

**Термозміцнююча обробка –
ефективний спосіб покращення
структури та властивостей титанових сплавів
для виробів ракетно-космічної техніки**

Анотація

Об'єктом дослідження є кулебалон, який призначений для зберігання газів азоту або гелію в рідкому стані.

Мета роботи полягає в тому, щоб розробити удосконалений режим термозміцнюючої обробки для підвищення властивостей титанового сплаву VT6C і зменшити час виготовлення кулебалону, покращити якість виробів відповідального призначення.

Мета дослідження – вибір матеріалу та вивчення його властивостей, удосконалення технологічного процесу деталі типу «кулебалон». Дослідження впливу параметрів термічної обробки на властивості титанових сплавів та вибір найбільш технологічнішого режиму для об'єкта дослідження.

Обрано матеріал кулебалону – двофазний титановий сплав VT6C. Запропоновано удосконалений технологічний процес виготовлення кулебалону. Розроблено режим термозміцнюючої обробки титанового сплаву. Досліджено структуру сплаву VT6C. В результаті роботи досягнуто зменшення розміру зерна сплаву VT6C та підвищення механічних властивостей після запропонованої термообробки.

Ключові слова: титановий сплав, термозміцнююча обробка, кулебалон, механічні властивості, мікроструктура.

Зміст

	стор.
Вступ.....	4
1. Класифікація титанових сплавів.....	6
2. Матеріал і методика досліджень.....	9
3. Технічна характеристика кулебалону.....	10
4. Розробка технологічного процесу виготовлення напівсфер для кулебалону.....	13
5. Аналіз технологічності конструкції.....	15
6. Обґрунтування вибору матеріалу кулебалону.....	16
7. Розробка режимів термозміцнюючої обробки титанового сплаву VT6C.....	19
8. Дослідження структури титанового сплаву VT6C у вихідному стані та після термозміцнюючої обробки	26
9. Дослідження фізико-механічних характеристик сплаву VT6C.....	27
Висновки	29
Список використаної літератури	31

Вступ

Серед металів титан займає особливе місце. Вчені називають його металом майбутнього. У конструкціях сучасних літаків і вертольотів, ракет, космічних кораблів і надпотужних двигунів, підводних човнів і швидкохідних суден — ось де широко застосовують зараз титан. Його перевагами є високі міцнісні властивості, висока корозійна стійкість до агресивних середовищ і мала питома вага. Навіть не дивлячись на те, що вартість титану на ринку досить велика, він окупає себе своїми властивостями.

Тому не випадковий інтерес до титану авіаконструкторів, суднобудівників і гідробудівників [1-4]. Наприкінці 1968 р. піднявся в повітря перший у світі надзвуковий пасажирський лайнер Ту-144. Рулі повороту і деякі інші деталі цього гігантського літака, що нагріваються під час польоту до високої температури, виконані з титану. Елементи силових конструкцій ракет на твердому паливі виконуються з високоміцних титанових сплавів.

Титан використовується для виробництва балонів, в яких газу можуть зберігатися тривалий час під великим тиском - кулебалонів. З титанових сплавів виготовляють баки для рідкого кисню, застосовувані в ракетних двигунах. Широко відомі сплави для авіаційної промисловості, двофазні титанові сплави – ВТ6, ВТ6С, ВТ14[5].

Титан є перспективним конструкційним матеріалом. Незважаючи на велику розповсюдженість, він почав застосовуватись як конструкційний матеріал лише в кінці ХІХ століття. Важливе значення має порівняно великий вміст титану в земній корі, який забезпечує широке поширення його сплавів в майбутньому. За розповсюдженістю в земній корі титан поступається тільки трьом металам – алюмінію, залізу та магнію.

Титан та його сплави перспективні для застосування у багатьох галузях сучасної техніки. В деяких випадках вони є єдиним матеріалом, з якого можна виготовити обладнання або конструкції, здатні працювати в даних умовах.

З титану виготовляють теплообмінники, що працюють в корозійноактивних середовищах, наприклад в азотній, сірчаній кислотах. У титанових теплообмінниках, що працюють в 65% азотній кислоті, швидкість корозії при 160 °С знижується в 60 разів у порівнянні з теплообмінниками з нержавіючої сталі. Крім того, висока корозійна стійкість титану дозволяє знижувати товщину стінки теплообмінника до мінімуму [6-8].

Найчастіше титан застосовується в авіації, ракетобудуванні та інших галузях техніки, де питома міцність має важливе значення. Для інтервалу температур 300-600°С сплави титану мають найвище значення питомої міцності (σ_B / γ), поступаючись при температурах нижче 300°С алюмінієвим сплавам, а вище 600°С – сплавам на основі заліза і нікелю.

При проектуванні літальних апаратів прагнуть одержати найбільш легку конструкцію у поєднанні з необхідною міцністю. Алюмінієві сплави свого часу стали найпоширенішими в авіації через достатню питому міцність серед інших конструкційних матеріалів, які тоді застосовувалися.

Титанові сплави в промисловому масштабі вперше були використані в конструкціях авіаційних двигунів. Застосування титану в конструкціях реактивних двигунів дозволяє зменшити їх масу на 100 кг. Зокрема, з титанових сплавів виготовляють диски й лопатки компресора, деталі кріплення, корпуси двигунів [9-11].

1. Класифікація титанових сплавів

Титанові сплави класифікують за структурою у рівноважному стані :

1. α -сплави, структура яких представлена α -фазою. До сплавів на основі α -структури відносяться сплави з Al, Sn і Zr, а також з невеликою кількістю β -стабілізаторів (0,5-2%). Зважаючи на незначну кількість або навіть відсутність в їх структурі β -фази, вони практично не зміцнюються термічною обробкою і тому відносяться до категорії сплавів середньої міцності. Листове штампування цих титанових сплавів можливе тільки за допомогою гарячої деформації. Переваги α -сплавів - відмінна зварюваність, висока межа повзучості і відсутність необхідності в термічній обробці, а також відмінні ливарні властивості, що є важливим для фасонного лиття. Малолеговані α -сплави, а також технічний титан, який відноситься до цієї групи і має межу міцності менше 700 МПа, піддаються листовому штампуванню холодною деформацією [12-14].
2. $(\alpha+\beta)$ -сплави, структура яких представлена α - і β -фазами. Це найбільш численна група промислових титанових сплавів. Вони відрізняються більш високою технологічною пластичністю, ніж α -сплави, і разом з тим можуть бути термічно оброблені до високої міцності.
3. β -сплави, структура яких представлена механічно стабільною β -фазою. Сплави на основі β -структури мають найбільш високу технологічну пластичність і добре піддаються листовому штампуванню без нагрівання заготовок; після старіння набувають високу міцність; добре зварюються, але зварні з'єднання не можна піддавати зміцнюючій термічній обробці через появу крихкості, що обмежує застосування сплавів цього типу. Іншим недоліком β -сплавів є порівняно невисока гранична робоча

температура - 300°C; при більш високих температурах більшість сплавів цього типу стають крихкими.

4. Крім цього, в багатьох роботах пропонується виділити два перехідних класи титанових сплавів: псевдо- α -сплави, структура яких представлена α -фазою і невеликими кількостями β -фази та псевдо- β -сплави, структура яких близька до $(\alpha+\beta)$.

Титанові сплави одержують шляхом легування титану наступними елементами: Al, V, Mo, Mn, Sn, Zr, Cr, W. Легуючі добавки мають різну розчинність в α - β -Ti і змінюють температуру α - β -перетворення. Алюміній, а також кисень і азот, переважно розчиняються в α -Ti, підвищують цю температуру залежно від міри збільшення їх концентрації, що веде до розширення області існування α -модифікації; такі елементи називаються α -стабілізаторами. Sn і Zr добре розчиняються в обох алотропічних модифікаціях титану і суттєво не впливають на температуру $\alpha+\beta$ -перетворення; вони відносяться до нейтральних зміцнювачей [15].

Загальна класифікація легуючих елементів і домішок в титані приведена на рис. 1, на якому показано їх розподіл по різних групах. Крім того, елементи розбиті на дві групи за типом розчинів, які вони утворюють з титаном: елементи заміщення і елементи впровадження (рис.1).

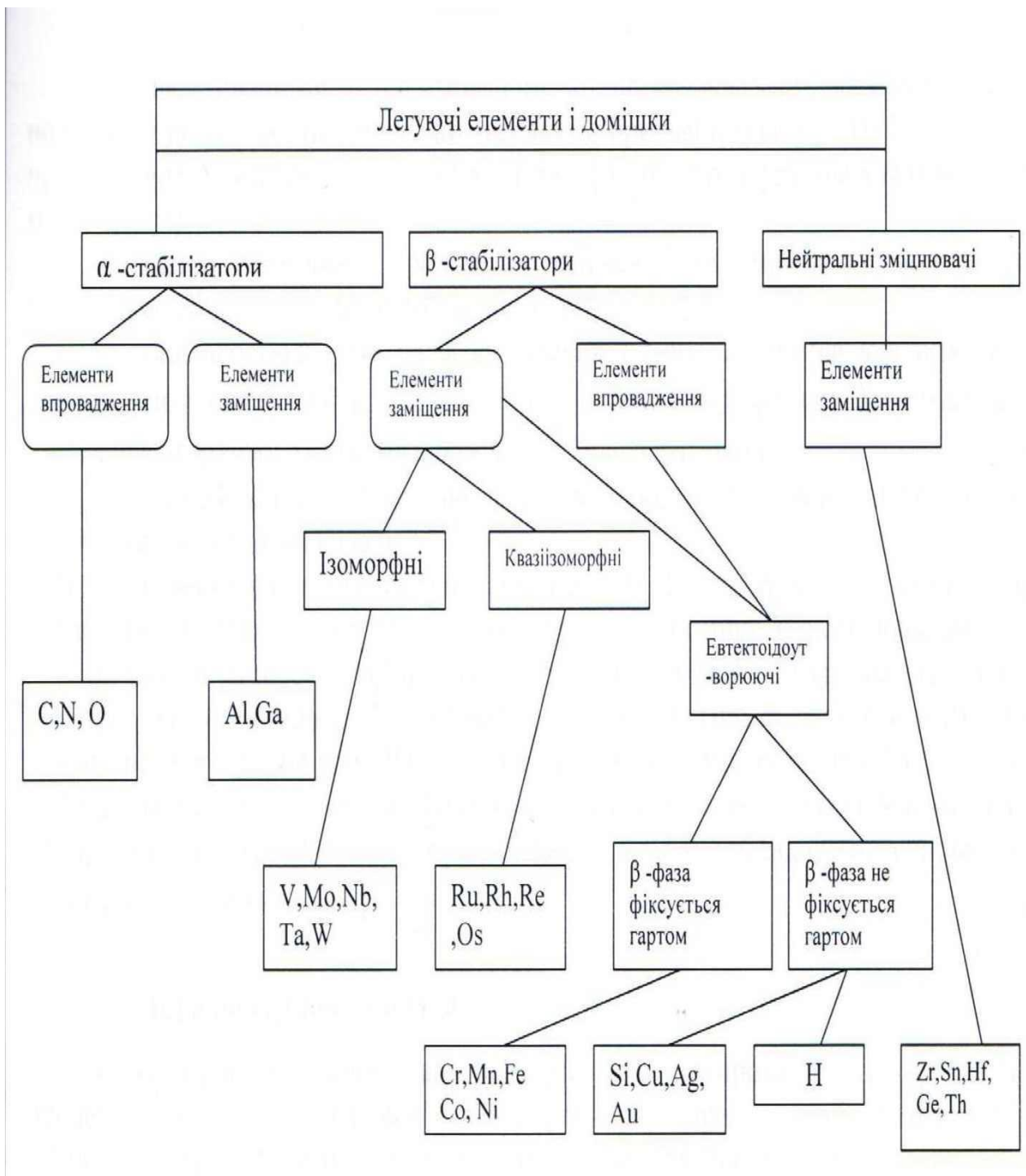


Рис. 1. – Класифікація легуючих елементів і домішок у титані

Хімічний склад промислових титанових сплавів наведено у таблиці 1.

Таблиця 1. - Хімічний склад промислових титанових сплавів.

Тип сплаву	Марка сплаву	Вміст легуючих елементів, % мас. (решта Ti)						
		Al	V	Mo	Mn	Cr	Si	Інші елементи
α -сплав	BT5	4,3-6,2	—	—	—	—	—	—
	BT5-1	4,5-6,0	—	—	—	—	—	2-3 Sn
псевдо- α -сплав	OT4-0	0,2-1,4	—	—	0,2-1,3	—	—	—
	BT20	6,0-7,5	—	0,5-2,0	—	—	—	1,5-2,5 Zr
	BT18	7,2-8,2	0,8-1,8	0,2-1,0	—	—	0,18-0,5	0,5-1,5 Nb 10-12 Zr
$(\alpha+\beta)$ -сплав	BT6C	5,0-6,5	3,5-4,5	—	—	—	—	—
	BT6	5,5-7,0	4,2-6,0	—	—	—	—	—
	BT8	6,0-7,3	—	2,8-3,8	—	—	0,20-0,40	—
	BT9	5,8-7,0	—	2,8-3,8	—	—	0,20-0,36	0,8-2,5 Zr
	BT3-1	5,5-7,0	—	2,0-3,0	—	1,0-2,5	0,15-0,40	0,2-0,7 Fe
	BT14	4,5-6,3	0,9-1,9	2,5-3,8	—	—	До 0,15	—
	BT22	4,0-5,7	4,0-5,5	4,5-5,0	—	0,5-2,0	—	0,5-1,5 Fe
β -сплав	BT15	2,3-3,6	—	6,8-8,0	—	9,5-11,0	—	1,0 Zr

2. Матеріал та методика досліджень

Матеріалом дослідження є двофазний $(\alpha+\beta)$ - титановий сплав BT6C, який використовується для виготовлення кулебалонів після зварювання. Об'єктом дослідження є кулебалон для зберігання зріджених газів – азоту або гелію.

Методика дослідження складається з аналізу конструкції кулебалону в цілому та напівсферах для його зварювання :

1. Розробка удосконаленого технологічного процесу виготовлення кулебалону.
2. Розробка режиму термозміцнюючої обробки титанового сплаву ВТ6С.
3. Дослідження структури та властивостей сплаву ВТ6С у вихідному стані та після термообробки.

В роботі використана електропіч СНЗ-6.12.4/10 для термообробки. Вивчення механічних властивостей проведено на промисловому об'єднанні та машинобудівельному підприємстві.ВОДП. Південний машинобудівний завод ім.Макарова.

Дослідження структура титанового сплаву ВТ6С проведено на металографічних мікроскопах МІМ-8М, Neophot-2 при різних збільшеннях.

3.Технічна характеристика кулебалону

Кулебалон призначений для зберігання газів азоту або гелію в рідкому стані (рис.2). Ці гази застосовуються для функціонування пневмогідролічної системи ракетно-космічних літальних апаратів, систем автоматики та забезпечення роботи електропневмоклапанів багатьох систем контролю.



Рис.2. – Загальний вигляд кулебалонів з титанових сплавів.

а – до зварювання; б – у зварному стані

Кулебалон є основним елементом системи наддуву, що підтримує необхідний тиск у паливних баках ракетно-космічних літальних апаратів. Під тиском газу, який знаходиться у кулебалоні (робочого тіла), паливо із баків подається до камер згоряння двигунів РКЛА. За допомогою тиску робочого тіла функціонують пневморегулятори тиску, які запобігають аварійному підвищенню тиску у паливних баках. Основні характеристики об'єкту виробництва наведені в табл. 2.

Таблиця 2. - Основні характеристики об'єкту виробництва.

Об'єм V, л	Маса m, кг	Робочий тиск P, МПа	Діаметр d, мм
5,5	2,8	20	222

Формою кулебалону є сфера. Вона має найкращі міцнісні властивості, мінімальну вагу та площу поверхні у порівнянні з іншими варіантами форм. Це було встановлено на основі порівняльного аналізу та розрахунків оптимальних параметрів паливних баків ракет. Сферична форма сприяє рівномірному розподілу робочого тиску по поверхні матеріалу (рис. 3.), що є дуже важливим у питаннях зниження маси конструкції.

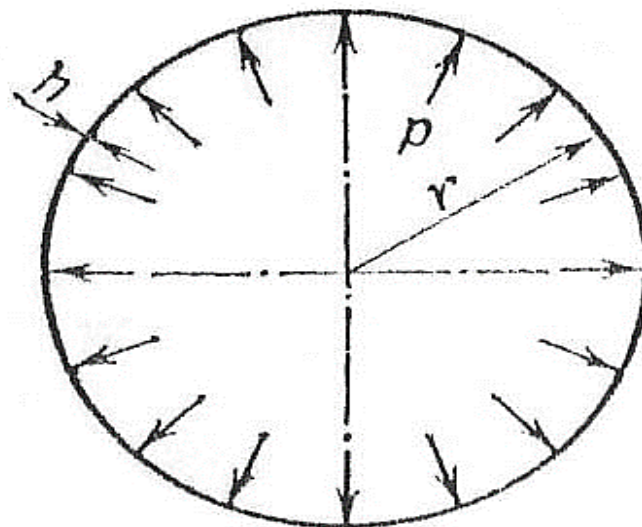


Рис.3.- Ескіз сферичної заготовки для кулебалону

Матеріал для виготовлення кулебалону повинен мати високу міцність, добрі технологічні властивості (для штампування, зварювання), обробляється у механічно і в той же час мати невисоку питому вагу. Цим вимогам задовольняють повній мірі деформовані титанові сплави завдяки високим фізико-хімічним і механічним властивостям. Для виготовлення кулебалону, в більшій мірі відповідає титановій сплав ВТ6С. Кількість кулебалонів на 1 ракету (наприклад «Зеніт») - 24 кулебалони. У табл.3.наведені різновиди кулебалонів.

Таблиця 3. - Різновиди кулебалонів[16].

Матеріал	Об'єм, л	Діаметр, мм	Маса, кг	Робочий тиск, кгс/см ²
<u>ВТ6С</u>	<u>1,85</u>	<u>154</u>	<u>1,95</u>	<u>230</u>
ВТ6С	3,5	191	2,95	230
ВТ6С	5,5	222	2,8	200
12Х18Н10Т	5,5	222	5,7	100
ВТ6	25,0	367	11,5	230
ВТ6	25,0	367	17	230
ВТ6	25,0	367	17,35	280
ВТ14	129,5	629	62,5	240

Балони забезпечують надійне зберігання газів при робочому тиску 220 - 340 кгс/см², в тому числі при криогенних температурах до -196° С. Гарантійний термін експлуатації балонів - 10-12 років.

4. Розробка технологічного процесу виготовлення напівсфер для кулебалону

Базовий технологічний процес виготовлення кулебалону на машинобудівному підприємстві наведено на рис.4 [17].

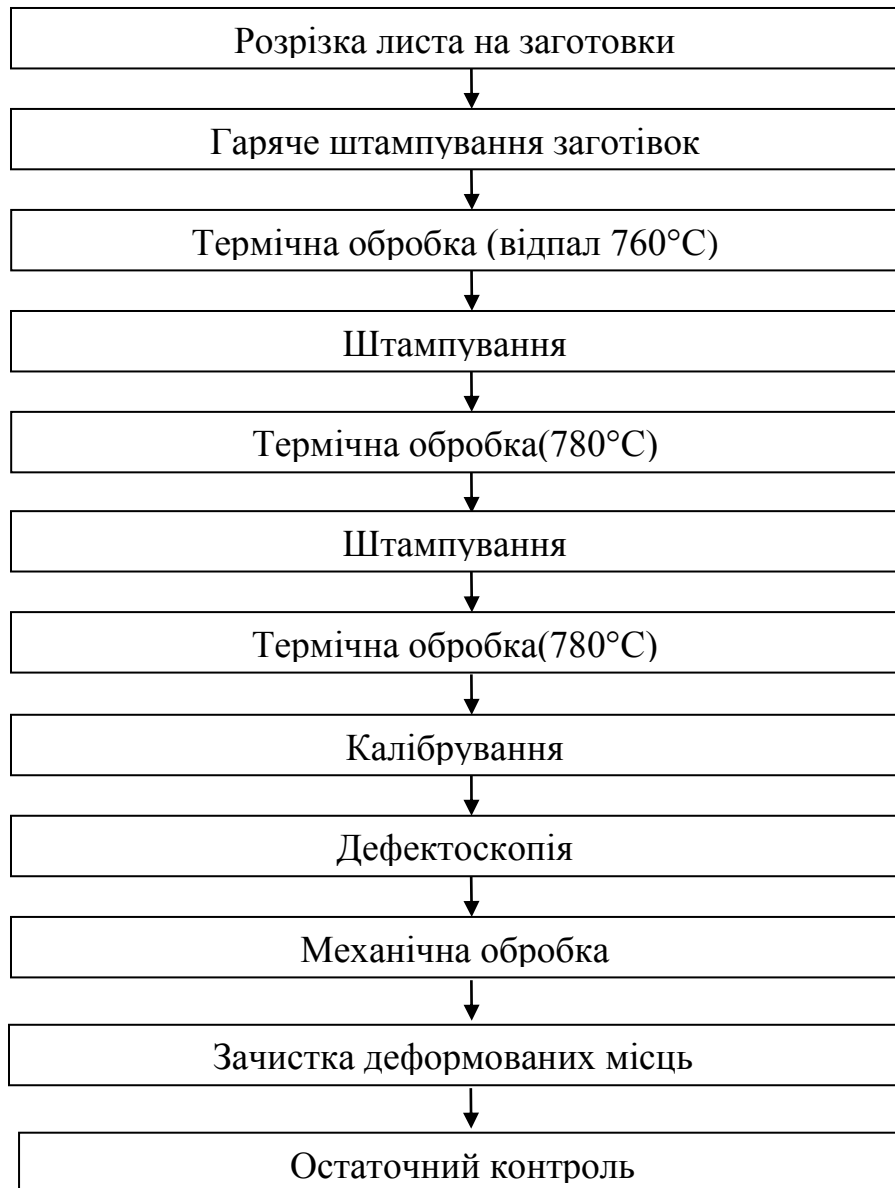


Рис. 4. - Базовий технологічний процес виготовлення напівсфер для кулебалону

Удосконалений технологічний процес виготовлення напівсфер наведено на рис.5.

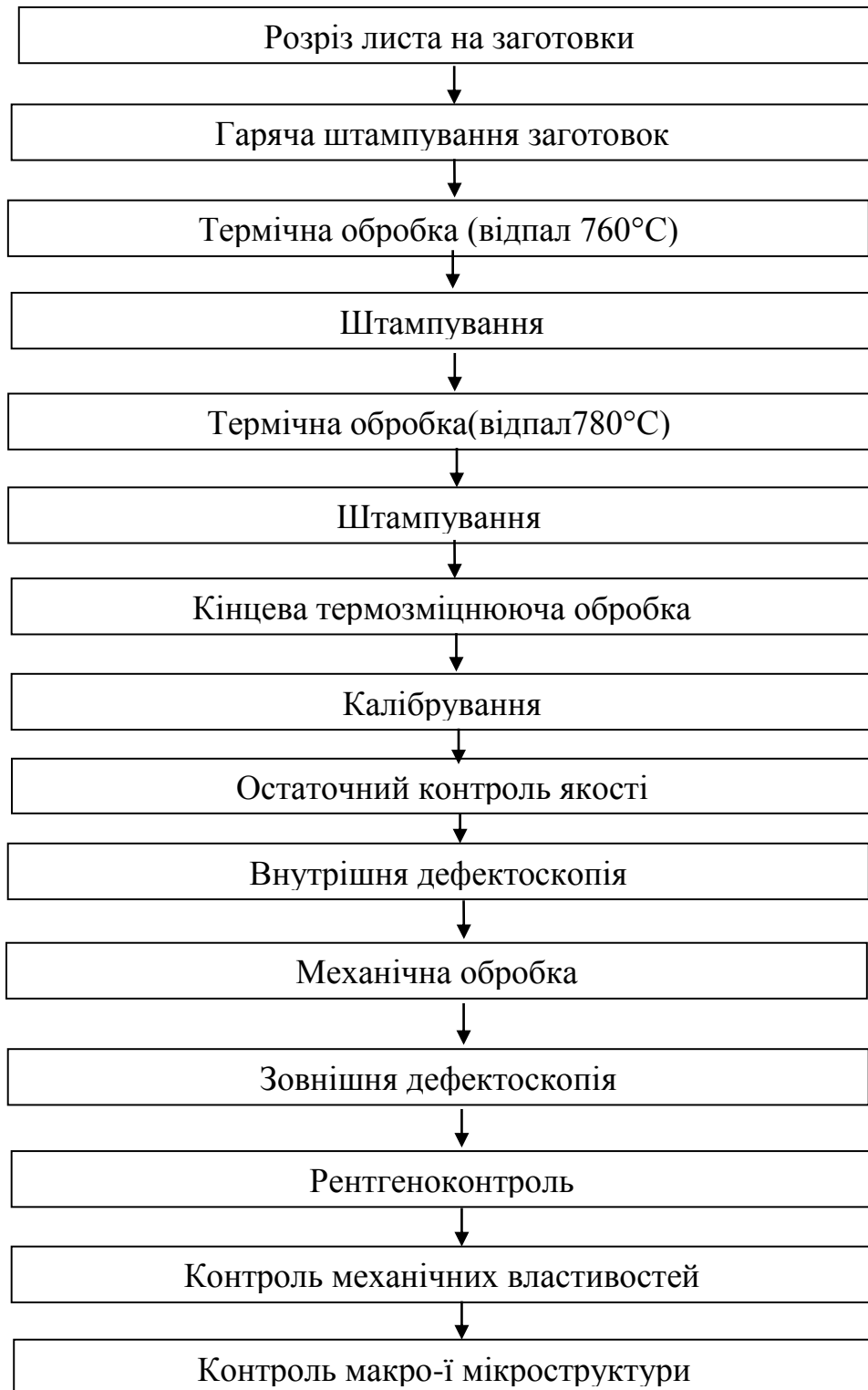


Рис.5. - Удосконалений технологічний процес виготовлення напівсфер.

5. Аналіз технологічності конструкції

Аналіз технологічності конструкції проводять з метою виявлення недоліків конструкції за даними, які наведені на кресленнях та технічними вимогами, а також можливе поліпшення технологічності конструкції. За допомогою технологічного аналізу конструкції забезпечують поліпшення техніко-економічних показників розробленого технологічного процесу.

Основні задачі, які вирішують при аналізі технологічності конструкції виробу, зведені до можливості зменшення трудомісткості та металомісткості, спрощення конструкції, можливості та доцільності заміни матеріалу виробу, аналізу можливості розроблення більш раціонального методу отримання заготовки, враховуючи економічні фактори.

Для даного виробу – кулебалону – доцільно провести аналіз можливості розроблення більш раціонального методу отримання заготовки, враховуючи економічні фактори.

Як було встановлено, найкращою формою для кулебалону є сфера, тому що вона має мінімальну вагу та мінімальну поверхню. Заміна форми виробу недоцільна. Однак з точки зору технології виготовлення, абсолютну сферичну оболонку виготовити неможливо. Тому на практиці отримують дві напівсфери та з'єднують їх. Основними вимогами до з'єднання двох напівсфер є:

- герметичність;
- висока міцність з'єднань;
- нероз'ємність.

Герметичність - це здатність оболонки (корпусу), окремих її елементів і з'єднань перешкоджати газовому або рідинному обміну між середовищами, розділеними цією оболонкою.

Цим вимогам цілком відповідає спосіб зварювання.

Заготовками для зварювання є дві напівсфери. Існує два можливих методи отримання напівсфер: лиття та штампування.

Лиття пов'язане з труднощами отримання високоточних ливарних форм та незадовільними ливарними властивостями титанових сплавів, таких ливарних сплавів як ВТ14Л, ВТ1Л, ВТ6Л. Такі сплави мають добру текучість, але для кулебалону вони не рекомендовані, так як мають гірші механічні властивості, що потрібні для деталі.

Вітчизняна промисловість випускає листовий прокат із титанових сплавів. Значно легше вирізати з листа титанового сплаву заготовки у формі кола та штампувати з неї напівсферу. Відповідно до аналізу можна зробити висновок, що штампування має економічну й технологічну перевагу.

6. Обґрунтування вибору матеріалу кулебалону

Для того, щоб визначитись, з якого матеріалу можна виготовляти кулебалони, треба порівняти декілька сплавів. Обираємо для цього алюмінієві сплави, титанові та нікелеві. Розглянемо густину матеріалів. Вона одразу продемонструє ті сплави, які зможуть задовольнити конструкторські вимоги. Густина промислових конструкційних матеріалів представлена у табл. 3.

Таблиця 4 - Густина матеріалів, що досліджується

Сплав	ρ , кг/м ³
Нікелевий	8900
Алюмінієвий	2700
Титановий	4500
Сталь X18H10T	7800

Як видно з таблиці, необхідні вимоги задовольняють не всі сплави. Для конструювання кулебалону підходять алюмінієві та титанові сплави, тому, що густина інших перевищує певні вимоги. Алюміній незадовольняє вимогам, тому що піддається корозії в контакт з X18H10T і погано протистоїть корозійному

розтріскуванню. Титан має високу корозійну стійкість. Висока корозійна стійкість титану обумовлена утворенням на поверхні щільної захисної плівки (TiO_2).

Вимоги до фізико-механічних властивостей матеріалу виробу:

- мінімальна вага;
- висока корозійна стійкість;
- висока пластичність;
- задовільна зварюваність.

У таблиці 5 представлені характеристики фізико-механічних властивостей чистого титану, які дозволяють оцінити наскільки вони високі.

Таблиця 5 - Характеристики властивостей титану

Температура плавлення, °C	1668
Густина, кг/см ³	4505
Теплопровідність, ккал/см·сек·°C	0,04
Електроопір, 10 ⁻⁶ Ом·см	42,0
Коефіцієнт лінійного розширення, 10 ⁻⁶ ·°C ⁻¹	8,5
Модуль пружності, кг/мм ²	11200
Теплоємність, ккал/г·°C	0,125

Після дослідження цих властивостей, які є найважливішими для кулебалону, було обрано зварювальний титановий сплав ВТ6С, він мав найбільш відповідні властивості для отримання якісної продукції.

Сплав ВТ6С використовується в літальних апаратах для виготовлення балонів з високим рівнем внутрішнього тиску, які можуть працювати у широкому інтервалі температур від -196°C до +450°C. Взагалі сплав ВТ6 знайшов саме широке застосування в авіаційних і космічних технологіях. Як

свідчить статистика, 25 відсотків усіх матеріалів, задіяних в аерокосмічній промисловості, становить VT6С.

Хімічний склад досліджуваного сплаву представлений у табл. 6.

Таблиця 6 - Хімічний склад титанового сплаву VT6С, (ГОСТ 19807 – 91)

Елемент	Ti	Al	V	Fe	C	Si	Zr	N	O	H
Кількість, % мас.	Осно ва	5.3.. 6.5	3.5.. 4.5	<0.25	<0.3	<0.1	<0.3	<0.04	<0.15	<0.015

У цьому сплаві набувається оптимальне співвідношення міцності і пластичності сплаву. Алюміній, що міститься у сплаві VT6С, підвищує його міцність і жаростійкість, а ванадій підвищує не тільки міцність, але і пластичні властивості цього матеріалу. Настільки вдале легування й зумовило таке широке застосування, VT6С в авіа- та ракетобудуванні. Діаграма стану подвійної системи Ti – Al наведено на рис.6.

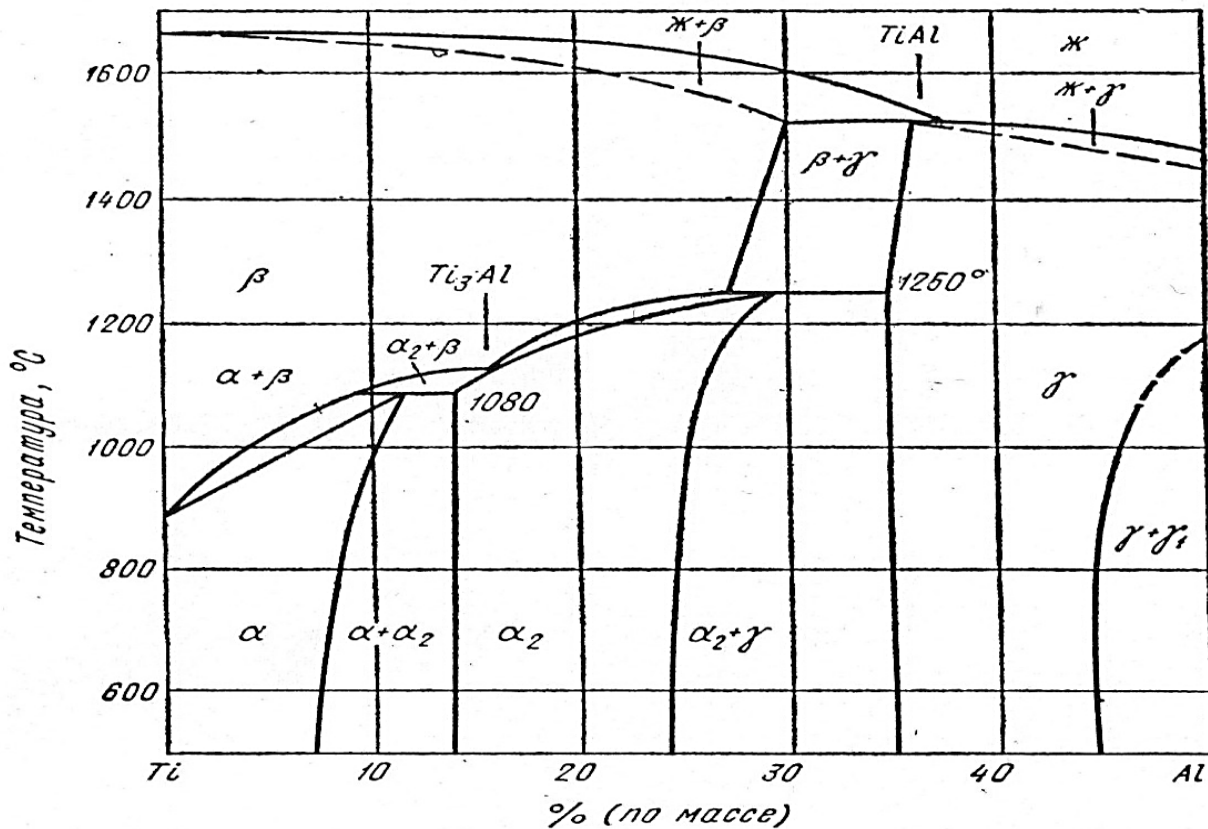


Рис.6. - Діаграма стану подвійної системи Ti – Al.

Al - підвищує питому міцність, жаростійкість і жароміцність, зменшує схильність сплавів до водневої крихкості, підвищує модуль пружності. Al – головний зміцнювач титанових сплавів завдяки гарній розчинності у α -фазі.

V - знижує температуру поліморфного перетворення титану, розширює область β -твердого розчину і підвищує міцність, жароміцність і термічну стабільність титанових сплавів.

Відповідно до діаграми стану подвійної системи Ti – Al, алюміній має змінну розчинність як в α -, так і в β -титані (рис. 6). В α -титані вона становить від 8 до 11%. Саме це дозволяє проводити термічну обробку. Але Al може утворювати інтерметалідні фази Ti_3Al і $TiAl$, які можуть робити сплав крихким.

7. Розробка режимів термозміцнюючої обробки титанового сплаву VT6C

Титан існує у вигляді двох алотропічних модифікацій: нижче температури $882,5^\circ\text{C}$ стійка α -фаза з гексагональною щільноупакованою решіткою ($a = 2,951\text{\AA}$, $c = 4,679\text{\AA}$), а вище цієї температури - β -фаза з кубічною об'ємноцентрованою решіткою ($a = 3,269\text{\AA}$). Домішки і легуючі добавки можуть істотно змінювати температуру α - β перетворення. Наряду з комплексним легуванням та мікролегуванням ефективними напрямками підвищення міцності, і що не менш важливо, конструкційна міцність перспективних зварюваних титанових сплавів являється зміцнююча термічна обробка, термомеханічна обробка, текстурне зміцнення.

Для сплаву VT6C рекомендуються такі режими зміцнюючої термічної обробки: відпал від температури $750-950^\circ\text{C}$ з наступним охолодженням на повітрі; гартування при температурах $880-930^\circ\text{C}$ в воду і старіння при $450-500^\circ\text{C}$. Механічну обробку доцільно проводити після гарту з температур $\sim 850-875^\circ\text{C}$, а чистову-після старіння при $550-600^\circ\text{C}$.

Це базовий режим для термозміцнюючої обробки. Завдання даної роботи в тому, щоб розробити удосконалену обробку для покращення властивостей сплаву і зменшити час, який потрібен для виготовлення кулебалону і таким чином підвищити кількість виробів та їх якість.

Грубозернисту структуру титану і його сплавів можна виправити термообробкою, подібною до тієї, яку застосовують для сталі, а саме подвійною фазовою перекристалізацією.

Загартування і старіння – зміцнююча термічна обробка титанових сплавів, яка застосовується для отримання високої міцності в поєднанні із задовільною пластичністю. Останнім часом для $(\alpha+\beta)$ - титанових сплавів дедалі частіше застосовують зміцнюючу термічну обробку. Промислові $(\alpha+\beta)$ -сплави загартовують з температур, що відповідають $(\alpha+\beta)$ -області, звичайно близьких до точки A_{c2} . Після гартування при таких температурах сплави мають невисоку міцність, знижену межу текучості, високу пластичність і легко піддаються різним технологічним операціям. Режим зміцнюючої термічної обробки титанового сплаву ВТ6С наведено у таблиці 7.

Таблиця 7 - Режими термозміцнюючої обробки титанових сплавів

Марка сплаву	Температура поліморфного перетворення $T_{пп}$, °C	Температура нагрівання під загартування, °C	Температура старіння, °C	Час витримки при старінні, год
ВТ6С	950–990	880–930	450–500	2–4

Витримку при температурі гартування залежно від товщини листа вказано в табл. 8.

Прогартуваність титанових сплавів є різною: сплави ВТ3-1, ВТ6, ВТ6С, ВТ8 і ВТ9 прогартуються при товщині листа до 45 мм.

Маючи мінімальну товщину листа 10,5 мм, ми можемо зробити висновок з таблиці про кількість часу витримки.

Таблиця 8 - Витримки при температурі відпалу в залежності від товщини листа

Товщина листа, мм	До 1,5	1,6-2	2,1-6,0	6,0-11
Витримка, хвилин	15	20	25	60

Виходячи з цієї таблиці, обирали витримку 60 хвилин, відповідно до товщини листа. Хоча за базовим технологічним процесом ця витримка становить 90 хвилин. Отже, так як ми обираємо витримку меншу за часом ніж по базовому, то зменшується час, який потрібен для виготовлення деталі.

З підвищенням температури нагрівання під загартування до A_{c3} міцність і твердість зістарених сплавів зростають, а пластичні властивості зменшуються, особливо при нагріванні до температур, відповідних β -області. Оптимальне поєднання механічних властивостей зістарених $(\alpha+\beta)$ -сплавів спостерігається після гартування при температурах, близьких до A_{c2} .

Гартування проводять з метою фіксування метастабільних фаз (β , α' , α'') при швидкому охолодженні. Обробка складається з нагріву при температурах існування β -фази і різкого охолодження (переважно у воду) для цих температур. Для сплавів з перевагою α -фази загартування не ефективно. Сплави з $(\alpha+\beta)$ -структурою для гартування нагрівають при температурах $(\alpha+\beta)$ -області. При загартування з температур верхньої частини $(\alpha+\beta)$ -області фіксується мартенсит, а з температур нижньої частини цієї області - метастабільна β -фаза.

В даній роботі пропонуємо гартування проводити у підсолену воду, це зменшить затрачений час на охолодження і покращить мікроструктуру.

Старіння проводять, для розпаду метастабільних фаз, отримані в результаті загартування. Режим складається з нагріву при температурі значно нижчій температурі поліморфного перетворення і подальшого охолодження на повітрі.

Отримати оптимальне поєднання міцності і пластичності сплавів з $(\alpha+\beta)$ -структурою в результаті загартування і старіння можна лише в разі присутності в структурі первинної α -фази, тобто структура перед зміцнюючою термообробкою утворилася при деформації в $(\alpha+\beta)$ -області.

Отже, для сплаву ВТ6С оптимальною зміцнюючою термообробкою є термообробка яка проводиться для $(\alpha+\beta)$ -області, а саме гартування та старіння. У результаті отримаємо високу міцність у поєднанні із задовільною пластичністю.

Для поліпшення структури та підвищення комплексу механічних властивостей сплаву ВТ6С у роботі запропонований спосіб термозміцнюючої обробки. Проведення термозміцнюючої обробки у два етапи, така обробка дасть змогу покращити механічні властивості. А саме покращити міцність і залишити задовільну пластичність, що призведе до позитивних змін у якості металу. Для цього проводимо гартування циклічно 2 рази, а саме нагріваємо до температури гартування, потім охолоджуємо до температури нижчої ніж температура поліморфного перетворення. І так 2 рази, після чого охолоджуємо і проводимо старіння. Ось так буде виглядати схема такої термічної обробки.

У роботі розроблений наступний режим термозміцнюючої обробки: гартування від 960°C 910°C , 20 хв., охолодження у воді та старіння при 450°C , 2 год., охолодження на повітрі.

Схема запропонованого режиму приведена на рис.7. При 960°C відбувається α - β – перетворення і прискорюється дифузія легуючих елементів: алюмінію та ванадію.

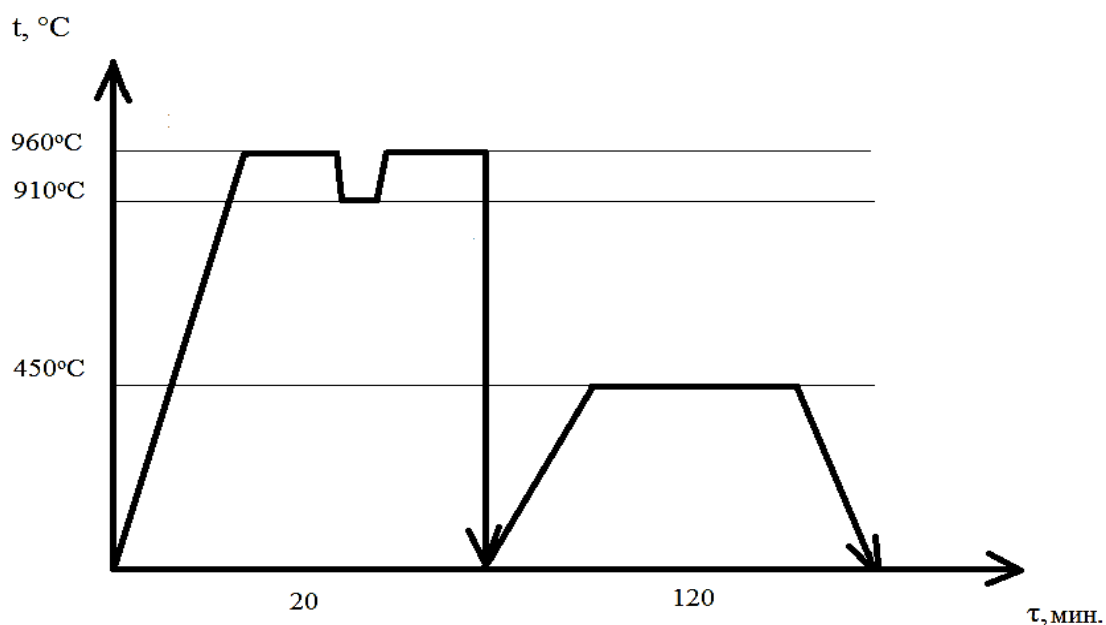


Рис.7. Схема режиму запропонованої термозміцнюючої обробки сплаву
VT6C

Відомо, що при нагріванні велика частина кисню, що поглинається титаном, утворює окалину. Тому було вивчено фазовий склад поверхні термооброблених зразків сплаву VT6C на дифрактометрі ДРОН-2,0. Результати наведено у табл. 9, які були отримані рентгеноструктурним аналізом. Були випробувані режими нагріву від 500°C до 970°C.

Таблиця 9 - Фазовий склад зразків сплаву VT6C після термічної обробки

Режим термічної обробки	Фазовий склад
Вихідний, після відпалу	$\alpha+\beta$
500 °C, 20 хвилин	$\alpha+\beta$
600 °C, 20 хвилин	$\alpha+\beta$
700 °C, 20 хвилин	$\alpha+\beta, \text{TiO}_2$
800 °C, 20 хвилин	$\alpha+\beta, \text{TiO}_2$
870 °C, 20 хвилин	$\alpha+\beta, \text{TiO}_2, \text{TiN}, \text{Ti}_3\text{Al}$
910 °C, 60 хвилин	$\alpha+\beta, \text{TiO}_2, \text{Ti}_3\text{O}_5, \text{TiO}, \text{Ti}_3\text{Al}$
950 °C, 60 хвилин	$\alpha+\beta, \text{TiO}_2, \text{TiN}, \text{Ti}_3\text{Al}$

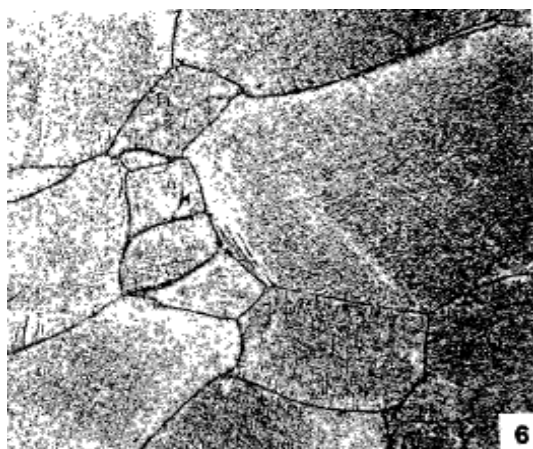
В існуючому технологічному процесі використовують електропіч СНЗ 6.12.4/10. Ця піч призначена для нагріву у повітряному середовищі деталей машин і інструменту загальною масою до 400 кг під загартування, відпал, нормалізацію та інші види оброблення до температури не більше 1000°С. У таблиці 10 наведені характеристики електропечі.

Таблиця 10 - Характеристики електропечі СНЗ-6.12.4/10

Найменування параметра	Норма параметра
Встановлена потужність, кВт	70
Номінальна температура у робочому просторі,	1000
Похибка регулювання температури у робочому просторі (без садки)	±5
Номінальна напруга, В:	
- силових ланцюгів	380
- ланцюгів керування	220
Номінальна частота, Гц	50
Число фаз, шт.	3
Розміри робочого простору електропечі, мм:	
- ширина	600
- довжина	1200
- висота	400
Маса садки, кг, не більше	400
Середовище в робочому просторі	повітря

Проведено дослідження мікроструктури титанового сплаву ВТ6С. У вихідному стані мікроструктури виявлені зерна, розміром від 5 до 10 мкм. Спостерігається різнозернистість структури, що негативно впливає на механічні властивості сплаву. Саме це означає, що міцність буде не достатня для

кулебалону, тому для того, щоб покращити сплав необхідна термічна обробка. У вихідному стані по границях колоній зустрічається сітка первинної α -фази, яка призводить до втрати пластичності і ударної в'язкості (рис.8). Зерна подрібнюються, з'являється структура кошикового плетіння. З підвищенням температури загартування збільшується міцність і знижується пластичність. Комплекс поєднання міцності і пластичності досягається старінням при 450-570 °С.

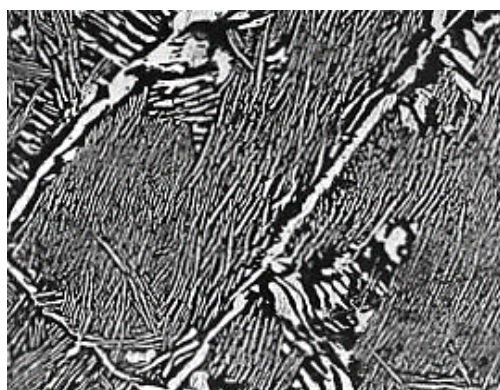


а)

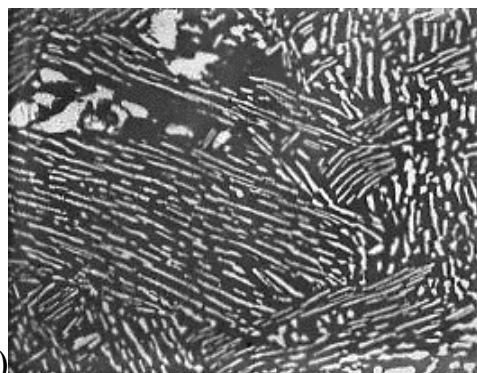


б)

Рис. 8. - Мікроструктура сплаву VT6C у вихідному стані до термічної обробки, $\times 1000$



а)



б)

Рис. 9. – Вихідна мікроструктура штампованого сплаву до термічної обробки VT6C, $\times 200$.

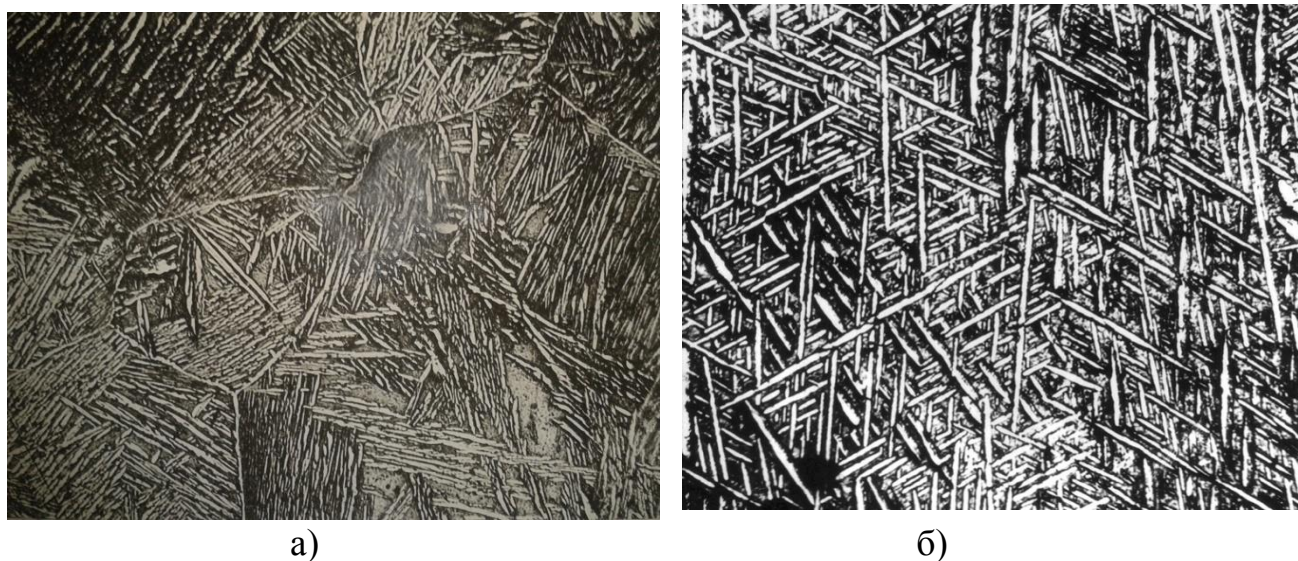


Рис. 10. - Мікроструктура титанового сплаву VT6C, після удосконаленої технології термозміцнюючої обробки, гартування та старіння, $\times 200$

8. Дослідження механічних характеристик сплаву VT6C

Механічні властивості сплаву VT6C після термозміцнюючої обробки наведено в табл.11.

Таблиця 11 – Механічні властивості сплаву VT6C

Заготовка	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	Ψ , %	КСУ, кДж / м ²
Лист	980	800	8	53	600

Механічні властивості титану істотно залежать від вмісту домішок в металі. Розрізняють домішки втілення - кисень, азот, вуглець, водень і домішки заміщення, до яких відносяться залізо і кремній. Хоча домішки підвищують міцність, але одночасно різко знижують пластичність, причому найбільш сильну негативну дію надають домішки впровадження, особливо газу. При введенні всього лише 0,003% Н, 0,02% N титан повністю втрачає здатність до пластичного деформування і крихко руйнується.

Особливо шкідливий водень, що викликає водневу крихкість титанових сплавів. Водень потрапляє в метал при плавці і подальшої обробки, зокрема

при травленні напівфабрикатів. Водень малорозчинний в α -титані і утворює пластинчасті частинки гідриду TiH_2 , що знижує ударну в'язкість. Тому вміст домішок, особливо газів, в титані і титанових сплавах обмежено.

Отже, розглядаючи фізичні та механічні характеристики сплаву VT6C, можна зробити висновок, що цей сплав повністю задовольняє вимоги до виготовлення кулебалону для зберігання рідких газів гелію та азоту.

9. Статистична обробка даних механічних властивостей

На машинобудівних заводах були відібрані статистичні дані по хімічному складу та механічним властивостям промислових штамповок зі сплаву VT6C.

В таблиці 12 приведений хімічний склад зразків досліджуваного сплаву.

Таблиця 12 - Хімічний склад масиву даних досліджуваного сплаву.

	Концентрація компонентів, % мас.					
	Al	V	Fe	C	Si	Zr
ГОСТ 19807-91	5,3...6,5	3,5...4,5	<0,25	<0,3	<0,1	<0,3
Масив даних	5,3...6,3	4,3...5,2	0,26...0,50	0,1...0,4	0,11...0,19	0,13...0,25

В результаті аналізу масиву статистичних даних визначені коефіцієнти кореляції (K) кожної з механічних характеристик вивчаємого сплаву з концентраціями кожного з компонентів, їх значення представлені в табл.13.

Таблиця 13 – Коефіцієнти кореляції

Елементи	Коефіцієнти кореляції			
	BT6C			
	σ_B	δ	ψ	KCU
Al	0,456	-0,343	0,005	-0,202
V	0,103	0,288	0,738	0,015
Fe	0,275	-0,244	0,238	0,031
Si	0,039	-0,015	-0,18	0,064
Zr	0,069	-0,365	-0,385	-0,571

З аналізу приведених даних випливає:

- на межу міцності сплаву BT6C найбільший вплив надає зміна концентрації α -стабілізаторів O і Al, змінювали властивості сплаву і β -стабілізаторами – залізо та ванадій. Si вважається одним з сильних зміцнювачів титанових сплавів, але через малий вміст в сплаві він не завдав значного впливу.

- на відносне подовження позитивно вплинув тільки V, збільшення концентрації O, Al та Fe викликали зниження його значення.

- зміна концентрації β -стабілізаторів не вплинула на ударну в'язкість, суттєво знизило її підвищення вмісту O₂ та Al.

- евтектоїдоутворюючі елементи, Cr, Fe і Si надавали зміцнюючу дію, найбільш суттєво впливала зміна вмісту Cr, вплив Si був більш слабким.

Таким чином, існує вплив зміни вмісту α -стабілізатора Al і ізоморфних β -стабілізаторів в псевдо- α -сплаві BT6C. В сплаві BT6C збільшення концентрації алюмінію викликало суттєве зміцнення з одночасним зниженням пластичності та ударної в'язкості. Ванадій у сплаві BT6C дещо збільшував межу міцності, а також позитивно впливав на характеристики пластичності. Представлені дані

наглядно підтверджують результати визначених коефіцієнтів кореляції межі міцності і концентрації компонентів титанового сплаву VT6C.

Висновки

1. Проведено аналіз умов роботи конструкції – кулебалону для зберігання газів азоту або гелію в рідкому стані. Виходячи з умов роботи кулебалону відповідального призначення, обрано матеріал – двофазний зварювальний титановий сплав VT6C. Цей сплав штампується, його можна використовувати в чистових зварних конструкціях для виготовлення кулебалонів.
2. Розглянуто базовий технологічний процес виготовлення кулебалону.
3. Запропоновано удосконалений технологічний процес виготовлення кулебалону з операціями контролю механічних властивостей та структури сплаву VT6C.
4. На підставі проведених досліджень та вивчення існуючих режимів зміцнюючої термічної обробки титанових сплавів пропонується піддавати кулебалон з титанового сплаву наступній термічній обробці: ступеневе гартування від температур 960 → 910 °C у воду і старіння при 450 °C, 2 год., охолодження на повітрі. У результаті запропонованої термозміцнюючої обробки – отримана однорідна дрібнозерниста структура сплаву VT6C. Зменшено утворення альфірованого шару, який різко знижує технологічну пластичність титанових сплавів
5. В результаті проведеної роботи розроблено енергозберігаючий режим термозміцнюючої ступінчастої обробки від температур 960 → 910 °C у воду та старіння при 450 °C, 2 год., охолодження на повітрі. Це дозволило скоротити час старіння, що істотно знижує витрати на електроенергію, а також зменшити утворення альфірованого шару, що підвищує якість титанового сплаву VT6C і знижує витрати на механічну обробку.

6. Проведено порівняльне дослідження мікроструктури титанового сплаву ВТ6С до і після термозміцнюючої обробки. Однорідна дисперсна структура сплаву ВТ6С отримана після термозміцнюючої обробки дозволила підвищити рівень міцнісних властивостей без істотної втрати пластичності : $\sigma_b = 980$ МПа, $\sigma_{0,2} = 800$ МПа, $\delta = 8\%$, КСУ = 600 кДж/м².
7. Доведено, що саме титановий сплав ВТ6С найбільше підходить для виготовлення кулебалону, так як його характеристики задовільняють умовам роботи конструкції..

Список використаної літератури

1. Абраимов Н.В., Елисеєв Ю.С., Крымов В.В. Авиационное материаловедение и технология обработки металлов: Учебное пособие для авиационных вузов. – М: Высшая школа, 1998. – 444 с.
2. Агеев В.Н. Кинетика окисления тонких пленок титана, выращенных на поверхности вольфрама / В.Н. Агеев, Е.Ю. Афанасьева, Н.Д. Потехина // Физика твердого тела, 2004. – Вып. 8. – С. 45-52.
3. Бецофен С.Я., Ильин А.А., Плотников А.Д., Таранишин А.А. Текстура и конструкционная прочность сферических сосудов давления из сплавов титана. Авиационная промышленность, 2006, №4. – С. 26-32.
4. Бецофен С.Я., Таранишин А.А., Панин П.В. Количественный фазовый анализ текстурированных титановых сплавов. Труды 3 Международной конференции «Титан-2006 в СНГ» – М.: Наука, 2009. – С. 287-291.
5. Богуслаев В.О., Качан О.Я., Калініна Н.Є., Мозговий В.Ф., Калінін В.Т. Авіаційно-космічні матеріали та технології. – Запоріжжя: Видавництво ВАТ Мотор Січ, 2009. – 383 с.
6. Солнцев Ю.П. Спеціальні конструкційні матеріали / Ю.П. Солнцев, С.Б. Беліков, І.П. Волчок. – Запоріжжя : ВАПЛІС – ПОЛІГРАФ, 2010. – 536 с.
7. Гурский Л.И. Структура и кинетика взаимодействия металла с окисляющими средами / Л.И. Гурский, В.А. Зеленин. – Минск.: Наука и техника, 1982. – 109 с.
8. Колачев Б.А., Ливанов В.А., Елагин В.И. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1996. – 480 с.
9. Линник А.К. Основи конструювання ракет-носіїв: Навчальний посібник. Дніпропетровський національний університет, 2008. – 394с.
10. Манько Т.А., Кучма Л.Д., Губенко С.І., Джур Є.О., Сітало В.Г. Спеціальне матеріалознавство: Підручник. – Д.: АРТ-ПРЕС, 2004. – 216 с.

11. Походня І.К., Косторнов А.Г., Махненко В.І. Сучасне матеріалознавство ХХІ сторіччя. – Київ, 1998. – 657 с.
12. Солонина О.П., Глазунов С.Г. Титановые сплавы. Жаропрочные титановые сплавы. – М.: Металлургия, 1996. – 448 с.
13. Шаповалова. О.М. Поглощение газовых примесей при производстве титановых порошков / О.М. Шаповалова, Е.П. Бабенко // Вісник ДНУ, серія "Ракетно-космічна техніка". – Д.: ДНУ, 2003. – Вип. 7. – С. 25-27.
14. А. И. Хорев Термическая, термомеханическая обработка и текстурное упрочнение свариваемых титановых сплавов» [Текст] // Сварочное производство, № 10. - 2012. - 20 с.
15. Богуслаев В.О., Качан О.Я., Калинина Н. Е. підручник «Наноматеріали і нанотехнології», 2012. – 185 с.
16. Т.В. Носова, С.И. Мамчур, Н.Е. Калинина, Е.А. Джур, «Физические свойства и методы исследования материалов». – Д.: Издательство Маковецкий, 2014. – 60 с.
17. Калинина Н. Е., Калинин В.Т., Носова Т. В., Мамчур С. И., Грекова М. В. Навчальний посібник. Специальные сплавы с особыми свойствами для авиа- и ракетостроения. – Д.: ДНУ, 2014 – 120 с.
18. Калинина Н. Е., Джур Е.А., Мамчур С. И., Шахов А.А. Влияние легирования и модифицирования на свойства жаропрочных сплавов // Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки. – Дніпро, Ліра, т.ХХІІІ, 2017. – С.28-32.