповідати вимогам ГОСТ 12.4.026-76 «Цвета сигнальные и знаки безопасности».

Основні вимоги до зберігання, переміщення та експлуатації посудин, що працюють під тиском, викладені у ДНАОП 0.00-1.07-94 «Правила будови і безпечної експлуатації посудин, що працюють під тиском».

Основними ємностями для зберігання робочих газів в термічних цехах є балони зі стисненими до 50-90 атм. робочими газами.

Балони повинні зберігатися в спеціальних приміщеннях, на відкритому повітрі під спеціальним навісом від дії прямих сонячних променів, і опадів. Наповнені балони повинні зберігатися в вертикальному положенні. Їх укріплюють спеціальними хомутами. В приміщенні для зберігання балонів підлога повинна бути рівною, неслизькою, виконаною з матеріалів, які виключають іскроутворення.

Переміщення балонів допускається тільки за допомогою спеціальних візків, транспортування вручну суворо забороняється, через можливість падіння, механічних ушкоджень. Транспортування балонів повинно здійснюватися тільки при наявності запобіжного клапану на горловині балонів. Ці міри безпеки посилюються в період холодів, коли знижується пластичність матеріалів, з яких балон виготовляється.

Особливу увагу слід приділити маркуванню балонів: на верхній сферичній частині горловини маркіровані номер балону, ємність, завод-виробник, дата виготовлення, вага балону, робочий та випробувальний тиск, строк наступного випробування. Експлуатувати балони с простроченим строком випробування категорично забороняється.

Важливим є також колір цих балонів. Колір забарвлення балонів: аміачного – жовтий з написом чорною фарбою «аміак», аргонного – сірий, азотного – чорний, пропан-бутану – червоний.

Відкриття вентиля повинно бути плавним, а тиск на манометрі редуктора не повинен перевищувати технологічного. Протічки газів по з'єднанням не допускаються. Необхідно залишати надлишковий тиск 1-2 атм. Ця міра попереджує потрапляння в балон сторонніх газів.

Для виключення руйнування слід слідкувати за нагрівом балонів (до 40°C).

На горловині балону встановлюється редуктор.

При експлуатації редуктора можуть виникати наступні несправності, які можуть привести до випадкового травматизму:

Самоплин – при відвернутому регулювальному гвинті газ поступає в робочу камеру. Це може привести до надмірного підвищення тиску в робочій камері і розірвання мембрани, і потужному викиду газу до системи. Причини: потрапляння під клапани забруднень (стружка, окалина, неметалеві частинки).

Зрив редуктора – призводить до моментального викиду великих об'ємів газу, що приводить до механічного травмування, опіків.

Причини: спрацьованість різьби наштуцера або накидній гайці.

Використовувати такі редуктори забороняється.

Для виключення аварійних ситуацій які призводять хибні дії робітників що працюють на високотехнологічному обладнанні, повинні мати спеціальну освіту та навички роботи з обладнанням за для запобігання його руйнування. Щоб знизити ризик аварій:

Дотримуватись умов експлуатації даного обладнання.

Періодичний технічний огляд та своєчасний капітальний ремонт.

Перевірка кваліфікації працівників та знання правил техніки безпеки є основним заходом безпеки при експлуатації ПТМ є здійснення надзорякий встановлює вимоги до будови, виготовлення, установлення, монтажу, демонтажу, налагодження, експлуатації, ремонту, реконструкції та модернізації вантажопідіймальних кранів і машин, їх складових частин, а також вантажозахоплювальних органів, пристроїв, тари та колик є НПАОП

0.00-1.01-07 «Правила будови і безпечної експлуатації вантажопідіймальних кранів».

Комплекс заходів передбачає:

Належний стан машин і механізмів

Професійна підготовка усіх посадових осіб

Виконання зазначених правил з охорони праці Належний нагляд за виконанням робіт
Порушення правил з допуску до експлуатації метою реалізації заходів визначаються відповідальні особи за безпечну експлуатацію обладнання, стан вантажозахватних пристосувань та тари.

Посадова особа, яка здійснює нагляд за експлуатацією до 20 машин призначається наказом по підприємству з ряду інженерно-технічних працівників за умови перевірки його знань комісією. При експлуатації більше 50 вантажно-підйомних машин створюються групи посадова особа, що здійснює нагляд має одноособове право, в разі виявлення суттєвих недоліків, зупинити експлуатацію будь-якої машини або механізму. Для виключення допуску до експлуатації машин осіб, які на це не мають право. використовуються ключі-бірки. Ключ-бірка маркований індивідуальним номером та номером крану. Робота ключа-бірки пов'язана з системою електричних контактів чином, що при його запиранні ланцюги контактора замикаються, а при його вилученні контакти розмикаються та експлуатація крану стає неможливою.

4.3 Заходи по забезпеченню виробничої санітарії та гігієни праці

На дільниці вакуумної термічної обробки особливо значення має якість освітлення враховуючи специфіку термічної обробки згідно з розряду зорової роботи визначається як при освітленості 200 лк., згідно з БНіП II-4-79. «Освітленість робочої поверхні».

Для забезпечення нормованого освітлення проектується система загального рівномірного штучного освітлення та комбінованого природнього та штучного освітлення. Метод світлового потоку (коефіцієнта використання): застосовують для розрахунку загального рівномірного освітлення горизонтальних поверхонь.

Визначити сумарний світловий потік освітлювальної установки у даному виробничому приміщенні

$$\Phi_{\Sigma} = \frac{E_n \cdot S \cdot k_z \cdot z}{\eta},$$

де Φ_{Σ} – розрахункове значення сумарного світлового потоку у приміщенні, лм;

E_n – нормоване значення освітленості, лк;

S – площа освітлюваної поверхні, м²;

k_z – коефіцієнт запасу;

η – коефіцієнт нерівномірності (мінімальної) освітленості;

z – коефіцієнт використання світлового потоку

$$\Phi_{\Sigma} = 200 \cdot 1080 \cdot 1,1 \cdot 1,15 / 0,74 = 369243,24$$

Визначаємо відстань між рядами та сусідніми світильниками

$$L_{\max} = [L/h] \cdot h, \text{ м}$$

де $[L/h]$ – числове значення коефіцієнта світильника.

$$L_{\max} = 0,9 \cdot 12 = 10,8$$

Визначимо кількість рядів світильників у приміщенні

$$N_p = \frac{B}{L_{max}},$$

$$N_p = 12/10.8 = 3.3 = 4 \text{ряди}$$

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

$$N^* = AB/L^2 \max$$

$$N^* = 18 \cdot 60 / 10.8^2 = 9.25$$

розрахуємо світловий потік умовного джерела світла:

$$\Phi_{л}^* = \Phi \sum_{л} / N_{м}$$

$$\Phi_{л}^* = 369243.24 / 18.5 = 19959 \text{лк}$$

дет (співвідношення між розрахунковим світловим потоком лампи $\Phi_{л}^*$ та фактичним світловим потоком вибраної стандартної лампи $\Phi_{л}$):

$$m = \frac{\Phi_{л}^*}{\Phi_{л}}$$

$$m = 19959 / 2400 = 8.3$$

Визначимо оптимальну кількість світильників у приміщенні:

$$N = N^* \cdot m$$

$$N = 9.25 \cdot 8.3 = 75.6$$

Скоригуємо число світильників та визначити їх фактичну кількість N_{Φ} , яка відповідає рівнокількісному розміщенню світильників у кожному ряді.

$N_{фл} = N_{ф} \cdot n$ – фактична кількість ламп у приміщенні

$$N_{фл} = 76 \cdot 2 = 152 \text{ шт}$$

Отже для освітлення цеху потрібні лампи типу ДРЛ 400 та світильники ГСП. Визначено що у світильнику знаходиться 2 лампи, таких світильників чотири ряди по 19 світильників у кожному загальна потужність 60800Вт. На рисунку 4.1 показане розміщення світильників у відділенні.

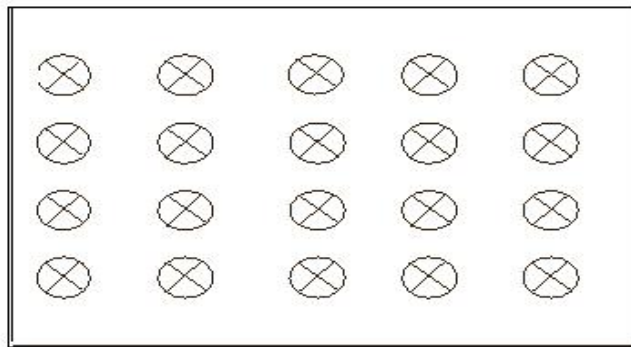


Рисунок 4.1 – Розміщення світильників у термічному відділенні

Для забезпечення оптимального рівня параметрів повітряного середовища виробничого приміщення, що зазначені у ГОСТ 12.1.005-88 (1991) «ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны» (табл.2.1) в проєкті передбачено: устрій системи водяного опотлення приміщення для забезпечення необхідної температури повітря в холодний період року відповідно СНиП 2.04.05-91*У «Отопление, вентиляция и кондиционирование».

Таблица 4.1 – Оптимальні параметри повітряного середовища

Період року	Температура, °С	Відносна вологість, %	Швидкість руху, м/с
Холодний	18-22	40-60	0,1-0,3
Теплий	20-23	40-60	0,1-0,4

--	--	--	--

В приміщеннях, де немає викидів шкідливих речовин у великій кількості, для забезпечення необхідного повітряобміну в теплий період року, передбачено устрій штучної механічної загально обмінної вентиляції відповідно ГОСТ 12.4.021-75 «ССБТ. Системы вентиляционные. Общие требования».

4.4 Заходи з пожежної безпеки

В комплексі заходів, що використовуються в системі протипожежного захисту, важливе значення має вибір раціональних способів та засобів гасіння різних горючих речовин матеріалів згідно зі СНиП 2.01.02-85 «Противопожарные нормы проектирования зданий и сооружений».

Необхідно в першу чергу звернути увагу на основні обов'язки керівників та посадових осіб щодо забезпечення пожежної безпеки, до числа яких слід віднести:

- розроблення комплексу заходів щодо забезпечення пожежної безпеки на підприємстві, в установі, в організації;

- розроблення та затвердження відповідно до державних нормативних актів положень, інструкцій та інших нормативних документів і пожежної безпеки, які діють в межах підприємства, а також здійснення контролю за їх виконанням:

- організацію навчання працівників з питань пожежної безпеки:

- утримання у справному стані засобів протипожежного захисту і зв'язку, пожежної техніки, обладнання та інвентарю, який має використовуватися лише за призначенням;

- проведення службових розслідувань випадків пожеж, які виникли.

Кожен працівник має володіти правилами поведінки при пожежі, вміти користуватися первинними засобами пожежегасіння та знати їх місцезнаходження. У разі виникнення пожежі працівники повинні негайно повідомити про це пожежну охорону телефоном "101" і керівництво підприємства та розпочати ліквідацію пожежі усіма наявними засобами.

Тому основний комплекс протипожежних заходів, як правило, повинен включати:

- погодження проектів будівництва та реконструкції із пожежною інспекцією;
- відкриття новобудов або реконструйованих споруд лише після дозволу пожежної інспекції;
- експлуатацію споруд, обладнання та механізмів відповідно до протипожежних вимог (згідно з правилами, інструкціями тощо);
- виконання будь-яких робіт лише підготовленими, в тому числі з питань пожежної безпеки, фахівцями;
- установлення адміністративної відповідальності керівників усіх структур
- головний лікар, завідувачі відділень та служб) за адекватне виконання необхідних протипожежних заходів:
- інструктаж персоналу та пацієнтів;
- забезпечення споруд (відділень) засобами пожежно-охоронної сигналізації та засобами пожежегасіння;
- створення в установі (закладі) медичної або фармацевтичної галузі відповідних структур пожежегасіння, добровільних дружин та ланок пожежегасіння.
- затвердження заходів протипожежної профілактики.

Із технічних засобів передбачено:

- вогнегасник ВПП-10:призначені для гасіння більшості горючих речовин і матеріалів за винятком лужних металів, речовин, які горять без

доступу повітря(бавовна, піроксилін), а також електроустаткування під напругою;

- вогнегасник ВВК-5: призначені для гасіння легкозаймистих та горючих рідин, твердих горючих речовин і матеріалів, електроустановок, що перебувають під напругою до 1000 В, а також цінних предметів ;

- пожежні щити повинні встановлюватися у виробничих і складських приміщеннях, не обладнаних внутрішнім протипожежним водопроводом або автоматичними установками пожежогасіння. Крім того, щити встановлюються на території підприємств, що не мають зовнішнього протипожежного водопроводу, також при видаленні будинків та зовнішніх технологічних установок цих підприємств на відстані більше 100 м від зовнішніх пожежних вододжерел.

4.5 Заходи по забезпеченню безпеки у надзвичайних ситуаціях

Метою проведення рятувальних та інших невідкладних робіт (Р і ІНР) в осередках масового ураження є рятування людей та надання медичної допомоги потерпілим, локалізація аварій та усунення пошкоджень, котрі перешкоджають проведенню рятувальних та відновлювальних робіт.

Рятувальні роботи включають:

- розвідку маршрутів висування формувань і об'єктів робіт;
- локалізацію і гасіння пожеж на маршрутах висування і на ділянках робіт;
- пошук потерпілих і витягування їх із пошкоджених та палаючих будинків, загазованих, затоплених, задимлених приміщень, із завалів;
- розкриття зруйнованих, пошкоджених, завалених споруд та рятування людей, котрі там перебувають;

- подавання повітря в завалені споруди з пошкодженою фільтровальною вентиляційною системою;
- надання першої медичної допомоги потерпілим та евакуація їх до лікарських установ;
- виведення (вивезення) населення з небезпечних зон у безпечні райони;
- санітарну обробку людей, ветеринарну обробку сільськогосподарських тварин, дезактивацію та дегазацію техніки, засобів захисту, одягу, продовольства, їжі, води, фуражу.

Інші невідкладні роботи включають:

- прокладання колонних шляхів та влаштування проїздів (проходів) у завалах та в зонах ураження;
- локалізацію аварій на газових, електричних мережах з метою забезпечення умов для проведення рятувальних робіт;
- укріплення чи руйнування конструкцій будинків та споруд, котрі загрожують обвалом та перешкоджають безпечному руху і проведенню рятувальних робіт;
- ремонт та відновлення пошкоджених і зруйнованих ліній зв'язку та комунально-енергетичних мереж з метою забезпечення рятувальних робіт та інших невідкладних робіт, а також захисних споруд для укриття людей у випадку повторних НС;
- пошук, знешкодження та знищення боєприпасів, що не розірвалися та інших вибухонебезпечних предметів.

Р та ІНР проводяться безпосередньо в осередках ураження за будь якої погоди до повного їх завершення.

Великий обсяг роботи в осередках ураження неможливо провести за короткий час без використання різноманітної техніки. Тільки широка механізація усіх видів робіт дає змогу своєчасно здійснити рятування потерпілих. Для проведення Р та ІНР можуть використовуватися всі типи

будівельних та дорожніх машин, механізмів, техніки комунального господарства району, міста.

Залежно від виду виконуваних робіт вони поділяються на такі групи:

- машини і механізми для розкриття завалених сховищ та укриттів, розбирання та розчищення завалів, піднімання, переміщення і транспортування вантажів (екскаватори, трактори, бульдозери, крани, самоскиди з причепами, блоки, лебідки, домкрати);
- пневматичний інструмент (бурильні та відбійні молотки), які використовуються для формування отворів у кам'яних, цегляних і бетонних стінах, перекриттях завалених сховищ з метою подавання в них повітря або для виведення тих, хто переховується там;
- обладнання для різання металу (газорізи, бензорізи, автогени, електрозварювальні апарати);
- механізми для відкачування води (насоси, мотопомпи, поливальні машини та авторозливні станції);
- засоби, котрі забезпечують транспортування чи переправляння через водну перепону основних машин і обладнання (причіпи-важковози, тягачі-трейлери, баржі, пороми, понтони тощо);
- ремонтні та обслуговуючі засоби (ремонтні майстерні, станції обслуговування, бензо-водозаправники, освітлювальні станції тощо).

Поряд з ефективним використанням машин і механізмів успішне проведення Р та ІНР досягається:

- своєчасною організацією та безперервним проведенням розвідки, швидким виведенням формувань в осередки ураження для виконання завдань;
- знанням та дотриманням правил і заходів безпеки при проведенні робіт;
- завчасним вивченням командирами формувань особливостей ймовірних ділянок (об'єктів) робіт, характеру їх забудови, наявності

комунально-енергетичних та технологічних мереж, місць зберігання СДОР, місць розташування та характеристик захисних споруд;

- чіткою організацією взаємодії сил і засобів, залучених до робіт та всебічним їх забезпеченням.

Таким чином, найбільш важливими заходами з охорони праці є:

Для виключення можливості ураження електричним струмом передбачені: допуск до роботи людей не молодше 18 років, які пройшли медичний огляд, навчання за фахом, окреме навчання з електробезпеки, атестацію на відповідну групу з електробезпеки, згідно з НПАОП 0.00.-4.12-05 «Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці». Використання захисного заземлення відповідно до ПУЕ-2011 «Правила устрою електроустановок».

Для виключення механічного травмування передбачено використання спецодягу: брезентові захисні костюми по ГОСТ 27575-87 «Костюми чоловічі для захисту від загальних виробничих забруднень і механічних впливів», брезентові рукавиці по ГОСТ 12.4.010-75 «ССБТ. Засоби індивідуального захисту. Рукавиці спеціальні. Технічні умови».

Основні вимоги до зберігання, переміщення та експлуатації посудин, що працюють під тиском, викладені у ДНАОП 0.00-1.07-94 «Правила будови і безпечної експлуатації посудин, що працюють під тиском».

Основними ємностями для зберігання робочих газів в термічних цехах є балони зі стисненими до 50-90 атм., робочими газами.

Основним заходом безпеки при експлуатації ПТМ є здійснення надзору який встановлює вимоги до будови, виготовлення, установлення, монтажу, демонтажу, налагодження, експлуатації, ремонту, реконструкції та модернізації вантажопідіймальних кранів і машин, їх складових частин, а також вантажозахоплювальних органів, пристроїв, тарі та кошиків є НПАОП 0.00-1.01-07 «Правила будови і безпечної експлуатації вантажопідіймальних кранів».

5 ЕКОНОМІКО-ОРГАНІЗАЦІЙНА ЧАСТИНА

5.1 Актуальність теми з позиції маркетингу

Титанові сплави широко використовуються в авіаційній промисловості, зокрема для виробництва лопаток компресору газотурбінних двигунів, завдяки їх винятковим властивостям, таким як висока міцність, легкість, стійкість до корозії та високі температурні характеристики. Вплив термічної обробки на ці сплави може значно покращити їхні механічні та структурні властивості, оптимізуючи їх для специфічних умов експлуатації в ГТД.

Актуальність теми з маркетингової точки зору полягає у зростаючому попиті на високоефективні матеріали для авіаційної промисловості, особливо в контексті постійного прагнення до підвищення ефективності та надійності авіаційних двигунів. Вдосконалення технологій термічної обробки може відкрити нові можливості для розробки титанових сплавів з покращеними характеристиками, що, у свою чергу, може забезпечити конкурентні переваги виробникам лопаток компресору та двигунів.

Крім того, інновації в області термічної обробки титанових сплавів можуть сприяти зниженню вартості виробництва та підвищенню експлуатаційних характеристик кінцевих продуктів, що є ключовими факторами для забезпечення конкурентоспроможності на ринку.

Ринок титанових сплавів для авіаційної промисловості продовжує розвиватися з огляду на зростаючі вимоги до підвищення ефективності та екологічності авіаційних двигунів. Інновації в області матеріалознавства та технологій обробки сприяють створенню нових сплавів з покращеними властивостями, що відкриває нові можливості для розробки і виробництва більш ефективних та надійних компонентів ГТД.

Однак, важливо також враховувати економічні аспекти впровадження нових технологій обробки та розробки нових сплавів. Розробка та застосування новітніх технологій потребує значних інвестицій, які повинні бути виправдані потенційними перевагами та попитом на ринку.

Таким чином, актуальність полягає не лише в технологічному аспекті вдосконалення матеріалів для авіаційної промисловості, але й у ринковому потенціалі та економічній вигоді від застосування цих інновацій. Розвиток та впровадження нових титанових сплавів та технологій їх обробки може забезпечити значні конкурентні переваги виробникам авіаційних двигунів та лопаток компресорів, відповідаючи на зростаючі вимоги ринку до ефективності, надійності та екологічності продукції.

5.2 Послідовний аналіз

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

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

Виконаний аналіз характеристики потенційного ринку (табл. 5.2).

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

Таблиця 5.1 – Опис ідеї

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для споживачів (користувачів)
Процес розробки і впровадження методу термічної обробки для лопаток компресора, виготовлених із сплаву ВТ8, має на меті збільшення їх міцності, підвищення опору до температурних впливів та вдосконалення загальної продуктивності.	Авіаційна промисловість - Виготовлення авіаційних двигунів Морський транспорт - Виробництво суднових компресорів та газотурбінних двигунів.	Пролонгація експлуатаційного терміну компресора. Мінімізація потреби у технічному обслуговуванні та ремонті. Забезпечення відповідності стандартам безпеки та екологічним регулятивам.

Таблиця 5.2 – Попередня характеристика потенційного ринку

Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
Головні конкуренти	Підприємства, авіаційної галузі, що пропонують виготовлення деталей ГТД в Україні та зарубіжні компанії
Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає через зростання попит на підвищення ресурсу та ефективності ГТД.
Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Потрібні інвестиції в обладнання та сертифікацію
Специфічні вимоги до	Вимоги виробників авіадвигунів до якості

стандартизації та сертифікації	деталей
--------------------------------	---------

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

Таблиця 5.3 – Попередня характеристика потенційних клієнтів

Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів (користувачів)
Підвищення довговічності та надійності авіаційних двигунів	Виробники авіаційних двигунів Підприємства по ремонту авіадвигунів	Потреба виробників в стандартизації. Ремонтні підприємства потребують невеликих об'ємів за нижчими цінами.	Твердість, жароміцність, корозійна стійкість, опір втомному руйнуванню, ціна

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

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

Таблиця 5.4 – SWOT- аналіз

Сильні сторони:	Слабкі сторони:
Інноваційна технологія термічної обробки сплаву ВТ8, що надає перевагу на ринку. Збільшення запиту на високоякісні та високоефективні компресорні системи в різних секторах промисловості.	Високі капітальні витрати на розробку та впровадження новітньої технології. Потенційні затримки в реалізації проекту, що може послабити позиції на ринку.
Можливості:	Загрози:
Розширення ринку для компресорних систем та технологій термічної обробки відкриває додаткові шляхи для зростання продажів та прибутку. Сумісність із стандартами та нормами забезпечує доступ до нових ринків. Впровадження екологічно чистих та енергоефективних технологій зустрічає сучасні тренди і вимоги ринку	Підвищена конкуренція у сфері компресорних систем і технологій термічної обробки може створити тиск на ринкові позиції. Зміни в законодавчих та нормативних вимогах можуть вимагати додаткових інвестицій в адаптацію продукції та процесів. Економічна нестабільність може обмежити інвестиційну спроможність потенційних клієнтів, впливаючи на попит на інноваційні технології.

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

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

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

Таблиця 5.5 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
Виробники газотурбінних двигунів для авіаційної промисловості	висока	100 000 шт. на рік	Висока	високі стандарти безпеки та якості
Виробники газотурбінних двигунів для морського транспорту	низька	10 000 шт. на рік	помірна	високі стандарти безпеки та якості

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



Рисунок 5.1 - Карта стейкхолдерів

Визначимо склад команди за категоріями працівників залежно від виду робіт. Для проведення досліджень потрібна та науково-дослідна команда, яка складається головного (науковий керівник) та молодшого (магістрант) наукових співробітників, лаборантів та верстатника.

Таблиця 5.5 – Зайнятість членів науково-дослідної команди

Член команди	Кільк. осіб	Зайнятість НДР, днів
Головний науковий співробітник	1	10
Молодший науковий співробітник	1	28
Лаборант	2	17
Верстатник	1	5

Для реалізації науково-дослідних робіт обов'язковим є – визначення витрат на всі задіяні ресурси для дослідження:

витрати на оплату праці (основна та додаткова заробітна плата);

відрахування на соціальні заходи;

накладні витрати;

матеріальні витрати та витрати по споживанню послуг;

витрати по амортизації.

Визначимо витрати на оплату праці: посадові оклади або тарифні ставки, які відповідають розряду роботи певної категорії працівників.

Кількість місяців роботи науково-дослідної групи задається на підставі терміну виконання дипломного проєктування – 60 днів.

Результати розрахунків зведені в таблиці 5.6.

Таблиця 5.6 – Склад, чисельність та фонд заробітної плати членів науково-дослідної команди за умови їх зайнятості

Посада	Кількість осіб	Посадовий оклад., грн	Середньоденна зарплата, грн.	Зайнятість, днів	Сума, грн	ЄСВ, грн
Головний науковий співробітник	1	10000	500	10	5000	1100
Молодший науковий співробітник	1	7000	350	28	9800	2156
Лаборант	2	5500	275	17	9350	2057
Верстатник	1	5200	260	5	1300	286
Разом					25450	5599
Разом з урахуванням додаткової заробітної плати					27995	6158,9

Додаткова заробітна плата складає 10% від основної заробітної плати:

$$25450 \times 10\% = 2545 \text{ грн}$$

Визначимо відрахування на соціальні заходи. Згідно Податкового кодексу України єдиний соціальний внесок (далі – ЄСВ) сплачується роботодавцями у розмірі 22% від витрат на оплату праці. Згідно даних таблиці 5.7 відрахування на ЄСВ у розмірі 22% від основної та додаткової заробітної плати:

$$\text{ЄСВ} = (25450 + 2545) \times 0,22 = 6158,9 \text{ грн}$$

Накладні витрати для науково-дослідних робіт складають 40% від суми основної заробітної плати:

$$27995 \times 40\% = 11198 \text{ грн.}$$

Визначимо матеріальні витрати та витрати по споживанню послуг (таблиця 5.7–5.8).

Таблиця 5.7 – Розрахунок матеріальних витрат

Матеріальні витрати	Обсяг сировини, кг	Ціна, грн./кг	Сума грн
Титановий сплав ВТ-8	50	294,2	14710
Масло	10	100	1000
Абразиви	-	100	100
Реактиви	-	140	140
Разом			15950

Транспортно-заготівельні витрати становлять 10% від загальної вартості матеріалів:

$$15950 \times 10\% = 1595 \text{ грн.}$$

З урахуванням транспортно-заготівельних витрат сума загальної вартості матеріалів складає:

$$15950 + 1595 = 17545 \text{ грн.}$$

Вартість спеціального обладнання (таблиця 5.8) для науково-дослідних робіт визначають на підставі їх кількості та вартості по прейскурантах і транспортно-заготівельних витрат (до 20 % їхньої вартості).

Таблиця 5.8 – Витрати на спеціальне обладнання для виконання науково-дослідних робіт з ВТОР

Обладнання	Кількість	Вартість, грн.
Термічна піч	1	160000
Розривна машина	1	60000
Мікротвердомір	1	5500

Визначимо вартість спожитих послуг (енергоресурсів), які використовувались під час досліджень.

Витрати на енергію E_c визначимо за формулою:

$$E_c = P_u \times \Phi_{ef} \times K_v \times T \times \text{ККД},$$

де P_u – встановлена потужність енергетичних струмоприймачів обладнання, кВт;

$\Phi_{\text{эф}}$ – ефективний фонд часу роботи даного виду обладнання, год.;

K_v – коефіцієнт використання енергетичних установок за потужністю та часом. Приймаємо $K_v = 0,8$;

T – ціна 1 кВт год електроенергії, $T = 1,68$ грн / кВт год.; $\text{ККД} = 0,6$.

Для обслуговування термічної печі енергія E_c становить:

$$E_c = 112 \times 28 \times 0,8 \times 2,64 \times 0,6 = 3973,9 \text{ грн.}$$

Для обслуговування розривної машини енергія E_c буде:

$$E_c = 10 \times 24 \times 0,8 \times 2,64 \times 0,6 = 811,0 \text{ грн.}$$

Для обслуговування мікротвердоміру енергія E_c становить (при $K_v = 0,7$, $\text{ККД} = 0,7$):

$$E_c = 1 \times 6 \times 0,7 \times 2,64 \times 0,7 = 7,8 \text{ грн.}$$

Результати розрахунків витрат на обслуговування обладнання відносно використання електроенергії подано у таблиці 5.9.

Таблиця 5.9 – Розрахунок вартості спожитих послуг (енергоресурсів)

Обладнання	Ефект. фонд часу роб., год	Тариф, грн.	Вартість електроенергії, грн
Піч термічна	28	2,64	3973,9
Розривна машина	24	2,64	811,0
Мікротвердомір	6	2,64	7,8
Разом			4781,7

Визначимо витрати по амортизації. Оскільки термін корисного використання термічної печі та розривної машини 10 років, норма амортизації становитиме 10 % для кожної.

Тому витрати по амортизації для термічної печі становлять:

$$A = ((160000 \times 10\%) \times 60) / 365 = 2630,1 \text{ грн.}$$

Для розривної машини:

$$A = ((60000 \times 10\%) \times 60) / 365 = 986,3 \text{ грн.}$$

Мікротвердомір має вартість менше 20000 грн. А, отже, вони відносяться до малоцінних необоротних матеріальних активів

Згідно змін внесених до Податкового Кодексу України на малоцінні необоротні матеріальні активи, придбані після 23.05.2020 р. амортизація нараховується за методикою 50/50 або 100% при введенні в експлуатацію.

Вважаємо доцільним для нарахування витрат по амортизації мікротвердоміру нараховувати за методикою 50/50.

Звідси амортизацію для мікротвердоміру:

$$A = 5500 \times 50\% = 2250 \text{ грн.}$$

Таким чином, загальна сума витрат по амортизації по спеціальному обладнанню складе:

$$A_{\text{заг}} = 2630,1 + 986,3 + 2250 = 5866,4 \text{ грн.}$$

Результати розрахунків витрат по амортизації подано у таблиці 4.7.

Таблиця 5.10 – Розрахунок витрат по амортизації

Обладнання	Балансова вартість, грн	Норма амортизації %	Амортизація грн
Піч термічна	160000	10	2630,1
Розривна машина	12000	50	6000
Мікротвердомір	18500	50	9250
Разом			18455,4

Складемо кошторис витрат для проведення науково-дослідних робіт. Дані кошторису подані в таблиці 5.11.

Таблиця 5.11 – Кошторис витрат для проведення науково-дослідних робіт

Витрати	Сума, грн
Оплата праці (основна та додаткова заробітна плата)	27995
Відрахування на соціальні заходи	6158,9
Накладні витрати	11198
Матеріальні витрати (з урахуванням транспортно-заготівельних витрат)	17545
Витрати на електроенергію	4781,7
Амортизація	18455,4
Разом	86134,0

Науково-дослідні роботи не можуть коректно розрахувати економічну ефективність. Тому скористаємось шкалою для оцінювання економічної ефективності та кількісними коефіцієнтами, таблиця 5.12.

Загальна економічна ефективність від розробки дорівнює:

$$E = E_p \times K_1 \times K_2 \times K_3 \times K_4 = 2500 \times 42 = 105000 \text{ грн.}$$

де E_p – питомий ефект на кожний бал, $E_p = 2\,500$ грн.

Визначимо коефіцієнт економічної ефективності для проведення науково-дослідних робіт за формулою:

$$KE = E / \text{КНДР} = 105000 / 86134,0 = 1,22.$$

де КНДР – собівартість науково-дослідної роботи.

Таблиця 5.12 – Шкала для оцінки ефективності науково-дослідних робіт

Коефіцієнт	Показник	Характеристика	Бал
K1	Важливість розробки	Робота ініціативна і не є завданням відомчих органів	1
K2	Можливість використання результатів	У масштабах країни	7
K3	Теоретична значимість та новизна дослідження	Одержання нової інформації, що доповнює знання про сутність досліджуваних процесів, не відомої в досліджуваній області	3
K4	Складність розробки	Робота виконується одним підрозділом, витрати 10000-50000 грн	2

Визначимо термін окупності проекту за формулою:

$$\text{Ток} = 1 / \text{KE} = 1 / 1,22 = 0,82.$$

Аналіз розрахунків доводить економічну доцільність дослідження інноваційних підходів до термічної обробки жароміцних титанових сплавів. Витрачені кошти на науково-дослідні роботи зможуть зменшити витрати на роботи з ремонту та обслуговування авіаційних двигунів та забезпечити в подальшому економічну ефективність і конкурентноспроможність вітчизняних лопаток компресору порівняно зі стандартним і дорожчими аналогами.

ВИСНОВКИ

В роботі визначено ключові експлуатаційні умови та вимоги до матеріалів для виробництва лопаток компресора. Огляд наукових джерел показав, що термічна обробка має значний вплив на покращення структурних та механічних характеристик титанових сплавів, що може сприяти збільшенню довговічності та надійності лопаток компресора. Встановлено, що оптимізація режимів термічної обробки залежить від хімічного складу сплаву та вимагає детального розуміння процесів, що відбуваються на мікро- та макрорівнях.

В роботі детально розглядаються варіанти термічної обробки титанових сплавів, які спрямовані на підвищення їхніх експлуатаційних властивостей. Виявлено, що застосування комплексного підходу до термічної обробки дозволяє суттєво підвищити механічні властивості титанових сплавів, зокрема, міцність, пластичність та жаростійкість. Підтверджено ефективність використання інноваційних технологій термічної обробки для досягнення оптимального співвідношення між високою міцністю та достатньою пластичністю сплавів. Так, наприклад, методи ізотермічного старіння та багатостадійного гартування демонструють значне підвищення жароміцності сплавів при одночасному збереженні або навіть покращенні пластичних характеристик.

Показано важливість точного дотримання технологічних параметрів процесів термічної обробки, зокрема температури, часу витримки та швидкості охолодження, які безпосередньо впливають на кінцеві властивості сплавів.

Аналіз потенційних небезпек на виробництві дозволив ідентифікувати основні джерела ризиків для працівників та розробити комплекс заходів з мінімізації цих ризиків.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. 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.
2. 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 p.
3. 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.
4. Горынин И.В., Чечулин Б.Б. Титановые сплавы в машиностроении / И.В. Горынин, Б.Б. Чечулин. - Л.: Машиностроение, 1990. - 400 с.
5. Синяєва Н. П. Розробка комплексометричного методу визначення вмісту цирконію у сплавах на основі титану ВТ-9, ВТ-20 та у цирконовому концентраті / Н. П. Синяєва, Л. О. Омелянчик, О. Ю. Бережна // Актуальні питання біології, екології та хімії. - 2015. - Т. 9, № 1. - С. 107-116.
6. Jiang B., Wang Q., Dong C., Liaw P.K. Exploration of phase structure evolution induced by alloying elements in Ti alloys via a chemical-short-range-order cluster model / B. Jiang, Q. Wang, C. Dong, P.K. Liaw // Sci. Rep. - 2019. - Vol. 9, No. 1.
7. Березос В. О. Теорія і практика виробництва зливків високоміцних конструкційних сплавів на основі титану методом електронно-променевої плавки: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук: 05.16.02 Київ, 2001. - 321 с.
8. Knaislova A., Novak P., Průša F., Cabibbo M., Jaworska L., Vojtech D. High-temperature oxidation of Ti–Al–Si alloys prepared by powder metallurgy / A.

Knaislova, P. Novak, F. Průša, M. Cabibbo, L. Jaworska, D. Vojtech // J. Alloys Compd. - 2019. - Vol. 810.

9. Kainuma R., Fujita Y., Mitsui H., Ohnuma I., Ishida K. Phase equilibria among α (hcp), β (bcc) and γ (L10) phases in Ti–Al base ternary alloys / R. Kainuma, Y. Fujita, H. Mitsui, I. Ohnuma, K. Ishida // Intermetallics. - 2000. - Vol. 8, No. 8.

10. Boyer R.R., Lutjering G. Heat treatment of titanium alloys: overview, in Advances in the Science and Technology of Titanium Alloy Processing / R.R. Boyer, G. Lutjering; eds I. Weiss et al. - Warrendale, PA: TMS, 1993. - P. 349–367.

11. Бичков А. С. Концепція підвищення експлуатаційних характеристик конструкцій агрегатів вітчизняних цивільних літаків спеціальними методами порошкової металургії: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук: 05.07.02. Київ, 2019. 311 с.

12. Davydenko L.V. et al. Comparison of the Strength Properties of Heat Resistant Titanium Alloys at Elevated Temperatures / L.V. Davydenko et al. // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. - 2020. - Vol. 969, 012007.

13. 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.

14. Boyer R.R. Titanium for aerospace: Rationale and applications / R.R. Boyer // Adv Perform Mater. - 1995. - Vol. 2, P. 349–368.

15. Цвиккер У. Титан и его сплавы / У. Цвиккер. - М.: Металлургия, 1979. - 510 с.

16. Коллинз Е.В. Физическое металловедение титановых сплавов / Е.В. Коллинз; Пер. с англ. под ред. Б.И. Веркина, В.А. Москаленко. - М.: Металлургия, 1988. - 224 с.

17. НПАОП 28.5-1.02-07 – Правила охорони праці при термічній обробці металів. – К: 30 с.

18. Пістун І.П. Охорона праці при виконанні зварювальних і термічних робіт: навчальний посібник / І.П. Пістун., Р.А. Яцюк, І.О. Трунова. – Львів: УАД, 2011. – 446 с.

19. Соколов В.М. Механизация и автоматизация в термических цехах: Учебн. пособ. для вузов / В.М. Соколов. - М.: Машгиз, 1962. - 185 с.

20. Кузін О.А. Матеріалознавство та термічна обробка металів / О.А. Кузін, Р.А. Яцюк. – Львів: Афіша, 2002. – 216 с.

21. Зеркалов Д.В. Екологізація енергоспоживання: Монографія / Д.В. Зеркалов. - К.: ТОВ Міжнар. фін. агенція, 1998. - 271 с.

22. Величко О.М., Зеркалов Д.В. Контроль забруднення довкілля: Навчальний посібник / О.М. Величко, Д.В. Зеркалов. - К.: Основа, 2002. - 256 с.

ДОДАТОК А. ПРЕЗЕНТАЦІЯ ДО ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ