

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
**Кафедра прикладного матеріалознавства
і технології конструкційних матеріалів**

ЗАТВЕРДЖУЮ:
завідувач кафедру
Гапонова Оксана Петрівна

дата, підпис

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
НА ЗДОБУТТЯ СТУПЕНЯ БАКАЛАВРА**

за напрямом підготовки 132 «Матеріалознавство»

Тема роботи «Вибір матеріалу та технології отримання композитної пластини
для легкого бронезахисту».

Виконав: Колодченко Павло
Миколайович

Керівник: Марченко Станіслав
Вікторович

Залікова книжка №
16510019

дата, підпис

підпис

Захищена з оцінкою

Секретар ЕК:
Куцомеля Юлія Юріївна

оцінка, дата

дата, підпис

Сумський державний університет
Факультет технічних систем та енергоефективних технологій
Кафедра «Прикладного матеріалознавства і технології конструкційних матеріалів»
Спеціальність 132 «Матеріалознавство»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

«__» _____ 20__ року

**ЗАВДАННЯ
ДЛЯ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
НА ЗДОБУТТЯ СТУПЕНЯ БАКАЛАВРА**

Колодченко Павло Миколайович

1. Тема проекту (роботи) «Вибір матеріалу та технології отримання композитної пластини для легкого бронезахисту». Затверджена Наказом по університету від __7 квітня 2020 р. № 0513-III__

2. Термін здавання студентом закінченого проекту (роботи) __22.06.2020 року.

3. Вихідні дані проекту (роботи)

Розроблення несучої частини композитної бронепластини

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що їх потрібно розробити) _Характеристика та умови експлуатації бронепластини вимоги до матеріалів; Огляд літератури; Аналіз титанових сплавів і методів контролю властивостей; Обладнання для термічної обробки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Бронепластина елемент легкого бронезилета; Класифікація бронезилетів; Рівні захисту бронепластин; Матеріали та технології виготовлення бронепластин; Хімічний склад та властивості сплаву ВТ6, Фазова діаграма системи TiAl та TiVa; Етапи технології виробництва заготовки; Графік термічної обробки бронепластини; Мікроструктура сплаву ВТ6 на різних етапах термічної обробки; Обладнання для термообробки

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ пор.	Назва етапу дипломного проекту (роботи)	Термін виконання етапу проекту (роботи)	Примітка
1	РОЗДІЛ 1 Характеристика та умови експлуатації бронепластини. Вимоги до матеріалів	12.05.2020	
2	РОЗДІЛ 2 Огляд літератури	22.05.2020	
3	РОЗДІЛ 3 Аналіз титанових сплавів і методів контролю властивостей	25.05.2020	
4	РОЗДІЛ 4 Маршрутна технологія виготовлення бронепластини з титанового сплаву	29.05.2020	
5	РОЗДІЛ 5 Принцип роботи та схема вакуумної печі	03.06.2020	

6. Дата видачі завдання 7 квітня 2020 року.

Студент _____

(підпис)

Керівник проекту _____

(підпис)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра містить 72 сторінки, зокрема 7 таблиць, 42 рисунків, список із 19 використаних джерел на 2 сторінках та додатки.

Мета роботи – обрати матеріал, маршрутну технологію виготовлення заготовки та термічної обробки деталі бронепластина .

Методи досліджень: Металографічний аналіз сплавів, вимірювання твердості та ударної в'язкості.

Бронепластина використовується як основна стримуюча частина бронезилету. Вона закриває найбільш важливі внутрішні органи людини (серце, печінку тощо). Найбільш поширені форми плит - прямокутник, прямокутник із закругленими кутами та неправильний шестикутник. Матеріал для його виготовлення повинен мати високу твердість і високу ударну в'язкість для руйнування кулі та затримання осколків

У ході виконання кваліфікаційної роботи було обрано (сплав ВТ6), досліджено вплив легувальних елементів на мікроструктуру сплаву. Розроблена технологічна карта отримання титанового сплаву, механічної обробки напівфабрикатів, призначено режим термообробки. Вибрані методи контролю.

Ключові слова: БРОНЕПЛАСТИНА, КОМПОЗИТНІ МАТЕРІАЛИ, ТИТАНОВІ СПЛАВИ, СПЛАВ ВТ6, МЕТАЛУРГІЯ ТИТАНУ, МЕХАНІЧНА ОБРОБКА МЕТАЛІВ, МІКРОСТРУКТУРА, ТЕРМООБРОБКА, ВИПРОБУВАННЯ.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1 ХАРАКТЕРИСТИКА ТА УМОВИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ БРОНЕПЛАСТИНИ. ВИМОГИ ДО МАТЕРІАЛІВ	6
РОЗДІЛ 2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ.....	10
2.1 Керамічний бронезахист	10
2.1.1 Оксид алюмінію	11
2.1.2 Карбід і нітрид кремнію	12
2.1.3 Карбід бору	13
2.2 Композиційні матеріали.....	13
2.3 Металева броня	15
2.3.1 Сплави титану для виготовлення броні	16
2.3.1.1 Стандартна технологія отримання титанової бронепластины	17
2.3.1.2 Матеріали на основі титанових сплавів, що використовуються для 3Д друку.....	17
Висновок.....	19
РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ І МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ ВЛАСТИВОСТЕЙ.....	21
3.1 Способи отримання заготовок.....	21
3.1.1 Класифікація сплавів за способом отримання	21
3.1.2 Титанові деформовані сплави.....	21
3.1.3 Ливарні титанові сплави	23
3.1.4 Порошкові сплави титану	23
3.2 Загальна характеристика ВТб.....	24
3.3 Вплив домішок і легувальних елементів на властивості і структурититанових сплавів.	25
3.2 Способи контролю якості	32
3.2.1 Неруйнівні методи контролю	32
3.2.2 Руйнівні методи контролю.....	34
Висновок.....	35
РОЗДІЛ 4.....	36

МАРШРУТНА ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ БРОНЕПЛАСТИНИ З ТИТАНОВОГО СПЛАВУ	36
4.1 Металургія титану	36
4.2 Магнієтермічний спосіб	37
4.3 Термообробка бронепластины з ВТ6	50
Висновки	63
РОЗДІЛ 5 ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ	64
Висновок	65
ВИСНОВКИ	67
ЛІТЕРАТУРА	69
ДОДАТОК А	71
ДОДАТОК Г	72

ВСТУП

Захист особового складу був завжди пріоритетним завданням в будь-якому військовому конфлікті. З кожним роком військові технології йдуть вгору, покращується якість патронів, точність, потужність відповідно і бронезахист. Засоби індивідуального бронезахисту повинні бути такими, щоб у більшій мірі витримувати попадання куль та осколків куль рятуючи цим життя та здоров'я людини. Розробка ефективних засобів індивідуального бронезахисту є складним завданням зважаючи на велику кількість тактико-технічних вимог і чинників, які суперечать один одному, і впливають на бойову ефективність. Проектування виробів, призначених для захисту різних частин тіла людини в заданих умовах експлуатації, вимагає особливого підходу. Ці вироби повинні мати високі захисні властивості в залежності від умов використання і повністю відповідати комплексу вимог, що до них висуваються. Фізико-механічні характеристики та вага захисних елементів бронеодягу в залежності від засобу ураження відрізняється іноді в десятки разів.

Метою дослідження є вибір матеріалу та технології для отримання композитної бронепластики, яка буде спроможна витримувати влучання кулі (9 мм.) та осколків відповідно своєму класу захисту.

РОЗДІЛ 1 ХАРАКТЕРИСТИКА ТА УМОВИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ БРОНЕПЛАСТИНИ. ВИМОГИ ДО МАТЕРІАЛІВ

Класифікація бронежилетів представлена на рисунку 1.1. Складність вирішення проблем розроблення бронежилетів пов'язана з тим, що на даний час не існує науково-обґрунтованої методики кількісної оцінки показників фізико-механічних та інших характеристик. Відсутність конкретних критеріїв оцінки перешкоджає формулюванню технічних вимог до матеріалів, що використовуються у виготовленні бронежилетів та комплектуючих до них, а й відповідно й ефективних вітчизняних технологій їх виробництва[1].

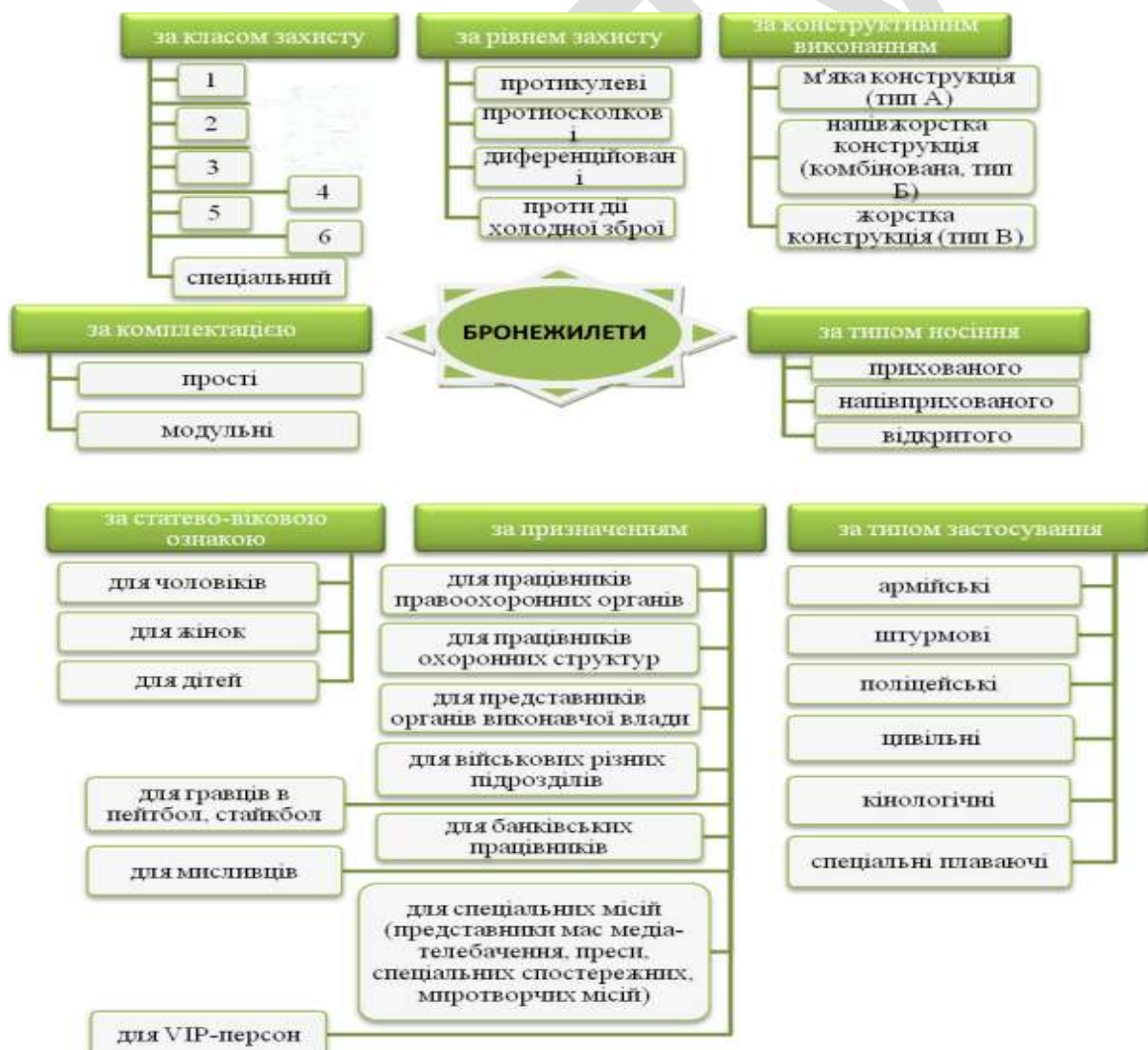


Рисунок 1.1 - Класифікація бронежилетів

Бронепластина використовується як основна стримуюча частина бронежилету. Цей елемент захисту може мати різну форму в залежності від способу виготовлення. Найбільш поширені форми плит - прямокутник, прямокутник із закругленими кутами та неправильним шестикутником. Крім того, бронепластини створюють плоскої та анатомічної форми. Типова форма бронепластини рисунок 1.2

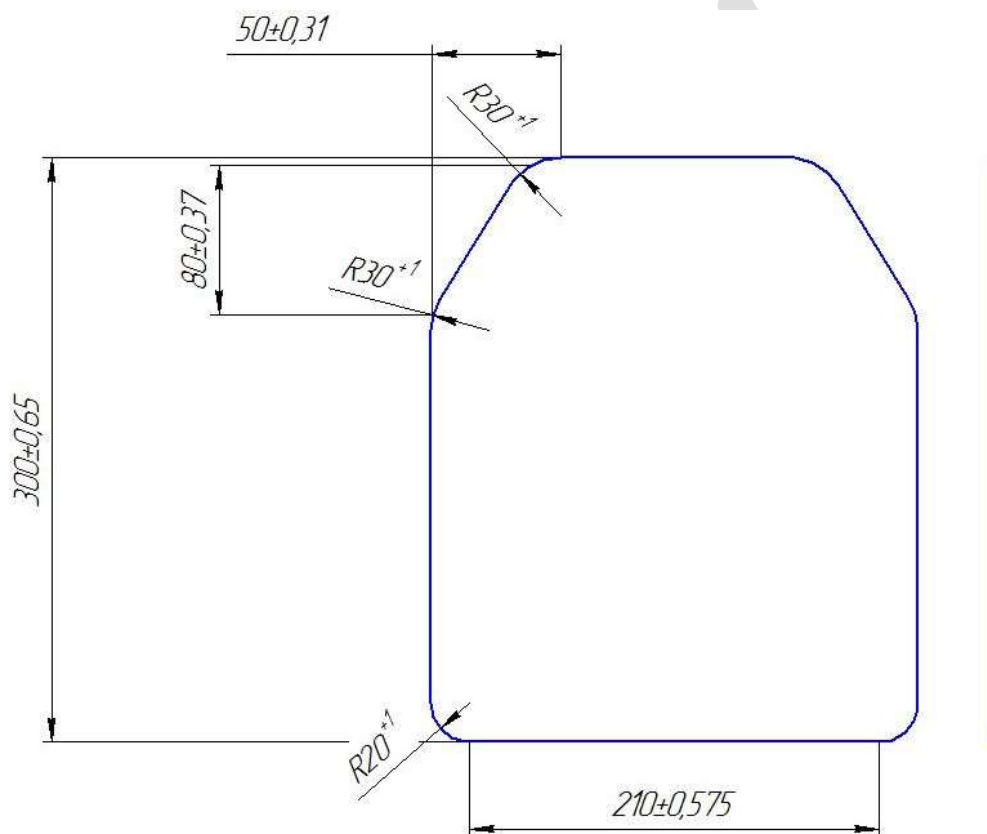


Рисунок 1.2 - Типова бронепластина

У виготовленні захисних бронепластин для куленепробивних жилетів використовують різні балістичні матеріали. Основні - це кевлар, поліетилен, кераміка та метал [1]. Здатність перевірити на якість бронепластину - постріл.

Броня призначена для зупинки кулі осколку чи колючих ударів. Однак, навіть, якщо засіб індивідуального захисту не пробито, ударник може нанести

травму або біомеханічний пошкодження. Сучасна індивідуальна броня повинна запобігати пробиття і нанесення серйозної травми, але не біомеханічного пошкодження тобто запреградной травми? що почали вивчати лише в самий останній час. Куля повинна бути або відображена, або зупинена, а її енергія розсіяна. Класифікація бронепластин по класах (рисунок 1.3)

Є межа енергії, яка може бути витримана тілом людини. Параметри людського тіла (вага, сила мускулатури, загальне здоров'я і вразливість різних частин тіла) варіюються досить сильно і погано піддаються стандартизації. Проблему травмування тулуба зупиненим (бронезилетом) ударником почали вивчати лише в останній час.

ДСТУ 8762:2018 / Рівень захисту бронепластинок					
Клас захисту	Назва зброї уразника	Тип та уніфікаційний код кулі	Маса кулі, г	Дистанція обстрілу, м	Швидкість кулі, м/с
I	9 × 18 мм, (9 mm Makarov)	ПС, (57-Н-181с)	5,5	5	335 ± 10
	9 × 19 мм, (9 mm Luger, 9 mm Parabellum, 9 × 19 mm)	FMJ RN SC	8,0	5	400 ± 10
II	7,62 × 25 мм, (7,62 × 25 Tokarev)	ПС, (57-Н-134с)	5,5	5	430 ± 15
III	5,45 × 39 мм, (5,45 × 39)	ПС, (7Н6)	3,4	10	910 ± 15
	7,62 × 39 мм, (7,62 × 39)	ПС, (57-Н-231)	7,9	10	730 ± 15
IV	5,45 × 39 мм, (5,45 × 39)	ЛП (7Н10)	3,6	10	910 ± 15
	7,62 × 34 мм, (7,62 × 34 R)	ЛПС (57-Н-323с)	9,6	10	850 ± 15
V	7,62 × 39 мм, (7,62 × 39)	БЗ (57-63-231)	7,4	10	745 ± 15
	7,62 × 34 мм, (7,62 × 34 R)	ЛПС (57-Н-323с)	9,6	10	850 ± 15
VI	7,62 × 34 мм, (7,62 × 34 R)	Б-32 (763-323)	10,4	10	860 ± 15

Рисунок 1.3 – Класифікація бронепластин по класах[2]

Бронепластини поділяються за розміром, рівнем захисту композитом геометричною формою. Також є приставки біля назви бронепласти ICW або STA.

STA та бронепластина яка працює по заявленому рівню захисту без додаткової підкладки сама по собі. Приставка ICW та бронепластина яка працює по заявленому рівню захисту в парі з додатковим м'яким балістичним

захистом. Ці бронеплити мають нижчу вагу ,як правило, це приблизно 10 – 15 відсотків таких самих плит, але типу STA ці бронеплити призначені для використання в армійських системах, тобто де і так по всій площині встановлений м'який балістичний захист. Якщо потрібна мобільність і використовується тільки плитоноска то бронеплита ICW не підходить тому що для неї буде необхідно додати м'який балістичний захист але такий композит буде важче аніж єдина плита типу STA.

РОЗДІЛ 2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Наявні на сьогоднішній день численні види бронежилетів, в т.ч. з керамічних матеріалів виготовляють переважно з штучної, а не природної сировини. Це пояснюється відсутністю природних матеріалів, що володіють потрібними властивостями, і складністю виробничих процесів, що вимагають, щоб властивості сировини задовольняли вельми суворим критеріям. В результаті часто виникає необхідність в добавках, наприклад, полімерних. Важливо мати на увазі, що розвиваються не тільки самі матеріали, а й технологія виробництва, концепція броні і області її застосування.

2.1 Керамічний бронезахист

Кінцеві властивості керамічного матеріалу для виготовлення бронепластин залежать від різних факторів. Наприклад, від тиску формування, ступеня спікання і наявності хімічного зв'язку між частками кераміки [3]. Щоб забезпечити високі і стабільні балістичні характеристики, процес повинен бути контрольованим. Процеси отримання керамік можна розділити на менш дорогі (металокераміка) і більш до дорогої (кераміка гарячого пресування). Використання дорогою кераміки виправдано, коли головним критерієм вибору матеріалу є можливість зниження ваги в розрахунку на одиницю поверхні (наприклад, карбід бору або карбід кремнію). Окис алюмінію можна використовувати, коли обмежуючим фактором виявляється вартість матеріалу, а не його вага. Тут буде короткий опис властивостей керамічних матеріалів, які знайшли широке застосування при виготовленні полегшеною броні. Перераховані нижче міркування вказують на деякі відмінності керамічних матеріалів.

2.1.1 Оксид алюмінію

До теперішнього часу кераміка з окису алюмінію (Al_2O_3) залишається найбільш популярним керамічним матеріалом, що пояснюється чудовим співвідношенням високих експлуатаційних властивостей і низької вартості (Рисунок 2.1) Керамічна окис алюмінію має хороші балістичні властивості. Її використовують як для захисту від куль малого калібру (5,56 мм), так і від снарядів великих калібрів (35-105 мм) [3]. Для поліпшення механічних властивостей кераміки в неї вводять певні добавки (наприклад, двоокис цирконію).

Таблиця 2.1

Властивості окису алюмінію [3]

Середня густина	г/см ³	3.6-3.9
Вміст окису алюмінію	%	90-99
Поглинання води	%	0
Твердість по Вікерсу	МПа	1200-1500
В'язкість руйнування	МПа м ^{1/2}	3-5
Міцність при вигинанні	МПа	330-380
Міцність при стисканні	МПа	≥2000
Модуль пружності	ГПа	270-370

Оксид алюмінію є найменш крихким і найдешевшим сучасним керамічним матеріалом, що важливо для більшості видів броні. Однак вона має серйозний недолік, що полягає в порівняно великій вазі. Її випускають у вигляді виробів різноманітної форми, а отримують її в основному методом пресування у формі або спікання.

2.1.2 Карбід і нітрид кремнію

Ці кераміки використовують все частіше, коли потрібно знизити вагу виробу. Середні значення механічних властивостей цих матеріалів наведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2

Властивості карбіду і нітриду кремнію [3]

Середня густина	г/см ³	3.1-3.3
Поглинання вологи	%	0
Твердість по Вікерсу	МПа	2000-2600
В'язкість руйнування	МПа м ^{1/2}	2-5
Міцність при вигинанні	МПа	≥350
Міцність при стисканні	МПа	≥2500
Модуль пружності	ГПа	380-450

Існує два основні методи отримання карбіду кремнію. У першому зв'язок частинок SiC досягається шляхом протікання хімічних реакцій [3]. Для цього порівняно крупнозернистий компактований порошок карбіду кремнію додають вуглець і метал, який у вакуумній печі плавиться. Часто замість металу використовують кремній, який реагує з вуглецем і утворюється SiC. Другий метод полягає в спіканні порошкоподібного SiC за допомогою неокисних добавок. Часто також використовують стандартні процеси формування кераміки, при яких температура спікання досягає 2000 ° C і вище. Випускають три основних типи нітриду кремнію: хімічно пов'язаний нітрид кремнію, нітрид кремнію гарячого пресування і спечений нітрид кремнію [3]. Хімічно зв'язаний нітрид кремнію виготовляють шляхом проведення хімічної реакції компактованого порошку кремнію та азоту.

Нітрид кремнію гарячого пресування і спечений нітрид кремнію мають кращі фізичні властивості, що дозволяє використовувати їх у випадках, що вимагають більш високих експлуатаційних характеристик. Як і кераміку з

окису алюмінію, нітрид кремнію випускають у вигляді виробів самої різної геометричної форми.

2.1.3 Карбід бору

Середні значення механічних властивостей карбиду бору наведені в (рисунку 2.3). По твердості карбід бору B_4C посідає третє місце серед усіх відомих людству матеріалів (після алмазу і нітриду бору з кубічної структурою кристалічної решітки) [3]. Цей матеріал має невелику вагу, але його недоліком є крихкість. Крім того, B_4C надзвичайно дорогий.

Таблиця 2.3

Властивості карбиду бору [3]

Середня густина	г/см ³	2.4-2.5
Вміст B_4C	%	90-99
Поглинання води	%	0
Твердість по Вікерсу	МПа	2800-3200
В'язкість руйнування	МПа м ^{1/2}	2.5-3
Міцність при вигинанні	МПа	400-420
Модуль пружності	ГПа	450

2.2 Композиційні матеріали

Композиційні матеріали (КМ) - багатокомпонентні матеріали, що складаються з суцільної основи (матриці, сполучного) і дискретного армованого матеріалу [4]. Шляхом підбору складу і властивостей армованого матеріалу і сполучного отримують композиційні матеріали з необхідним поєднанням фізико-механічних, експлуатаційних і технологічних властивостей. Зазвичай армувальний матеріал визначає властивості міцності КМ, а матриця забезпечує монолітність матеріалу і його здвигову міцність перетворює дискретний армуючий матеріал в єдину механічну систему, сприяє рівномірному розподілу напружень. За структурою композиційні матеріали діляться на кілька основних класів: волокнисті (армовані

волокнами, нитками, ниткоподібними кристалами), шаруваті (армовані шарами тканини, плівками, платівками та іншими шаруватими матеріалами), дисперсно-зміцнені (армовані матеріалами у вигляді дисперсних частинок з розмірами 0,1 ... 100 мкм) і наноккомпозити [4]. До їхнього складу входять наночастинки розмірами 10 ... 100 нм). У захисних структурах ЗІБ застосовують всі перераховані класи КМ.

Але найбільшого поширення набули КМ, у яких в якості зв'язувальної речовини використовуються полімерні матеріали, а в якості армувального матеріалу - нитки, джгути, тканини або неткані шаруваті структури з синтетичних високомодульних високоміцних парарамідних або поліетиленових волокон. Такі КМ відносяться до групи волокнистих або шаруватих КМ, скорочено їх називають органопластиками. Органопластики застосовуються для виготовлення шоломів і енергоємних жорстких підкладок комбінованої, наприклад, кераміко-органопластикової багатошарової броні. Броня з керамічним облицюванням і гнучкою підкладкою. Така є броня виробляється на основі існуючих протибалістичних матеріалів, причому вона має зв'язок кераміки з підкладкою. Це дозволяє досягти найкращого співвідношення між вагою, рівнем захисту, стійкістю до множинних влучень, а також собівартістю [4]. Керамічне облицювання роблять з безлічі керамічних пластин, що лежать на гнучкій прокладці, під якою розташовується підкладка з арамідних, поліетиленових або скляних волокон, але може бути і металева структура зі сталі або алюмінію чи титану. Поліпшення властивостей волокон і кераміки має прокласти шлях до нових розробок і подальшого підвищення ефективності гнучкою броні. Броня повинна ловити кулю і зменшити травматичні наслідки. Здатність волокнистих композиційних матеріалів переробляти цю задачу залежить від безлічі факторів, наприклад, типу волокон, концентрації матриць і структури матеріалів [4]. Технологія виробництва залежить від усіх цих факторів і від технологічних вимог.

2.3 Металева броня

Сталь сьогодні є найпоширенішим матеріалом, який використовують. Металева броня як клас охоплює броньовані сталі, високоміцні алюмінієві й титанові сплави. Найширше використовують сталеву броню. За її допомогою можна забезпечити захист аж до п'ятого класу за товщини бронеелемента 5,0–6,5 мм, що відповідає поверхневій густині 39–51 кг/м² [4]. Більші товщини сталевих бронееlementів недопустимі через їхню надто велику масу.

Бронесталь - це спеціальна сталь підвищеної твердості[4]. Існує дуже багато різних видів бронесталі з різними показниками в'язкості, твердості і іншими якостями. Для здешевлення і для захисту від пістолетних куль можна використовувати певні види конструкційних сталей. Наприклад, у воєнний час коли немає броні і необхідно виготовити бронезахист можна використовувати і звичайну сталь, але звичайно її товщина буде приблизно в 2-2,5 рази більше, ніж у високоякісної броні. Проте свою задачу вона виконає.

Серед металів більше використовують сталь і титан. Броньові пластини зі сталі й титану використовують у бронезилетах 4-5 класів захисту [4]. Вони вирізняються високою стійкістю і можуть витримувати багатократні влучання. Виробництво бронезилетів зі сталевими елементами відносно дешеве, проте вони доводять масу бронезилета до 8-10 кг і не рятують від заперешкодної дії кулі (навіть якщо бронезилет не пробито, куля однаково завдає надпотужний удар по людському тілу), тому бронезилет з металевими пластинами рідко, коли може врятувати від пострілу рушницею. В перспективі розглядається зменшення ваги та поліпшення захисних якостей легких класів у разі їх виготовлення з металевої піни. У засобах індивідуального захисту застосовують протикульові броньовані сталі високої твердості, у яких як легувальні елементи можна використовувати хром, нікель, молібден, ванадій, кремній [4]. Складність створення таких сталей зумовлена необхідністю поєднання екстремально високих значень твердості й міцності, які забезпечують опір проникненню кулі, і достатнього рівня пластичності та

в'язкості для запобігання крихкому руйнуванню сталевого броньованого елемента. Як високотверді крихкі, так і в'язкі пластичні сталі, для яких характерна невисока твердість, мають низьку протикульову стійкість. Кульову стійкість броньованої сталі можна підвищити, збільшивши її твердість. Однак у разі достатньо великої твердості перешкоди з гомогенної вуглецевої броньованої сталі вона стає крихкою і під час обстрілювання навіть звичайними сталевими кулями зазнає ураження за типом пролomu чи розколювання. Для того щоб уникнути цього, необхідно зберегти пластичність сталі. Одним із можливих способів підвищення кульової стійкості є створення біметалевої броні з зовнішнім високотвердим шаром і внутрішнім в'язким шаром. Таку броню можна отримати, наприклад, способом зварювання вибухом, пакетним прокатуванням чи ін.[4]

Основний плюс сталі є надзвичайно дешевизна. Також металеві бронепластили витримують декілька десятків пострілів без руйнування, на відміну від керамічних.

2.3.1 Сплави титану для виготовлення броні

Титан має низьку щільність, але твердий як залізо. Через свою велику вартість, його використовують у сфері де вага має великий вплив, наприклад персональні обладунки.

Одним із перспективних напрямків розвитку засобів індивідуального бронезахисту є вдосконалення бронепластин на основі титану за рахунок використання високотвердих інтерметалідних сполук – алюмініду титану. Випробування бронепластин на основі високотвердого інтерметаліду – алюмініду титану показали ефективність їх використання для виготовлення засобів індивідуального бронезахисту. Актуальними є подальші дослідження, спрямовані на розроблення шаруватих бронепластин на основі титану та алюмінію, в яких будуть чергуватися високотверді шари інтерметаліду алюмініду титану з м'якими шарами з алюмінію[7].

2.3.1.1 Стандартна технологія отримання титанової бронепластины

Стандартна технологія отримання титанових бронеластин є найпоширенішою. Дана технологія включає в себе етапи механічної і термічної обробки. Отримується титан за допомогою магнієтермічного способу. Спочатку отримується титановий сплав у вакуумнодуговій печі для плавки титану, що унеможливорює окислення та насичення воднем титанового сплаву, далі йде обробка тиском – прокатування, штампування [4].

Обробка тиском в спосіб прокатування титанового сплаву забезпечує дрібнозернисту мікроструктуру, яка дає добрі міцнісні характеристики бронепластины також впливає на однорідність матеріалу. Вид напівфабрикату - лист, при отриманні пластины застосовуються вирубні штампи, що дозволяє пришвидшити процес виготовлення при масовому виробництві.

Ця технологія на даний час при сучасному виробництві є однією з найдешевших.

2.3.1.2 Матеріали на основі титанових сплавів, що використовуються для 3D друку

Для виготовлення бронеластин можна застосовувати адитивні технології (3D-друк) — одна з форм технологій адитивного виробництва, де тривимірний об'єкт створюється шляхом накладання послідовних шарів матеріалу (друку, вирощування) за даними цифрової моделі [5]. Друк здійснюється спеціальним пристроєм — 3D-принтером, який забезпечує створення фізичного об'єкта шляхом послідовного накладання пластичного матеріалу на основі віртуальної 3D-моделі.

Метод друк лазером на порошок - селективне лазерне спікання — об'єкт формується з плавкого порошкового матеріалу (пластик, метал) шляхом його плавлення під дією лазерного випромінювання [5]. Порошкоподібний матеріал наноситься на платформу тонким рівномірним шаром (зазвичай спеціальним вирівнювальним валиком), після чого лазерне випромінювання формує на поверхні поточний шар об'єкта, що

виготовляється. Потім платформа опускається на товщину одного шару, і на неї знову наноситься порошкоподібний матеріал. Застосовується для швидкого прототипування, тобто швидкого виготовлення прототипів моделей і об'єктів для подальшого доведення. Вже на етапі проектування можна кардинальним чином змінити конструкцію вузла або об'єкта в цілому [6]. У інженерії такий підхід здатний істотно знизити витрати у виробництві та освоєнні нової продукції.

Дана технологія також придатна для швидкого виробництва — виготовлення готових деталей з матеріалів, підтримуваних 3D-принтерами. Це відмінне рішення для випуску малосерійної продукції, виготовлення моделей і форм для ливарного виробництва.

Для друку титаном на 3D принтері застосовують технологія адитивного виробництва металевих виробів, відому як пряме лазерне спікання металів (DMLS): тонкий шар металу у вигляді дрібного порошку подається на нагрівальний стіл в той час, як потужний вуглекислотний лазер спікають частки металевого порошку між собою і з попереднім шаром. При такому процесі друківані шари титану можуть досягати 20-40 мкм, а самі готові вироби не будуть відрізнятися звичним хромованим блиском, який часто асоціюється з титаном [6].

Метод друку дротом FDM (Fused deposition modeling) - моделювання методом пошарового наплавлення, популярна технологія адитивного виробництва [6]. Застосовується для створення тривимірних моделей, макетів, виробів до яких не пред'являються особливі вимоги до якості поверхні і точності виготовлення.

Цей метод є значно дешевший ніж друк лазером Також ця технологія зменшує час виконання замовлення, оперативно вирішуючи питання ремонту чи заміни зношених деталей. На відміну від технологій друку порошковими методами, технологія X-Beam за сировину використовує титановий дріт. Ця сировина, значно здешевлює процес та є більш безпечною у використанні, адже титанові та алюмінієві порошки – вибухонебезпечні. Також

використання проволочи із титану дозволяє не обмежувати в розмірі кінцевий виріб. Порошкову деталь неможливо надрукувати більше метрового розміру. Як правило, деталь надрукована порошковим друком, обмежена в розмірі до 500-600 мм, максимум. Друга проблема порошкового друку – продуктивність. Таким методом друку неможливо підвищити потужність енергії, гармат, лазерів, бо інакше порушиться точність друку і властивості матеріалів [6]. Міцність виробу, який надрукований завдяки плавленню проволочи, вища порівняно із порошковим друком. Справа в тому, що найкращі виробники порошкового методу друку гарантовано можуть забезпечити густину металу 99,9% [6]. Це значить, що в кожному кубічному сантиметрі такої деталі буде отвір розміром в один кубічний міліметр або тисяча дірочок розміром із піщинку. З точки зору реального виробництва – це решето. Тому такі деталі проходять газостатичне пресування і кілька етапів термообробки, щоб наблизити виріб до потрібних стандартів.

При друці дротом він плавиться лазерною гарматою і кожен шар металу наноситься на попередній розплавлений шар. Фактично відбувається мікроплавка металу при цьому чітке дотримання технології дозволяє запобігти виникненню дефектів всередині виробу, а також дає можливість отримати значно кращу структуру.

Загалом можна зробити висновок, що дані технології застосовуються для деталей складних форм, а не як у нашому випадку проста форма плити, значно швидше її можна буде виготовити за стандартною технологією магністермічного способу.

Висновок

Проаналізувавши матеріали балістичного захисту можна зробити такий висновок: ідеального бронематеріалу не існує. Будь-який матеріал, керамічний або волокнистий, має свої недоліки, які доводиться долати за рахунок використання інших матеріалів:

Арамідні волокна дозволяють домогтися компромісу між вагою і собівартістю, але не в змозі забезпечити захист від високошвидкісних куль зі свинцевою серцевиною але слабкі до зовнішнього впливу навколишнього середовища. Сонячна радіація з часом зменшує міцнісні властивості волокон. Також кевлар втрачає міцність під час намокання.

Кераміка під час влучання кулі здатна поглинати її енергію та зменшувати її дію, але при цьому вона виходить з ладу. Такі бронежилети вважають одноразовими.

Поліетеленові волокна в свою чергу погано витримують високі температури. У зв'язку з цим широкого впровадження для засобів індивідуального захисту набули бронепластины, зроблені з високоміцних титанових сплавів, оскільки вони здатні забезпечувати достатній рівень протикульової стійкості і дозволяють знизити вагу виробу на 15–20 % у порівнянні зі сталевими бронежилетами.

Традиційна технологія виготовлення заготовок з титанових сплавів включає в себе усі операції, які впливають на збільшення міцності, а саме: прокатування, штампування, кування, термообробку. Це дозволяє за мінімальної вартості отримати матеріал з високими показниками міцності і малою вагою.

Титанова пластина буде слугувати основою композиційної бронепластины – на ній можна нашаровувати інші матеріали для забезпечення комплексного захисту.

РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ І МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ ВЛАСТИВОСТЕЙ

3.1 Способи отримання заготовок

За механічними характеристиками титанові сплави поділяють на маломіцні (високопластичні), середньої міцності та високоміцні а за фізико-хімічними властивостями на жароміцні і корозійностійкі. За технологічною ознакою титанові сплави поділяють на деформівні, ливарні, та порошкові [13].

3.1.1 Класифікація сплавів за способом отримання

За рівноважною структурою (після відпалювання) титанові сплави поділяють на такі основні групи: α -сплави, псевдо α -сплави ($\alpha+\beta$)-сплави (двофазні) та β -сплави, псевдо β -сплави. Сплави першої групи (α -сплави) малопластичні, псевдо α -сплави можуть загартовуватись з утворенням титанового мартенситу, як твердого розчину легувальних елементів в α -титані а група (β -сплавів) найпластичніші, але мають меншу міцність. Найкращий комплекс механічних і технологічних властивостей мають двофазні ($\alpha+\beta$)-сплави. Вони є міцнішими, ніж однофазні, добре куються і штампуються, піддаються термічній обробці. Тому, як конструкційний матеріал, переважно застосовуються двофазні ($\alpha+\beta$)-сплави [13]. Псевдо- β -титанові сплави характеризуються, високою пластичністю у загартованому стані та високою міцністю після старіння.

3.1.2 Титанові деформовані сплави

Більшість титанових сплавів конструкційного призначення легують алюмінієм, який підвищує їх жорсткість, міцність, жароміцність і жаротривкість, а також знижує щільність. Механічні властивості титанових сплавів поліпшують термомеханічною обробкою.

Термічною обробкою α -титанові сплави (BT1-00, BT1-1, BT5, BT5-1) не зміцнюються. Їх зміцнення досягається легуванням твердого розчину і пластичним деформуванням. До цієї групи належить сплав BT5-1, який має добру зварність, жароміцність, кислотостійкість, пластичність при низьких

температурах, термічну стабільність за температур до 450 °С. До складу цього сплаву входять ~5%Al і ~2,5%Sn [13]. Олово додають у сплав для поліпшення його технологічних і механічних властивостей. Механічні властивості даного сплаву: $\sigma_s=800\dots1000$ МПа, $\delta=10\dots15\%$ [13]. Зі сплаву *BT5-1* виготовляють листи, поковки, труби, дрiт, профiлi.

Псевдо- α -сплави (*OT4-0*, *OT4-1*, *OT4-2*, *BT18*, *BT20*) можуть загартовуватись з утворенням титанового мартенситу, як твердого розчину легувальних елементів в α -титані. Мартенсит у псевдо- α -сплавах має невеликий ступiнь пересичення. Змiцнення сплаву при цьому є незначним.

Двофазні ($\alpha+\beta$)-сплави (мартенситного класу: *BT6*, *BT3-1*, *BT8*, *BT9*, *BT14*, *BT16*, *BT23*, *BT 33*, перехiдного класу: *BT22*, *BT30*) змiцнюються термічною обробкою, що складається з гартування і старіння. Їх зварюваність гiрша, ніж α -сплавiв. Типовим представником цієї групи є сплав *BT6*, який характеризується оптимальним поєднанням технологічних і механічних властивостей. Хiмiчний склад сплаву *BT6*: ~6%Al, ~4%V, решта Ti, механічні властивості: $\sigma_s=1100\dots1250$ МПа, $\delta=6\%$ [13].

До двофазних сплавiв належить жаромiцний сплав *BT8*, який призначений для довготривалої роботи за температур 450...500 °С під навантаженням. Хiмiчний склад сплаву *BT8*: ~6,4%Al, ~3,1%Mg, ~3%Si, механічні властивості: $\sigma_s=1000\dots1250$ МПа, $\delta=9\dots11\%$ [13].

Титанові β -сплави за усiх температур мають структуру β -фази. Термічним обробленням не змiцнюються.

Псевдо- β -титанові сплави (*BT15*, *BT32*) характеризуються високим вiстом β -стабiлізаторiв, високою пластичністю у загартованому стані та високою мiцністю після старіння. При загартуванні псевдо β -сплавiв фiксується метастабiльна β' -фаза. При старінні з β' видiляється дрiбнодисперсна α -фаза, яка суттєво підвищує мiцність і твердість сплаву. До цієї групи належить сплав *BT15*, який має високу пластичність ($\delta=20\%$) і вiдносно невисоку мiцність ($\sigma_s=900$ МПа) у загартованому стані. Однак після старіння при 450 С його мiцність підвищується до $\sigma_s=1500$ МПа при

пластичності $\delta=6\%$. Сплав *BT15* поставляється у вигляді прутків, поковок, листів, штаб. Хімічний склад сплаву *BT15*: $\sim 3\% \text{Al}$, $\sim 8\% \text{Mo}$, $\sim 11\% \text{Cr}$ [13].

3.1.3 Ливарні титанові сплави

Ливарні сплави у порівнянні зі сплавами, що деформуються, мають нижчу міцність, пластичність і витривалість, але є дешевшими. Їх склад аналогічний складу сплавів, що деформуються, тільки наприкінці марки ливарних сплавів ставлять літеру *Л*, наприклад, *BT5Л*, *BT14Л*.

3.1.4 Порошкові сплави титану

Порошкові сплави отримують методом порошкової металургії, що забезпечує зниження їх вартості приблизно на 50% і підвищення продуктивності виготовлення виробів у два рази [13]. Технологія отримання виробів методом порошкової металургії заснована на холодному формоутворенні деталі або заготовки шляхом пресування та подальшого високотемпературного синтезу у вакуумі. Дана технологія дає можливість отримувати вироби з титанових сплавів та інших конструкційних матеріалів з високим рівнем фізичних та механічних властивостей, що відповідають стандартним сплавам.

Сама технологія синтезу методом порошкової металургії забезпечує максимальний коефіцієнт використання матеріалу (понад 0,95) та високу технологічність, що відповідає масовому виробництву з великим ступенем автоматизації. Технологічний процес забезпечує можливість варіювання якістю порошоків та їх фракційним, хімічним складом, вмістом кисню, азоту, заліза, нікелю, магнію, алюмінію, ванадію, а також отримання високоякісних порошоків необхідного гранулометричного складу (40-100 мкм) для адитивних технологій, синтезу виробів методами порошкової металургії, наплавлення, напилення [6].

3.2 Загальна характеристика VT6

З проведеного аналізу було зроблено висновок що для виготовлення високоміцних деталей найбільше підходять ($\alpha+\beta$)-сплави мартенситного класу: *VT6, VT3-1, VT8, VT9, VT14, VT16, VT23, VT 33*, перехідного класу: *VT22, VT30*) зміцнюються термічною обробкою, що складається із гартування і старіння. Типовим представником цієї групи є сплав *VT6*, який характеризується оптимальним поєднанням технологічних і механічних властивостей.

VT6 універсальний по застосуванню титановий деформований сплав, з якого отримують всі види полуфабрикатів. VT6 відноситься до двофазним ($\alpha + \beta$) -сплавом мартенситного класу з невеликим вмістом β -фази, наявність якої обумовлює їх здатність до термічній обробці. Сплав легований алюмінієм в кількості 5,3 - 6,8 мас.% і ванадієм в кількості 3,5 - 5,3 мас.%.

Таблиця 3.1

Хімічний склад, % сплаву VT6 [25]

Fe	C	Si	V	N	Ti	Al	Zr	O	H
0.3	0,1	0,15	3,5 - 5,3	0,05	86,485 - 91,2	5,3 - 6,8	0,3	0,2	0,015

Таблиця 3.2

Механічні властивості [25]

Механічні властивості сплаву VT6 при T=20°C							
Прокат	Розмір	Напр.	σ_b (МПа)	σ_T (МПа)	δ_5 (%)	ψ %	КСУ (кДж / м ²)
Пруток			900-1100		8-20	20-45	400
Пруток			1100-1250		6	20	300
Штамповка			950-1100		10-13	35-60	400-800

Фізичні властивості

Фізичні властивості сплаву ВТ6						
T (Град)	E 10^{-5} (МПа)	a 10^6 (1/Град)	l (Вт/(м·град))	r (кг/м ³)	C (Дж/(кг·град))	R 10^9 (Ом·м)
20	1.15		8.37	4430		1600
100		8.4	9.21			1820
200		8.7	10.88		0.586	2020
300		9	11.7		0.67	2120
400		10	12.56		0.712	2140
500			13.82		0.795	
600			15.49		0.879	

3.3 Вплив домішок і легувальних елементів на властивості і структурититанових сплавів.

Будь який сплав містить окрім навмисно доданих легувальних елементів певну кількість хімічних елементів що потрапляють в процесі металургії – це елементи-домішки.

Кисень і азот - домішки впровадження - сильно знижують пластичність титану, але підвищують міцності, що пояснюють взаємодією розчинених атомів цих елементів з дислокаціями. Азот впливає сильніше на міцність в порівнянні з киснем тому, що енергія взаємодії атомів азоту з дислокаціями в титані більше, ніж атомів кисню.

На властивості міцності титану домішка впровадження - вуглець - надає менший вплив, ніж кисень і азот. У той же час, якщо концентрація вуглецю перевищує межа розчинності (0,5%), то вуглець значно знижує пластичність титана через виділення карбідів.

Водень відноситься до числа найбільш шкідливих домішок впровадження в титані та його сплавах, так як викликає водневу крихкість, яка полягає в різкому зниженні механічних властивостей. Водень порівняно мало впливає на механічні властивості металів при статичних випробуваннях на розтягнення зі стандартними швидкостями деформації. Про схильність титану

і його сплавів до водневої крихкості зазвичай судять за результатами випробувань на ударну в'язкість і уповільнене руйнування.

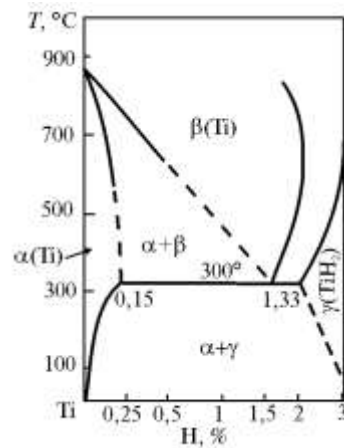


Рисунок 3.1— Фазова діаграма системи Ti-H [13]

Водень розширює область існування β -фази і звужує область α -фази (рис. 3.1). При температурі 300°C відбувається евтектоїдний розпад β -фази на α -фазу і гідрид титану γ (твердий γ -розчин на основі TiH_3). Концентрація водню в евтектоїдній точці дорівнює 1,33%. Розчинність водню в α -титані при евтектоїдній температурі доволі велика $\sim 0,18\%$, але з пониженням температури різко зменшується і становить $\sim 0,002\%$ при кімнатній температурі. Тому при невеликій кількості водню в титановій структурі з'являються виділення гідридної фази, яка є причиною крихкості. Пластинчаста форма виділень цієї фази значно знижує ударну в'язкість титану. Руйнування поширюється по поверхні розділу між гідридною фазою і матрицею. Виникнення і поширення тріщин вздовж гідридів полегшується внутрішніми розтягувальними напруженнями, які виникають через різницю питомих обсягів гідридів і основного металу, а також через слабе зчеплення між ними.

Алюміній збільшує розчинність водню в α -фазі і ускладнює утворення гідридної фази, тому збільшення вмісту алюмінію в α -титанових сплавах – ефективний спосіб зменшення їх схильності до водневої крихкості. Вміст розглянутих домішок в титані обмежують до приблизно 0,15-0,2%O, 0,1% C і 0,015% H. Залізо і кремній як домішки заміщення надають значно менший

вплив на властивості титану, ніж домішки впровадження. При малих концентраціях вони майже не впливають на його пластичність. У ряді випадків їх спеціально вводять в титанові сплави як легуючі елементи для підвищення жароміцності. Всі легуючі елементи, що вводяться в титанові сплави, в залежності від їх впливу на температуру поліморфного перетворення ($T_{\text{ПП}}$), поділяють на три групи [13]:

- α - стабілізатори, тобто елементи, що підвищують температуру $\alpha \rightarrow \beta$ -перетворення. До них відносяться алюміній, галій, індій, вуглець, кисень і азот.
- β -стабілізатори, тобто елементи, що знижують температуру $\alpha \rightarrow \beta$ -перетворення. Ці елементи можна поділити: - на ізоморфні β -стабілізатори (β_i , -стабілізатори). До їх числа відносяться ОЦК Metали - ванадій, ніобій, тантал, вольфрам і молібден. У сплавах титану з цими елементами твердий β -розчин може зберігатися до кімнатної температури, що не зазнаючи евтектоїдного розпаду.
- на евтектоїдоутворювальні β -стабілізатори (β_e -стабілізатори). До їх числа відносяться кремній, хром, марганець, залізо, мідь, нікель, кобальт і водень. У сплавах титану з цими елементами при досить низькій температурі відбувається евтектоїдний розпад β -фази по реакції $\beta \rightarrow \alpha + \gamma$ де γ - проміжні фази Ti_5Si_3 , TiCr_2 , TiMn , TiFe , та ін.

Так як β -стабілізатори знижують температуру поліморфного перетворення, то до легуванню ними жароміцних сплавів треба ставитися з обережністю, щоб не знижувалися робочі температури. Наявність β_e -стабілізаторів в сплавах, які працюють при підвищених температурах, може привести до евтектоїдного розпаду β_e -фази, що викличе різке зниження пластичності.

Нейтральні зміцнювачі, тобто елементи, мало впливають на температуру поліморфних перетворення в титані, але помітно його зміцнюючи. До них відносяться олово, цирконій, германій, гафній і торій.

Алюміній - найважливіший легуювальний елемент в титанових сплавах, стабілізує α -фазу і присутній в більшості промислових титанових сплавів в кількісних від 1,5-2% до 66,5%. При більш високому вмісті алюмінію можливо виникнення проміжної фази α_2 (Ti_3Al , має ГПУ ґратку), яка їх окрихчується і викликає втрату термічної стабільності при утриманні $> 6-8\%$ Al.

Алюміній ефективно зміцнює α -Ti при кімнатній і підвищеній температурах, знижує щільність титанових сплавів і підвищує їх опір окисленню. Розчинність алюмінію в Ti зменшується з пониженням температури і є 10, 9 і 7% при температурах 900, 800 і 600 ° C відповідно.

При введенні алюмінію і нейтральних зміцнювачів в багатокомпонентні титанові сплави поліпшуються механічні властивості і змінюється фазовий склад з появою упорядкованої фази α_2 (Ti_3Al). Оцінку впливу даних легуючих елементів проводять за допомогою еквівалента по алюмінію ($[Al]_{екв}$). Через подвійний вплив ввідних елементів визначають два еквівалента по алюмінію: міцнісний ($[Al]_{екв}^{стр}$) і структурний ($[Al]_{екв}^{стр}$). В першому з них α -стабілізатори і нейтральні зміцнювачі співставляються по викликаємому ними розчинному зміцненню α -фази.

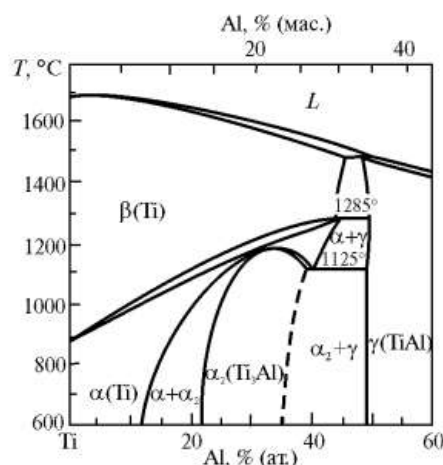


Рисунок 3.2 — Фазова діаграма системи титан - алюміній

Введення в титан 1 % алюмінію, олова, цирконію, кисню, кремнію, вуглецю і азоту підвищує часовий опір на розрив на 60, 30, 20, 1250, 200, 700, 2000 МПа відповідно.

Вміст азоту і вуглецю в усіх титанових сплавах приблизно однаково, і їх вплив можна не враховувати. Тоді еквівалент легуючих елементів по алюмінію буде дорівнює [13]

$$[Al]_{\text{екв}}^{\text{пр}} = (Al + Sn/2 + Zr/3 + 20 \cdot O + 3,3 \cdot 81, \%)$$

Фаза α_2 з'являється в сплавах системи Ti - Al з концентрацією - 9%, і її негативний вплив позначається при проведенні технологічних процесів виробництва сплавів при температурах 500-550 ° С. Олово і цирконій змішують цю концентрацію до менших змістів алюмінію, причому дія 1% Al еквівалентно 3%Sn 6% Zr, а вплив кисню на термічну стабільність в 10 разів перевищує дію алюмінію:

$$[Al]_{\text{екв}}^{\text{стр}} = (Al + Sn/3 + Zr/6 + 10 \cdot O), \%$$

Якщо $[Al]_{\text{екв}}^{\text{стр}} \leq 9\%$, то фаза α_2 не утворюється в тих кількостях, які надають різко негативний вплив на пластичність титанових сплавів.

Двома наступними за важливістю легуючими елементами є ванадій і молібден. Додавання ванадію різко знижує температуру поліморфного перетворення, і при утриманні в сплаві більше 15% V загартуванням можна повністю зафіксувати при кімнатній температурі β -фазу.

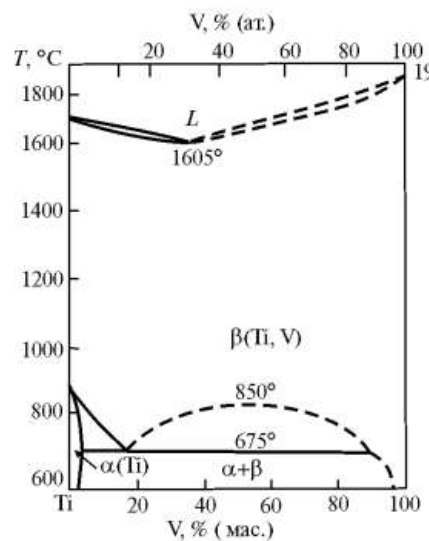


Рисунок 3.3. — Фазова діаграма системи Ti–V

Особливість даної системи - велика розчинність ванадію в α -Ti (більше 3%). Подальше збільшення кількості ванадію приведе до появи в структурі β -фази. Це дасть можливість створювати сплави з підвищеною технологічною пластичністю, зміцнювальні термічною обробкою. Відсутність в даній системі евтектоїдних реакцій і інтерметалідних фаз майже повністю виключає виникнення крихкості при будь-яких помилках в проведенні технологічних процесів, пов'язаних з нагріванням. Дуже вузький інтервал кристалізації дозволяє застосовувати сплави системи Ti \ V для фасонного лиття.

Молибден - один з основних легувальних елементів більшості титанових сплавів. Розчинність його в α -Ti не перевищує 1%, а β -стабілізуючий ефект являється максимальним. Для фіксації однофазної β -структури загартуванням досить мати в сплаві 11% Mo. Його введення ефективно підвищує температуру рекристалізації, міцність сплавів при кімнатній і підвищених температурах, забезпечує інтенсивне розчинне зміцнення - помітно підвищує модулі пружності α -Ti що означає підвищення сил міжатомного зв'язку.

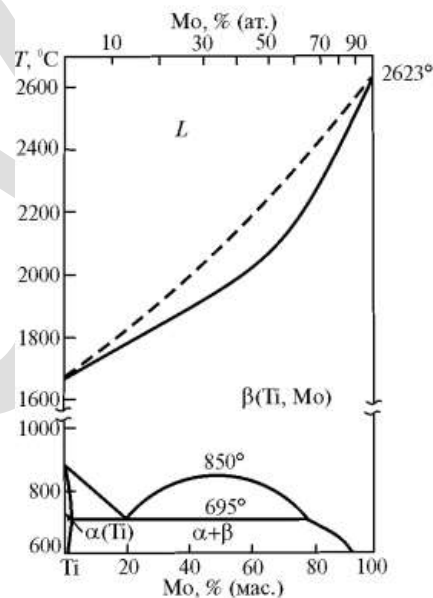


Рисунок 3.4 — Фазова діаграма системи Ti–Mo [13]

Для опису титанових сплавів також застосовують поняття молибденового еквівалента ($[Mo]_{\text{екв}}$) приймаючи, що дія всіх β -стабілізатор

можна висловити еквівалентним з триманням молібдену, при якому кількість β -фази, її стабільність, здатність до перетворення в подвійному сплаві Ti-Mo будуть такими ж, як і в розглянутому багатокомпонентному сплаві.

Введенню 1 % Mo відповідає, %: 4 Ta; 3,3 Nb; 2,0 W; 1,4 V; 0,6 Cr; 0,6 Mn; 0,5 Fe; 0,8 Ni. При оцінці молібденового еквівалента складнолегованого сплаву дію різних β -стабілізаторів вважають адитивним, а впливом α -стабілізаторів і нейтральних зміцнювачів нехтують. Таким чином:

$$[\text{Mo}]_{\text{екв}} = (\text{Mo} + \text{Ta}/4 + \text{Nb}/3,3 + \text{W}/2 + \text{V}/1,4 + \text{Cr}/0,6 + \text{Mn}/0,6 + \text{Fe}/0,5 + \text{Ni}/0,8), \%$$

Потрійна система Ti-Al-V є основою більшості високоміцних титанових сплавів, а система Ti-Al-Mo - жароміцних титанових сплавів. Більшість сучасних титанових сплавів відповідно до наміченої тенденцією багатокомпонентного легування містять одночасно алюміній, ванадій і молібден.

Легування хромом забезпечує в сплавах високу міцність при хорошій пластичності і ефективність термічної обробки, але тільки при додаванні молібдену. Це пов'язано з тим, що в системі T-Cr при температурі 667 ° C проходить нонваріантне евтектоїдне перетворення $\beta \rightarrow \alpha + \text{TiCr}_2$ (рис.3.5) і утворене з'єднання TiCr_2 , знижує пластичність сплаву, а ввідний молібден може загальмувати евтектоїдне перетворення.

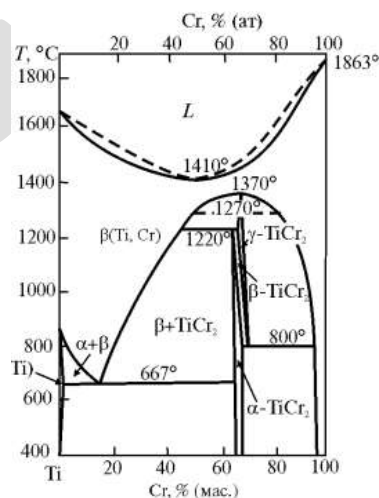


Рисунок 3.5. — Фазова діаграма системи Ti-Cr

Введення олова слабо впливає на температуру поліморфного перетворення титану, але суттєво підвищує технологічність сплавів при холодній деформації і збільшує ефект старіння, що обумовлено зміцненням α -фази. в Паладій і платину додають до чистого титану для підвищення його стійкості в сильних у корозійних середовищах, зокрема в мінеральних кислотах.

Евтектоїдних перетворень $\beta \rightarrow \alpha + \gamma$ в титанових сплавах при звичайних швидкостях охолодження взагалі не відбувається, і аналіз формування структури в сплавах з β_e - евектоїдоутворювальними стабілізаторами можна проводити, використовуючи діаграму на рис. 3.6.

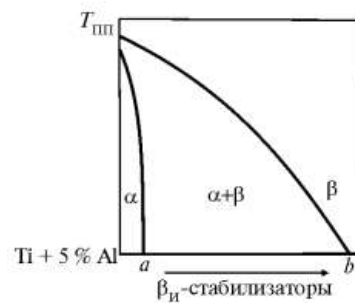


Рисунок 3.6. — Схема фазової діаграми системи Ti+5 % Al– β и стабілізатори

Так як в титанових сплавах завжди присутній алюміній, то поліморфне $\beta \rightarrow \alpha$ перетворення проходить в інтервалі температур [11].

3.2 Способи контролю якості

Контроль якості застосовується для вимірювання властивостей сплавів. В залежності від легувального елементів що вводяться в сплав може підвищуватись або понижуватись їх жорсткість, міцність, жароміцність і жаротривкість, густина, пластичність ударна в'язкість.

3.2.1 Неруйнівні методи контролю

Радіаційний неруйнівний контроль заснований на реєстрації й аналізі проникаючого іонізуючого випромінювання після взаємодії його з об'єктом контролю. Найбільш широко використовують для контролю рентгенівське і гамма-випромінювання.

Ультразвуковий метод ультразвукова дефектоскопія — пошук дефектів у матеріалі виробів ультразвуковим методом, тобто шляхом випромінювання та прийняття ультразвукових коливань, і подальшого аналізу їх амплітуди, часу приходу, форми та ін за допомогою спеціального обладнання — ультразвукового дефектоскопа[8].

Магнітопорошковий метод - на намагнічену деталь наноситься магнітний порошок або магнітна суспензія, що представляє собою дрібнодисперсний суспензія магнітних частинок в рідині [12]. Частинки феромагнітного порошку, що потрапили в зону дії магнітного поля розсіювання, притягуються і осідають на поверхні поблизу місць розташування нещільностей. Ширина смуги, по якій відбувається осідання магнітного порошку, може значно перевищувати реальну ширину дефекту.

Внаслідок цього навіть дуже вузькі тріщини можуть фіксуватися за осілим частинкам порошку неозброєним оком. Реєстрація отриманих індикаторних малюнків проводиться візуально або за допомогою пристроїв обробки зображення.

Капілярний метод полягає в проникненні спеціальних рідин в порожнини поверхневих і наскрізних несучильностей об'єкту контролю, і на вилученні рідини (пенетранта) з дефектів за допомогою спеціального покриття та у фіксуванні рідини. Глибина дефектів, які виявляються КМК, повинна значно перевищувати їх ширину. Якщо ширина поверхневого ушкодження більше його глибини (риска, подряпина), то легко заповнюється пенетрантом і так само легко видаляється з пошкоджень. Такі дефекти, як правило, КМК не виявляються.

Металографічні дослідження – це комплекс випробувань та аналітичних заходів, спрямованих на вивчення макроструктури та мікроструктури металів [12]. Дослідження закономірностей формування структури і встановлення залежностей впливу структури на механічні, фізико-механічні, електричні та інші властивості металу. Макроскопічний аналіз структури металі

виконується неозброєним оком або із застосуванням лупи, що дає збільшення від 5 до 30 разів [9].

Макроаналіз дає можливість виявляти [12]:

- раковини;
- шлакові включення;
- порушення суцільності металу;
- тріщини та інші дефекти будови сплаву;
- хімічну і структурну неоднорідність;
- відхилення геометрії шва.

Мікроскопічний аналіз металів полягає в дослідженні їх структури за допомогою оптичного або електронного мікроскопів на спеціально підготовлених зразках [11]. Методами мікроаналізу визначають форму і розміри кристалічних зерен, виявляють зміни внутрішньої будови сплаву під впливом термічної обробки або механічного впливу на сплав, мікротріщини і багато іншого. Виконуються підготовка зразків, які повністю відображають структуру виробу або металу та виконують металографічне травлення. Так само, до процесу пробопідготовки відносять процес металографічного травлення [10].

3.2.2 Руйнівні методи контролю

Механічні властивості металів (міцність, пружність, пластичність, в'язкість), як і інші властивості, є вихідними даними при проектуванні та створенні різних машин, механізмів і споруд.

Методи визначення механічних властивостей металів поділяють на такі групи [12]:

- статичні, коли навантаження зростає повільно і плавно (випробування на розтяг, стиск, згин, крутіння, твердість);

- динамічні, коли навантаження зростає з великою швидкістю (випробування на ударний згин);
- циклічні, коли навантаження багаторазово змінюється (випробування на втому);
- технологічні — для оцінки поведінки металу при обробці тиском (випробування на згин, перегин, видавлювання) [12].

–

Висновок

З проведеного аналізу було зроблено висновок що для виготовлення високоміцних деталей найбільше підходять $(\alpha+\beta)$ -сплави мартенситного класу: *BT6*, *BT3-1*, *BT8*, *BT9*, *BT14*, *BT16*, *BT23*, *BT33*, перехідного класу: *BT22*, *BT30*, зміцнювані термічною обробкою, що складається із гартування і старіння.

Типовим представником цієї групи є сплав *BT6*, який характеризується оптимальним поєднанням технологічних і механічних властивостей. Хімічний склад сплаву *BT6*: $\sim 6\%Al$, $\sim 4\%V$, решта Ti , механічні властивості: $\sigma_s=1100\dots1250$ МПа, $\delta=6\%$.

В нашому випадку, коли бронепластина є простої форми, доцільно виготовити її за стандартною технологією, що полягає в отриманні в традиційний металургійний спосіб матеріалу, якому за допомогою пластичного деформування надають потрібної форми.

Для контролю властивостей отриманого матеріалу та виробу ми будемо застосовувати мікроскопічний аналіз дослідження структури сплаву між етапами термообробки випробування на ударний згин ударну в'язкість вимірювання твердості на твердомірі.

РОЗДІЛ 4

МАРШРУТНА ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ БРОНЕПЛАСТИНИ З ТИТАНОВОГО СПЛАВУ

Для виготовлення бронепластины нами було обрано двофазний високоміцний титановий сплав так як цей сплав володіє добрими технологічними та фізичними властивостями. Добре зміцнюється при термообробці має невисокий модуль пружності. Також цей сплав має високу твердість.

4.1 Металургія титану

Титан - перехідний метал IV групи періодичної системи, атомний номер 22, температура плавлення приблизно 1668°C , щільність - $4,505\text{ г / см}^3$. при температурах до $882,5^{\circ}\text{C}$ стійка низькотемпературна α -модифікація титану з ДП граткой ($a = 0,29503\text{ нм}$, $c = 0,46831\text{ нм}$, $c / a = 1,5873$), при більш високих температурах, аж до плавлення, існує високотемпературна β -модифікація з ОЦК гратки ($a = 0,3282\text{ нм}$). Титан має дуже низьку теплопровідність - в 4 рази меншу, ніж у заліза. Модулі пружності титану невеликі і анізотропні: в напрямку осі c модуль Юнга дорівнює 146 ГПа , а в перпендикулярному напрямку - 106 ГПа .

Найчистіше йодитний титан (99,9-99,99% Ti) має високу пластичність при порівняно низькій міцності ($\sigma_{\text{в}} = 220-260\text{ МПа}$; $\sigma_{0,2} = 100-125\text{ МПа}$; $\delta = 50-70\%$), що пояснюють відношенням періодів кристалічної решітки $c/a = 1,587$, яке менше, ніж у ідеальної ГП решітки, тому ковзання проходить і в небазисних площинах. В β -Ti механізм ковзання такий же, як і в інших металах й з ОЦК гратами.

В основі технології виробництва титану лежить процес Кроля - отримання титану магнієтермічним відновленням тетрахлориду титану з наступною вакуумною дистиляцією. Частина титану губчастого використовується в якості сировини для виробництва злитків і слябів з титану

та титанових сплавів, решта титану губчастого реалізується споживачам в якості товарної продукції.

Технічно чистий титан отримують магнієтермічним способом в вигляді титанової губки - пористого речовини сірого кольору. Отримання металевого титану ускладнюється його дуже високу хімічну активність при підвищених температурах. Титан утворює хімічні сполуки і тверді розчини з багатьма елементами. Тому при виробництві титану потрібні особливі умови, що забезпечують достатню чистоту виробленого металу.

4.2 Магнієтермічний спосіб

Для отримання титану застосовують магнієтермічний спосіб

Спосіб включає такі операції:

- отримання титанових концентратів;
- виробництво титанового шлаку;
- виробництво чотирхлористого титану;
- відновлення чотирхлористого титану магнієм;
- вакуумна сепарація реакційної маси;
- плавка титанової губки в вакуумних печах.
- Далі титанову губку перероблюють - рисунок 4.1

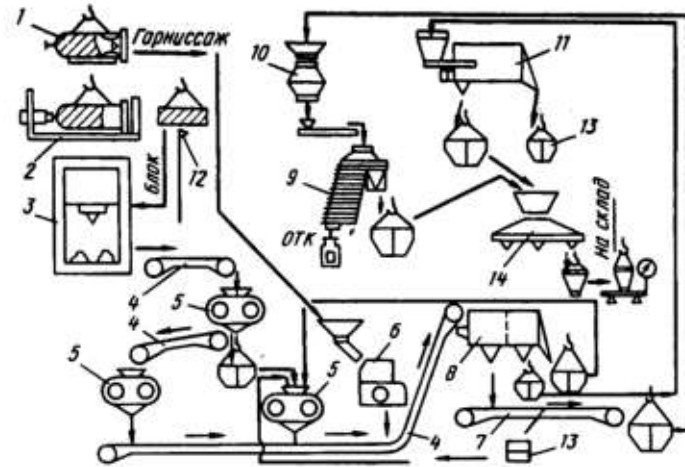


Рисунок 4.1 – Схема переробки губчатого титана: 1 – реактор с губкой; 2 – прес для виштовхування блока губки з реторти; 3 – прес крупного дроблення; 4 – транспортувальний конвеєр; 5 – дискозубчата дробилка; 6 – щекова дробилка; 7 – сортувальний конвеєр; 8 – грохот; 9 – пробовідборник; 10 – усереднювач; 11 – повітряний класифікатор; 12 – інструмент для очистки блока губки від плівок і забруднень; 13 – контейнер; 14 – розподілювач по упаковочних місцях.

Отримання титанових концентратів. Титанові руди піддають збагаченню, в результаті якого отримують концентрати з підвищеним вмістом TiO_2 . Найбільш поширеною сировиною для отримання титану є титано-магнієві руди, з яких виділяють концентрат ільменіту, що містить 40 - 45% TiO_2 , 30% FeO , 20% Fe_2O_3 і 5 - 7% порожньої породи.[13]

Отримання титанового шлаку основне призначення цього процесу - відділення оксидів заліза від оксиду титану. Для цього концентрат ільменіту плавлять в суміші з деревним вугіллям і антрацитом в електропечах, де оксиди заліза і частина титану відновлюються по реакції: $3(FeO \cdot TiO_2) + 4C = 3Fe + Ti_3O_5 + 4CO$

Відновлене залізо науглецьовується, утворюючи чавун, який збирається на дні ванни печі, відділяючись від решти маси шлаку внаслідок

відмінності їх питомих ваг. Чавун і шлак розливають окремо в виливниці. Отриманий титановий шлак містить 80 - 90% TiO_2 .

Виробництво чотирихлористого титану. Для отримання металевого титану використовують хлорид титану, отриманий шляхом хлорування титанового шлаку. Для цього титановий шлак подрібнюють, змішують з вугіллям і кам'яновугільним пеком, так як процес хлорування може проходити успішно лише в присутності відновника, і брикетують при нагріванні до $800^\circ C$ без доступу повітря. Отримані брикети піддають хлоруванню в спеціальних печах. У нижній частині печі розташовується вугільна насадка, що нагрівається при пропусканні через неї електричного струму. У піч подають брикети титанового шлаку, а через фурми - хлор. При температурі 800 - 1250 $^\circ C$ в присутності вуглецю утворюються чотирихлористий титан по реакції:

$$TiO_2 + 2C + 2Cl_2 = TiCl_4 + 2CO$$

В якості побічних продуктів виходять також хлориди інших металів ($FeCl_2$, $MnCl_2$, $CrCl_3$, $CaCl_2$ і ін.). Завдяки відмінності температур кипіння утворюються хлоридів, чотирихлористий титан відокремлюється й очищується від інших хлоридів методом ректифікації в спеціальних установках.

Відновлення чотирихлористого титану магнієм. Відновлення здійснюється в спеціальних реакторах при температурі 950 - 1000 $^\circ C$. У реактор завантажують чушковий магній і після відкачування повітря і заповнення полоти реактора аргоном всередину його подають пароподібний чотирихлористий титан. Процес відновлення титану йде по реакції: $TiCl_4 + 2Mg = Ti + 2MgCl_2$.

Металевий титан осідає на стінках, утворюючи губчасту масу, а хлористий магній у вигляді розплаву випускають через льотку реактора. В результаті відновлення утворюється реакційна маса, що представляє собою губку титану, просочену магнієм і хлористим магнієм, зміст яких досягає 35 - 40%.

Вакуумна сепарація реакційної маси. Сепарацію проводять для того щоб титанової губки від магнію і хлористого магнію. Процес відділення полягає в тому, що реакційну масу нагрівають до 900 - 950 ° С в герметичному пристрої електронагрівальної печі, в якому створюється вакуум. При цьому частина хлористого магнію віддається в рідкому вигляді, а інша частина хлористого магнію і магній випаровуються. Титанова губка після очищення направляється на плавку.

Плавлення титанової губки в вакуумно-дугових печах. Плавка губки методом вакуумно-дугового переплаву є основним способом переробки її в злитки. Вакуум печі охороняє титан від окислення і сприяє очищенню його від домішок. Отримані злитки титану перепплавляють вдруге для видалення дефектів, використовуючи як витрачаються електроди. Після цього чистота титану становить 99,6 - 99,7%. Після вторинного перепплаву злитки використовують для обробки тиском (кування, штампування, прокатка).

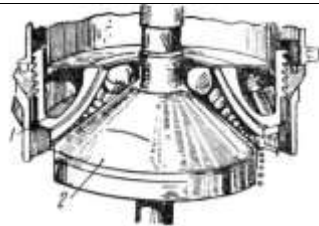

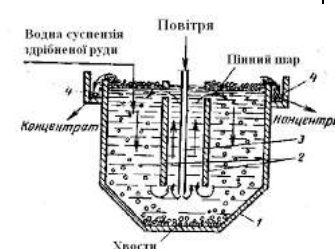
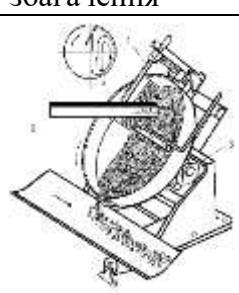
Титан завдяки захисній плівці із рутила (TiO_2) має за кімнатної температури дуже високу корозійну стійкість в повітряній атмосфері, морській воді і в багатьох агресивних середовищах. При підвищених температурах титан активно взаємодіє з киснем, азотом, воднем, оксидом і діоксидом вуглецю, водяною парою, аміаком. При нагріванні на повітрі а передусім відбувається окислення. З цієї причини плавка і заливка титанових сплавів ведеться в вакуумних печах. У розплавленому стані титан реагує зі всіма відомими формувальними і вогнетривкими матеріалами, тому його плавлять в гарнісажі - своєрідній шкаралупі із того ж металу, вміщеній в охолоджуваний графітовий тигель. Водень з металу можна видалити вакуумним віджимом.

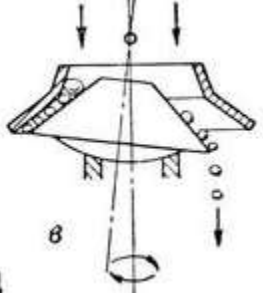
Титанові сплави мають досить високі ливарні властивості внаслідок малого інтервалу кристалізації і високу рідкоплавкість, що забезпечує отримання щільних виливків. Для виготовлення тонкостінних деталей з титанових сплавів. Застосовують відцентрове лиття, при якому заповнення

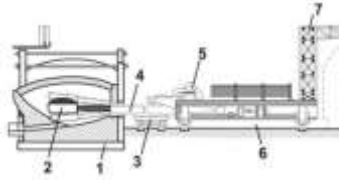
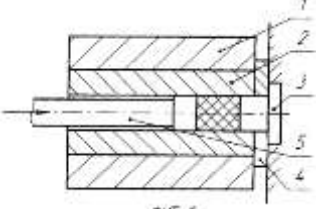
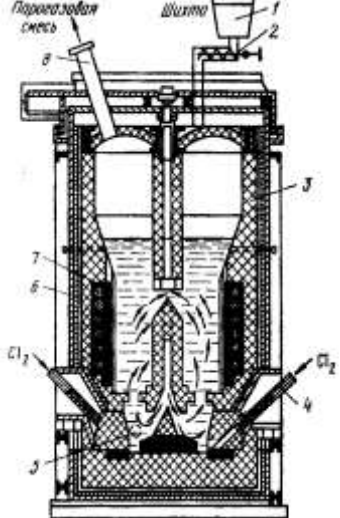
форми розплавом і його, кристалізація відбуваються під дією відцентрових сил [13].

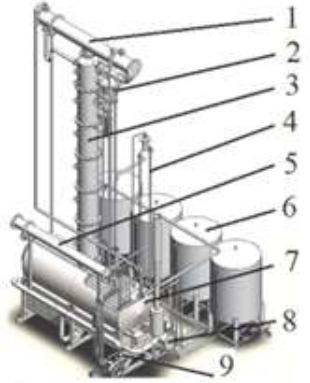
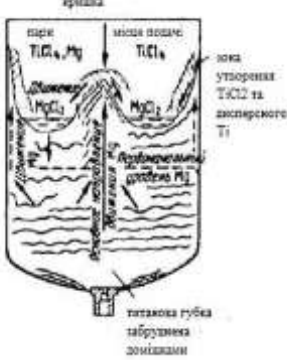
Таблиця 4.1

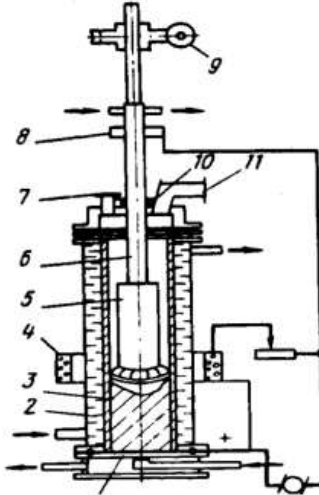
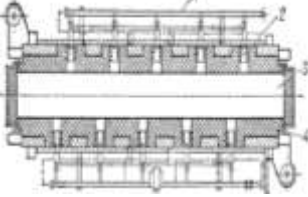

Маршрутна технологія виготовлення бронепластини

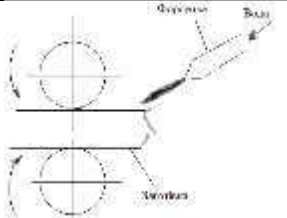
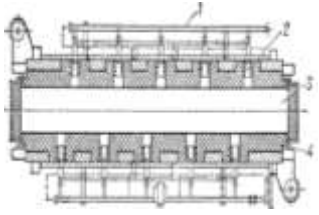
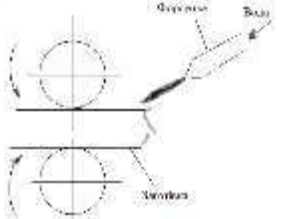
Етап техно-логії	№ операції, назва операції	Номер переходу	Тип обладнання, матеріали	Ескіз (схема) операції (переходу), обладнання
1	2	3	4	5
Видобуток руди	Видобування титанової руди,		Шахти, кар'єри	
	2. Підготування руд до доменного плавлення	Подрібнення	Подрібнювачі конусні, валкові	 <p>Схема конусного подрібнювача руди: 1 – нерухомий конус, 2 – рухомий конус</p>
		Класифікація матеріалу	Класифікатори, сита (грохоти)	 <p>Схема спірального класифікатора</p>
Збагачення	Підготування руд збагачення	Збагачення руди	Промивне обладнання, обладнання гравітаційного, магнітного, сепараційного флотаційного збагачення	 <p>Схема флотаційного збагачення</p>
		Згрудкування : агломерація, окатування, перемішування деревного вугілля антрацита магнетитового концентрату	Агломераційні машини, гранулятор	

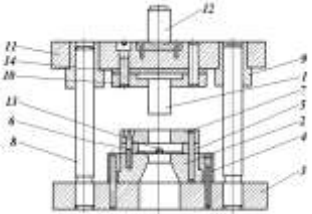
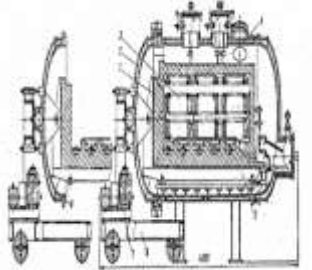
		Офлюсовування агломерату	Гранулятори	 <p>Тарільчастий гранулятор</p>
5. Плавка електропечі	Відновлення титану		Електродугова піч	 <p>Схема електродугової печі: 1 – електроди, 2 – склепіння, 3 – завантажувальне вікно, 4 – корпус, 5 – механізм нахилу печі, 6 – електродуга, 7 – льотка фурма, 10 – чавунна льотка, 11 – шлакова льотка, 12 – шлаковий желоб, 13 – колонна шахта, 14 – футеровка, 15 – металевий захист колошнику, 16 – кожух печі, 17, 18 – холодильник, 19 – футерування горну, 20 – водорозподільча труба, 21 – жолоб для чавуну і шлаку, 22 – фундамент</p>
	Утворення шлаку Ti_3O_5			
Одержання чотирьохлористого титану	Подрібнення	Підготування шихтових матеріалів	Подрібнювачі, згрудковувачі	 <p>Схема конусного подрібнювача</p>

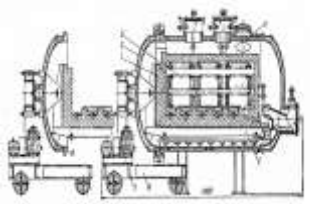
		<p>Завантаження твердих шихтових матеріалів до конверторної печі (вугілля і кам'яновугільним пеком)</p>	<p>Завантажувальна машина, мульда, конвертерна піч</p>	 <p>Схема рейкової машини завалення: 1 - піч; 2 - мульда; 3 - мульдвий візок; 4 - хобот; 5 - візок машини завалення; 6 - міст машини завалення; 7 - струмознімальна конструкція; 8 - габарит рухомого складу.</p>
		<p>Брекетирування титаної шихти</p>	<p>Прес машина</p>	 <p>ФІГ. 1</p>
<p>Одержання хлоридхлористого титана</p>	<p>Хлорування</p>	<p>Хлорування $TiO_2 + 2C + 2Cl_2 = TiCl_4 + 2CO$</p>	<p>Киснево-конвертерна піч</p>	 <p>Схема спеціальної печі</p>

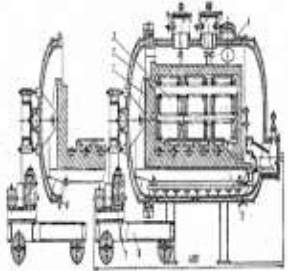
	<p>7. Відокремлення $TiCl_4$</p>	<p>Чотирихлористий титан відокремлюється й очищується від інших хлоридів методом ректифікації в спеціальних установках.</p>	<p>Ректифікаційна колона</p>	 <p>Ректифікаційна колона: 1 – конденсатор; 2 – подільник; 3 – колона; 4 – система трубопроводів; 5 – дистилятор; 6 – збірні ємності; 7 – корпус; 8 – холодильник для залишкового конденсату; 9 – система наддування інертного газу.</p> <p>Схема роботи заправної машини</p>
		<p>Завалка шихти – закладання твердих шихтових матеріалів, скрапу</p>	<p>Завантажувальна корзина</p>	
<p>Відновлення чотирихлористого титану магнієм</p>		<p>$TiCl_4 + 2Mg = Ti + 2MgCl_2$ Металевий титан осідає на стінках, утворюючи губчасту масу, а хлористий магній у вигляді розплаву випускають через лютку реактора. В результаті відновлення утворюється реакційна маса, що представляє собою губку титану, просочену магнієм і хлористим магнієм, зміст яких досягає 35 - 40% [16].</p>	<p>Реактор, агрегат для відновлення хлориду титану</p>	 <p>Корпус зона утворення $TiCl_3$ та дисперсного Ti титанова губка табуретка зомішаний</p>

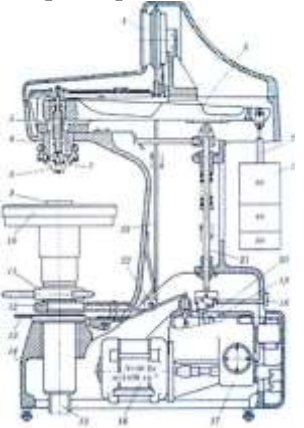
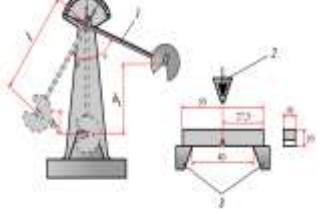
Плавка титанової губки в вакуумнодугових печах	Переплавлення титанової губки, легування для виготовлення сплаву ВТ6	Виготовлення зливків	Вакуумна дугова піч	 <p>Схема вакуумної дугової печі для плавки титана: 1 – поддон; 2 – виливниця; 3 – зливок; 4 – соленоїд; 5 – витратний електрод; 6 – електродотримач; 7 – оглядове скло; 8 – токопідвідний контакт; 9 – подавальний механізм; 10 – рухоме ущільнення; 11 – патрубок до насосу</p>
Обробка металу тиском	Прокатування	Нагрівання	Методичні печі	 <p>Методична піч: 1 — газові комунікації; 2 — газова горілка; 3 — камера нагріву; 4 — вогнеупорна кладка.</p>
	Обтискання на необхідну товщину листа	Стан сортового прокату обтискними валками	3	 <p>Схема прокатки</p>

		Збивання окалини	Форсунки з водою під тиском[14]	 <p>Схема збивання окалини струменем води</p>
		Проміжне нагрівання. Холодна прокатка титана и особливо титанових сплавів потреб ує частих проміжних відпалів при температур 500-900°С.	Методичні печі	 <p>Методична піч: 1 — газові комунікації; 2 — газова горілка; 3 — камера нагріву; 4 — вогнеупорна кладка.</p>
		Чорнове прокатування	Стан сортового прокату з чорновими валками	
		Збивання окалини	Форсунки з водою під тиском	 <p>Схема збивання окалини струменем води</p>
		Проміжне нагрівання	Методичні печі	
		Чистове прокатування	Стан сортового прокату з чистовими валками	

Виготовлення заготовок (пластин)	Вирубування	Розрізання на мірні заготовки	Вирубний штамп	 <p>пуансон 1 і матриця 2 і нижня плита 3 з матрицетримач 4 напрямна планка 5, заготовка 6, знімач 7. упор 13. напрямні колонки 8. верхня плита 11, пуансонотримач 10 хвостовик 12, напрямні втулки 9, колонках 8 верхня половина штапу</p>
Термічна обробка	Відпал	Простий відпал знімає гарячий наклеп, що виникає в процесі деформації, стабілізує структуру і механічні властивості сплаву. Режим такого відпалу полягає в нагріванні при можливо низьких температурах достатніх для досить повного розміцнення	Вакуумна піч	

Термічна бробка	Гартування	<p>Структура сплаву ВТ6 після гарту суттєво залежить від температури нагріву. При загартуванні з температур нижче 750°C в сплаві фіксується α- і β-фази. При високих температурах вміст легувальних елементів β-фазі менше ніж у другій критичній концентрації - вона при гартуванні частково переходить в мартенситну фазу. Після гарту з ще більш високих температур фіксується α- і α'-фази. При гартуванні с температур, відповідних до β-області, структура сплаву представлена мартенситної α'-фазой; тому по структурі в загартованому стані сплав ВТ6 відноситься до мартенситному класу.</p>	Вакуумна піч	
-----------------	------------	--	--------------	--

Термічна обробка	Старіння	<p>Зміцнення сплавів при старінні відбувається в результаті дисперсійного старіння, обумовленого низькотемпературним розпадом метастабільних α'- і β-фаз. Для сплаву ВТ6 більший вклад в підвищення міцнісних характеристик вносить розпад β-фази. Залежно від температури нагрівання під загартування і наступного старіння розпад метастабільних фаз може відбуватися з утворенням фаз α і α'; α, α' і β або α і β. Сплав ВТ6 піддають старінню при порівняно низьких температурах 450 - 550°C, що забезпечує досить високий ефект зміцнення.</p>	Вакуумна піч	 <p>Вакуумна камерна піч з викочуваним подом типу СДВ : 1- футерівка; 2 – кожух; 3 – нагрівники; 4 - ; 5 - ; 6 – візок; 7 – електропривід; 8 - вакуумний затвор</p>
------------------	----------	--	--------------	--

Методи контролю	Вимірювання твердості		Твердомір	Твердоміра ТК-2 
Випробування	Ударна вязкість	Випробування на ударну вязкість	Копер маятниковий 1200 - 1300 МПа	 <p>Копер: 1 — маятник; 2 — ніж маятника; 3 — опори</p>

4.3 Термообробка бронепластины з ВТ6

Для титану і його сплавів застосовують в основному такі види термічної обробки: відпал, гартування, старіння, в меншій мірі хіміко-термічну і термомеханічну обробку. Титан і α -титанові сплави піддають відпалу першого роду для зняття нагартування, обумовленої пластичною деформацією.

Легувальні і домішкові елементи, як правило, підвищують температуру початку рекристалізації йодидного титану, тому титанові сплави відпалюють при більш високих температурах, ніж титан [17]. Температура відпалу, з іншого боку, не повинна бути надмірно високою через зростання зерна. Зокрема, температура нагріву не повинна перевищувати точку A_{c3} , так як в β -області бурхливо росте зерно. За схильності до зростання зерна титан і його сплави схожі з спадково грубозернистими сталями [17].

Знеміцнення нагартованого титану і титанових сплавів з переважаючою α фазою, починається вже на стадії повернення, оскільки в них через велику енергію дефектів упаковки і малого розщеплення дислокацій легко

розвивається полігонізація, яка веде не тільки до формування субзеренної структури, а й до зменшення загальної щільності дислокацій. У зв'язку з цим ефективно знеміцнення нагартованих напівфабрикатів з титану, псевдо- α і багатьох ($\alpha + \beta$ -титанових сплавів досягається не тільки рекристалізаційним, але і дорекристалізаційним відпалом [17].

Відпал ($\alpha + \beta$) -сплавів поєднує елементи відпалу першого і другого роду. Температура відпалу ($\alpha + \beta$) -титанових сплавів, по-перше, повинна бути досить високою, щоб зняти нагартування, а по-друге, достатньо низькою, щоб забезпечити такий вміст легуючих елементів в β -фазі, яке здатне не тільки запобігти її розпад в процесі охолодження, але і забезпечити достатню стабільність при експлуатації готового виробу.

Чим нижче температура відпалу в ($\alpha + \beta$) -області, тим більше концентрація β -стабілізаторів в β -фазі і тим вище її термічна стабільність [20]. Кількість β -фази, яке визначається відомим правилом важеля, буде при цьому зменшуватися. Найпростіший режим відпалу ($\alpha + \beta$) -сплавів полягає в їх нагріві при найнижчих температурах, достатніх для зняття нагартування. Температура простого відпалу зазвичай становить близько 800°C . Для ($\alpha + \beta$) -титанових сплавів, крім простого відпалу, застосовують ізотермічний відпал. Він складається з нагріву металу до порівняно високих температур t_1 ($800 \dots 950^{\circ}\text{C}$), достатніх для зняття нагартування, охолодження до температур t_2 ($500 \dots 650^{\circ}\text{C}$), що забезпечують високу стабільність β -фази і витримки при цій температурі з подальшим охолодженням на повітрі [20]. Такий відпал забезпечує поєднання досить високої міцності і жаростійкості і хорошої пластичності.

Оптимальне поєднання міцності, пластичності і в'язкості руйнування забезпечує змішана (дулексна) структура, представлена первинними зернами з α -фази і β -перетвореної тонкопластинчастої матриці. Таку структуру можна отримати відпалом при температурах трохи нижче ($\alpha + \beta$) \rightarrow β -переходу (точки A_{C3}) [20].

Цю термічну обробку можна назвати псевдо- β -відпалом. Для зменшення залишкових напружень, що утворюються в титанових сплавах при різних технологічних операціях (механічної обробки, правці, зварюванні і т.д.), застосовують неповний відпал при порівняно низьких температурах (450 ... 650 ° C), недостатніх для розвитку рекристалізації і полігонізації. Зняття напруги при цих температур здійснюється в результаті дислокаційної повзучості. Зміцнення титанових сплавів при загартуванні і старінні визначається їх фазовим складом після гарту і кількістю метастабільних фаз. При цьому поведінка сплавів при загартуванні і старінні суттєво залежить від того, які елементи, β -евтектоїдні або β -ізоморфні, визначають фазовий склад загартованих сплавів.

Зміна механічних властивостей титанових сплавів в залежності від температури нагріву під загартування ілюструється рис. 4.8 на прикладі сплавів Ti + 3,6% Cr і Ti + 4,7% Mo. Міцність сплаву титана з евтектоїдоутворюючим β -стабілізатором (Ti + 3,6% Cr) починають різко зростати після гарту з температури 700 ° C, коли в структурі сплаву з'являється ω -фаза.

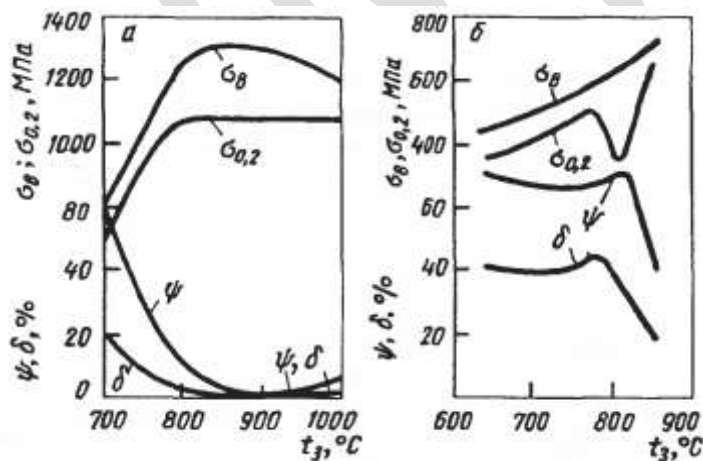


Рисунок 4.3 – Залежність механічних властивостей титанових сплавів температури нагріву [20]

З підвищенням температури нагріву під загартування показники міцності сплаву ростуть, так як збільшується кількість β -фази, а вміст β -

стабілізатора в ній зменшується, в результаті чого склад β -фази наближається до другої критичної концентрації і зміцнення β -фази, обумовлене ω -фазою, зростає.

Після загартування з критичної температури t_1 (850°C) β -фаза має критичний склад і зміцнення, обумовлене ω -фазою, максимальне. Сплав $\text{Ti} + 3,6\% \text{Cr}$ після гарту з температур $850 \dots 900^\circ \text{C}$ має практично нульове подовження і звуження. Після загартування з більш високих температур з'являється α' -фаза; разом з тим сильно зменшується кількість β -фази, а отже і кількість ω -фази. Тому трішки знижуються міцнісні характеристики і підвищується пластичність.

Для сплаву титану з ізоморфні β -стабілізатором ($\text{Ti} + 4,7\% \text{Mo}$) після гарту з температур, близьких до критичної $t_{\text{кр}}$ ($775 \dots 825^\circ \text{C}$) спостерігається провал межі текучості, якому відповідає деякий підвищення пластичності. Провал межі текучості в загартованих сплавах титану з ізоморфними β -стабілізаторами обумовлений двома причинами. По-перше, після гарту з температур, близьких до $t_{\text{кр}}$ в сплавах фіксується максимальна кількість метастабільною β -фази. ця β -фаза механічно нестабільна і при порівняно низькій напрузі відчуває мартенситне перетворення $\beta \rightarrow \alpha''$, що і дає « наведену » перетворенням плинність. По-друге, після загартування з температур вище $t_{\text{кр}}$ в структурі сплавів з'являється м'яка мартенситна α'' фаза. при подальшому підвищенні температури нагріву під загартування β -фаза збіднюється β -стабілізаторами і тому α'' фаза за хімічним складом і кристалічній структурі наближається до α' - фази, що призводить до збільшення міцності; кількість метастабільною β -фази при цьому зменшується.

Оптимальні температури нагріву під загартування промислових сплавів визначаються тим, які метастабільні фази при цьому утворюються. Якщо в титанових сплавах не утворюється при загартуванні α'' -мартенсит, то температуру нагрівання під загартування підбирають таким чином, щоб зафіксувати загартуванням ($\alpha + \beta$) -структуру з максимальною кількістю β -

фази. Ці оптимальні температури нагрівання під загартування близькі до $t_{кр}$. В тому випадку, коли в сплавах при загартуванні фіксується α'' -мартенсит, оптимальні температури нагріву під загартування можуть бути значно вище цих. Однак вони не повинні перевищувати A_{c3} через різке укрупнення зерна. Структура цих сплавів після гарту з температур від $t_{кр}$ до A_{c3} представлена α -, α'' - і β -фазами. Як вже зазначалося, α'' фаза утворюється лише в сплавах титану ізоморфних β -систем, в сплавах титану з евтектоїдоутворюючими β -елементами її немає.

Промислові $(\alpha+\beta)$ -титанові сплави часто легують ізоморфними β - і евтектоїдоутворювальними стабілізаторами. У цьому випадку залежність фазового складу сплавів від температури нагріву під загартування буде визначатись тими елементами, які домінують зазначене відмінність в принципах вибору оптимальних температур нагрівання під загартування сплавів різного хімічного складу обумовленого різними ефектами зміцнення сплавів при розпаді α' і α'' -мартенситу. Розпад α' -мартенситу не приводить до помітного зміцнення сплавів, в той час розпад α'' дає сильне зміцнення.

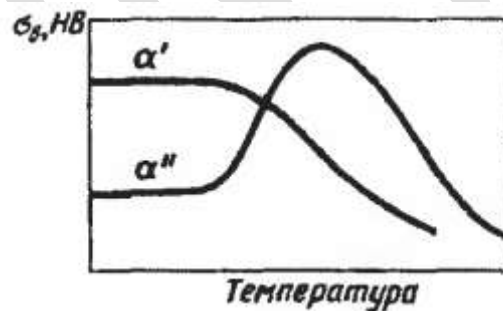


Рисунок 4.4 – Змінена міцності і твердості титанових сплавів при розпаді α' і α'' -мартенситу

Після загартування сплави піддають старінню. Зміцнення при старінні обумовлене процесами розпаду метастабільних β - і α'' -фаз. Щоб уникнути крихкості, пов'язаної з ω фаза, титанові сплави піддають старіння по режимам,

які не призводять до її утворення, найчастіше при 500 ... 600 ° С. При цих температурах зміцнення забезпечується дисперсною α фаза. Якщо розпад β -фази відбувається без утворення ω -фази або обсяг її невеликий, то сплави можна піддавати старінню і при нижчих температурах (450 ... 500 ° С). При низькотемпературному старінню виділення α -фази більш дисперсних і забезпечують тому більше зміцнення. Рівень міцності зістарених сплавів визначається кількістю метастабільних фаз після гарту (β -фази після загартування з температури t_3 нижче $t_{кр}$ на рис. 4.4) і кількістю метастабільної α -фази, яка може виділитися в одиниці об'єму метастабільної β -фази, яка розкладається.

При загартуванні з однієї і тієї ж температури зі збільшенням вмісту β -стабілізаторів від a до b кількість метастабільною β -фази зростає від нуля до 100%. Якщо старіння цих сплавів проводиться при однієї і тієї ж температурі t_c , то кількість виділяється α -фази в одиниці об'єму β -фази у всіх сплавах буде одним і тим же ($c'v' / a'v'$), так що ефект термічного зміцнення зростає зі збільшенням вмісту β -стабілізаторів тільки через зростання частки β фази. У сплавах складу c_1 , що відповідає точці b , ефект старіння буде найбільшим, так як при подальшому збільшенні $[Mo]_{екв}$ кількість β -фази залишається незмінним (100%), а кількість α -фази, що утворюється при старінні, зменшується відповідно до співвідношеннями $c'v' / a'v'$, $c''v' / a'v'$, $c'''v' / a'v'$. При $[Mo]_{екв} > v'$ сплави при температурі t_c термічно не зміцнюються [20].

Відповідно до вищесказаного залежність ефекту старіння (крива 1) і рівня міцності властивостей сплавів (криві 2 і 3) від $[Mo]_{екв}$ можна представити схемою (для спрощення міркувань прийнято, що склад α -фази при температурах t_3 і t_c однаковий). Міцність загартованих сплавів в області α - і β -розчинів визначаються законами розчинного зміцнення (при допущенні пригнічення $\beta \rightarrow \omega$ перетворення). В інтервалі концентрацій від a до b структура загартованих сплавів представлена сумішшю α - і β -розчинів постійної концентрації, в зв'язку з чим можна очікувати адитивного змінювання властивостей (пунктир на рис. 4.10). Насправді, величина α - і β -

зерен α - і β -розчинів дотичних складів значно більше чим при структурі представленої примірно однаковими кількостями α - і β -фаз, що призводить до структурного зміцнення (рис.4.5 крива 2)

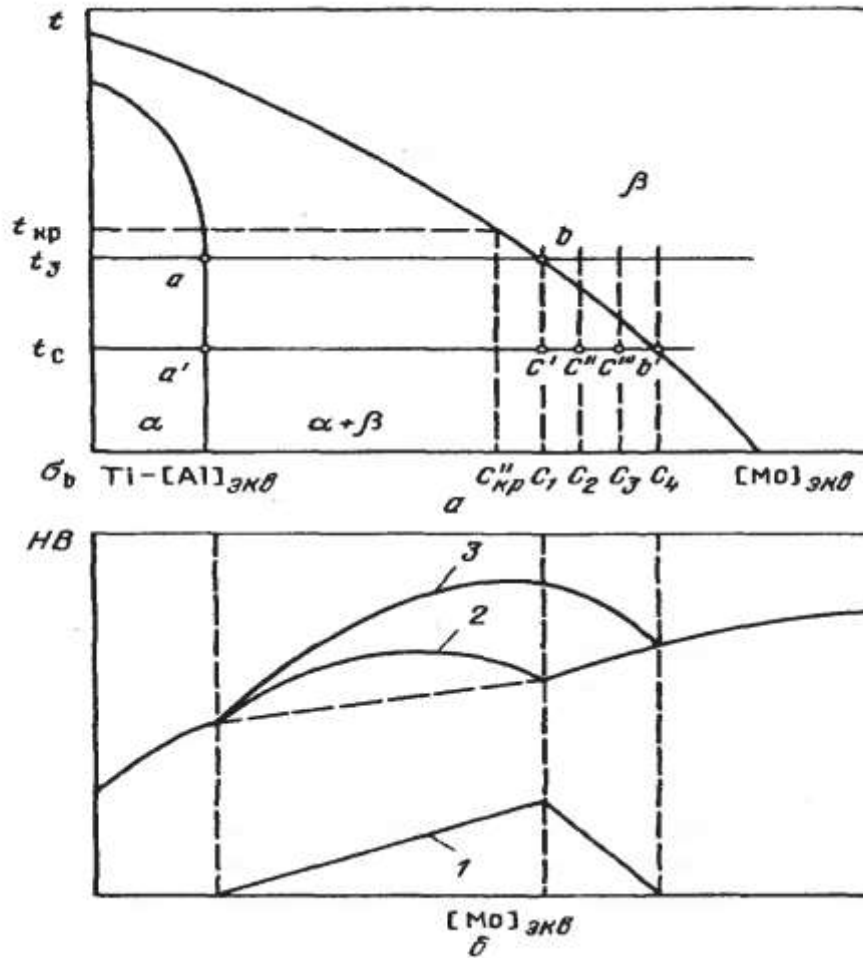


Рисунок 4.5 - Схема до визначення залежності міцнісних властивостей титанових сплавів, загартованих з температури t_z нижче критичної $t_{кр}$, і підданих старіння при t_c (прийнято, що коноди в двофазній рівновазі лежать в площині вертикального розрізу системи $Ti - [[Al]_{екв}^{стр} - Mo_{екв}]$, а кількість еквівалентних алюмінію елементів досить для пригнічення вмісту ω -фази при загартуванні) [20]

Складання властивостей, відповідних кривої 2, з ефектом старіння (крива 1) дає залежність міцності властивостей від $[Mo]_{екв}$ з максимумом при

концентраціях, близьких до критичної $C_{кр}''$ (11 ... 12%Mo). Дійсно, промислові псевдо- β -титанові сплави мають більш високі властивості міцності при еквіваленті по молібдену $[Mo]_{екв}$ приблизно 12% (рис. 4.6).

Досить часто β -титанові сплави нагрівають під загартування не до β -області, а до температур трохи нижче A_{c3} . При виробництві деформованих напівфабрикатів з псевдо- β -сплавів заключні операції по обробці тиском закінчують при температурах нижче точки A_{c3} , при яких метал, хоча б частково, зберігає загартування. При подальшому нагріванні під загартування до температур нижче A_{c3} повної рекристалізації не відбувається і після гарту структура сплавів представлена невеликою кількістю первинної α -фази і метастабільної β -фази з великою щільністю дислокацій.

При старінні зародження зміцнювальних фаз відбувається на дислокаціях, що в кінцевому підсумку призводить до структури, представленої дуже дрібними рівномірно розподіленими частинками α -фази в β -матриці. При такому механізмі розпаду β -фази на межі β -зерен не утворюються оторочки α -фази, які мають негативний вплив на механічні властивості сплавів. У підсумку після загартування з температур, відповідних $(\alpha + \beta)$ -області, псевдо- β -сплави мають підвищеними характеристиками міцності, пластичності і в'язкості руйнування і опору корозійному розтріскуванню в порівнянні з β -загартуванням [15].

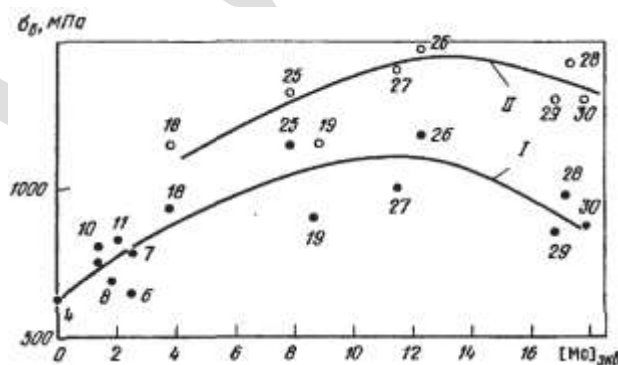


Рисунок 4.6 - Залежність часового опору розриву титанових сплавів у відпаленому (I) і зістареному (II) стані від еквівалентна по молібдену при $[Al]_{екв}^{стр} = 3...6\%$

У промислових ($\alpha + \beta$) - і псевдо- β -сплавах термічне зміцнення обумовлено дисперсними частками α -фази. Матрична β -фаза і, що виділяється при старінні, α -фаза самі по собі не відрізняються високою міцністю - це м'які фази. Дисперсійне зміцнення титанових сплавів обумовлено міжфазними α/β -границями, які створюють сильні перешкоди ковзанню дислокацій і ефективно гальмують розповсюдження тріщин. Природно, що найбільш ефективно дисперсійне зміцнення спостерігається при певних режимах старіння. забезпечують оптимальні параметри дисперсної структури. В даний час, хоча і в обмежених масштабах, застосовують термомеханічну обробку титанових сплавів. Термомеханічна обробка α - і псевдо- α -титанових сплавів не призводить до суттєвого підвищенню їх міцності, як це спостерігається для сталей. але різко підвищує однорідність структури і властивостей по перетину і довжині виробу, а також відтворюваність властивостей виробів з різних плавок одного і того ж сплаву. Термомеханічна обробка ($\alpha + \beta$) -сплавів приводить до підвищення їх міцності на 5 ... 30% у порівнянні з міцністю після стандартної гарту і старіння при одночасному збільшенні поперечного звуження[17].

Відпал прутків, поковок, штамповок і інших великогабаритних напівфабрикатів і деталей з них проводять при 750-800 °С. Охолодження разом з піччю великих напівфабрикатів запобігає їх викривлення, а для дрібних деталей дозволяє уникнути часткового загартування. Однак останнім часом було доведено, що доцільно підвищити температуру відпалу до 900-950 °С, що призведе до підвищення в'язкості руйнування і ударної в'язкості при збереженні високих пластичних властивостей через формування змішаної структури з великою часткою пластинчастої складової. Для термообробки бронепластини підібраний такий режим термообробки рис.4.7.

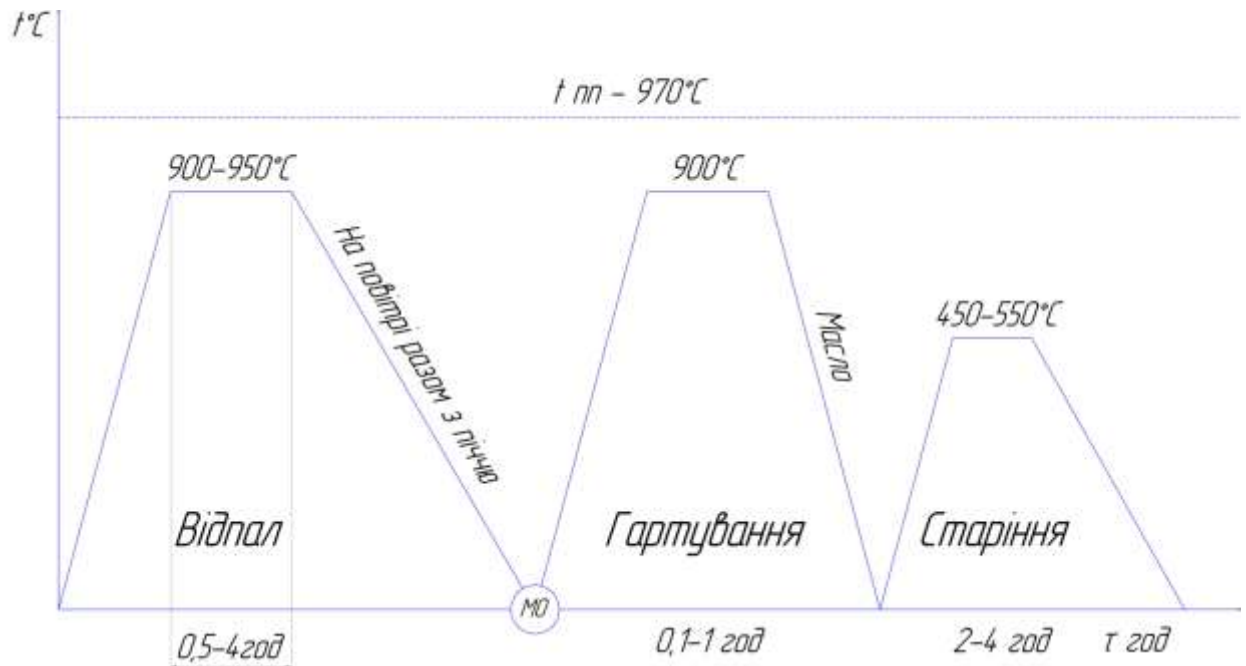
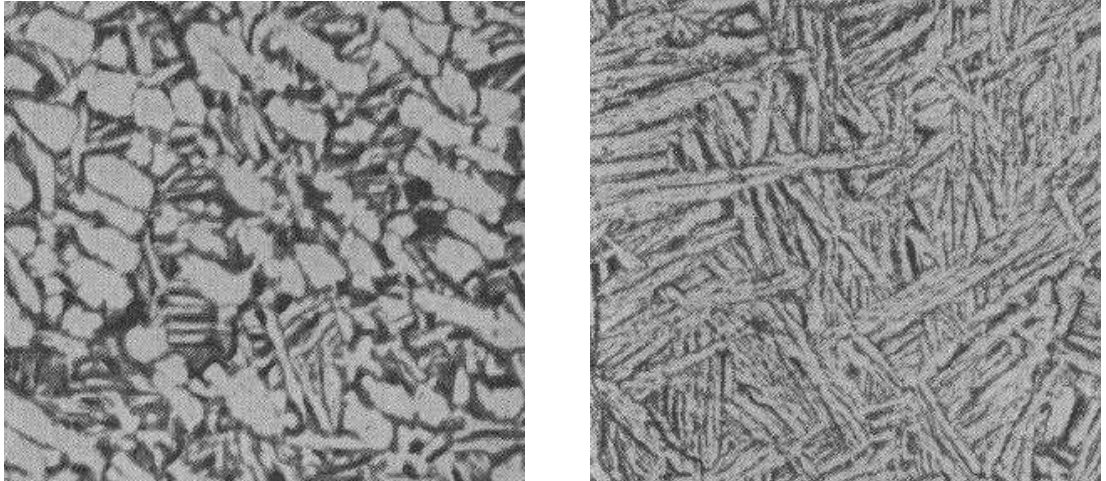


Рисунок 4.7 — Графік термічної обробки бронепластини зі сплаву ВТ6

Простий відпал знімає гарячий наклеп, що виникає в процесі деформації, стабілізує структуру і механічні властивості сплаву. Режим такого відпалу полягає в нагріванні при можливо низьких температурах достатніх для досить повного знеміцнення.

Температура відпалу ($\alpha + \beta$)- та β -сплавів повинна бути достатньо високою, щоб зняти гарт, але і повинна бути достатньо низькою, щоб забезпечити достатній вміст легувальних елементів в β -фазі для її стабілізації. Чим нижча температура відпалу в ($\alpha + \beta$)-області, тим більша концентрація β -стабілізаторів в β -фазі, тим вища її термічна стабільність. При цьому кількість β -фази зменшується[18].

Для підвищення в'язкості руйнування і опору росту тріщин використовують β -відпал із утворенням рекристалізованого первинного β -зерна і пластинчатої структури. Така структура забезпечує переміщення тріщини уздовж границь β -зерен і поперек колоній α -пластин. Так для сплаву ВТ6 (Ti-6Al-4V): нагрівання до 900°C охолодження на повітрі разом з піччю. - Рис 4 .14



а)

б)

Рисунок 4.13 – Змінення мікроструктури сплаву VT6 після термообробки, $\times 300$ [19]: а – структура VT6 після відпалювання: змішана (дулексна) структура, представлена первинними зернами з α -фази і β -перетвореної тонкопластинчастої матриці – забезпечує поєднання в'язкості, пластичності, міцності; б – після гартування з 900°C на оливу (масло) – структура сплаву представлена мартенситною α' -фазою і мінімальною кількістю β -фази.

Структура сплаву VT6 після гартування суттєво залежить від температури нагріву. При гартуванні з температур нижче 750°C в сплаві фіксується α - і β -фази.

При високих температурах вміст легувальних елементів у β -фазі менше ніж у другій. При критичній концентрації вона при гартуванні частково переходить в мартенситну фазу.

Після гартування з температур менше 900°C фіксується в структурі залишаються не перетвореними α - і α' -фази. При гартуванні с температур, відповідних до β -області, структура сплаву представлена мартенситною α' -фазой; тому по структурі в загартованому стані сплав VT6 відноситься до мартенситному класу. Охолодження VT6 проводять в оливі[20].

Зміцнення сплавів при старінні відбувається в результаті дисперсійного старіння, обумовленого низькотемпературним розпадом метастабільних α' - і β -фаз.

Для сплаву ВТ6 більший вклад в підвищення характеристик міцності вносить розпад β -фази. Залежно від температури нагрівання під загартування і наступного старіння розпад метастабільних фаз може відбуватися з утворенням фаз α і α' ; α' і β або α і β .

Сплав ВТ6 піддають старінню при порівняно низьких температурах 450 - 550°C, що забезпечує досить високий ефект зміцнення.



Рисунок 4.14 – Структура сплаву ВТ-6 після старіння за 500⁰ С, 2 години - зміцнення сплавів при старінні відбувається в результаті дисперсійного низькотемпературного розпаду метастабільних α' - і β -фаз і утворення α і α'' і β фаз.

Термообробка відпал, гартування, старіння проводиться в вакуумних печах або в печах з контрольованою атмосферою для унеможливлення процесів окислення сплаву [23].

Проміжний контроль структури сплаву між етапами термообробки проводиться за допомогою мікроскопа МІМ 7 рис. 4.15



Рисунок 4.15 - Металографічний мікроскоп МІМ 7 для контролю мікроструктури

Остаточні властивості сплаву ВТ6 контролюють через випробування контрольних зразків (зразків – свідків). Для забезпечення належного захисту ударна міцність має складати 1200 - 1300 МПа. Для випробування використовуємо копер маятниковий - рис. 4.16

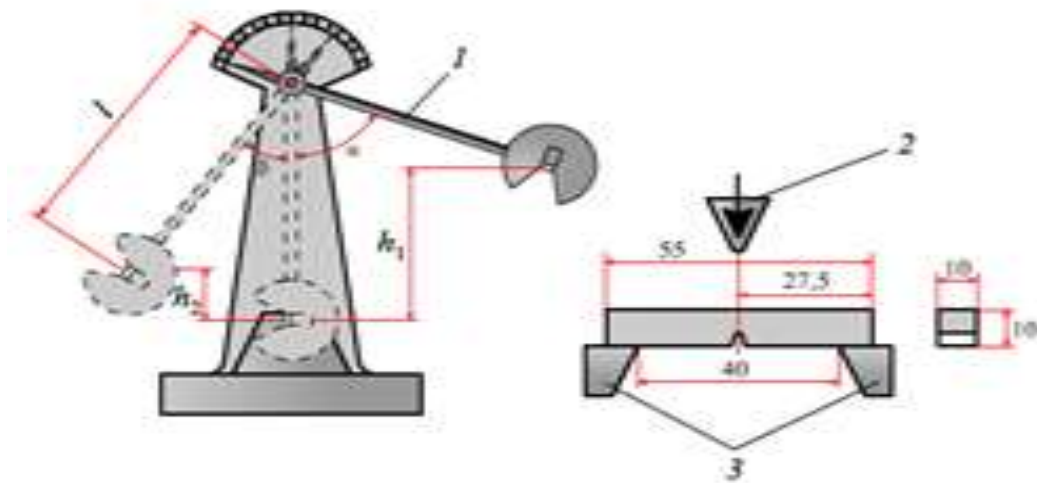


Рисунок 4.16 – Маятниковий копер КМ-30 – схема випробування і схема зразку [12]

Висновки

Для виготовлення бронепластини нами було обрано двофазний високоміцний титановий сплав ВТ6 із високими технологічними та фізичними властивостями.

Визначено спосіб отримання титанового сплаву, описано та складено технологічну послідовність отримання титанового сплаву в магністермічний спосіб.

Наведено технологію отримання напівфабрикату – прокату - з титанового сплаву і визначено спосіб отримання заготовки бронепластини з нього – шляхом штампування вирубанням з листового прокату.

Проаналізовано вплив легувальних елементів сплаву ВТ6 і призначено режими термічної обробки. Визначені особливості впливу легувальних елементів і перетворень, що проходять на кожному з етапів термічної обробки.

Зазначено методи проміжного контролю структури і властивостей сплаву.

РОЗДІЛ 5 ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ

Термообробка відпал, гартування, старіння проводиться в вакуумних печах або в печах з контрольованою атмосферою задля унеможливлення процесів окислення сплаву.

Вакуумні печі застосовуються для безокисного нагрівання при термообробці металів і сплавів.

Піч має вигляд герметичного сталевих кожуха, що охолоджується водою, в якому розміщено нагрівальну камеру. Нагрівання камери здійснюється металевими (ніхромовими, вольфрамовими, молібденовими, танталовими) або графітовими нагрівачами опору. З метою виключення електричного пробоя, що легко виникає при підвищених температурах у вакуумі, всі печі працюють на зниженій напрузі. У деяких печах використовують індукційне нагрівання. Футерування печей виконується з кераміки, графіту, роль теплової ізоляції відіграють системи металевих екранів[24].

До складу вакуумної печі (рис. 5.1) входять: знижувальний автотрансформатор; трансформатор для живлення допоміжних систем та механізмів печі; вакуумна система; механізми пересування садки, підняття дверцят, пересування стола гартівної ванни; водоохолоджувальна система; щити керування й автоматичного регулювання температури і контролю якості вакууму.

У печах з нагрівниками та екранами, виготовленими з молібдену або вольфраму, не допускається під час роботи знижувати вакуум у робочому просторі нижче $6,6 \cdot 10^{-2}$ Па, оскільки це призведе до окиснення і виходу з ладу зазначених елементів. Для забезпечення постійного вакууму та температури в робочому просторі багато печей обладнано шлюзовими камерами, через які здійснюються завантаження і розвантаження деталей.

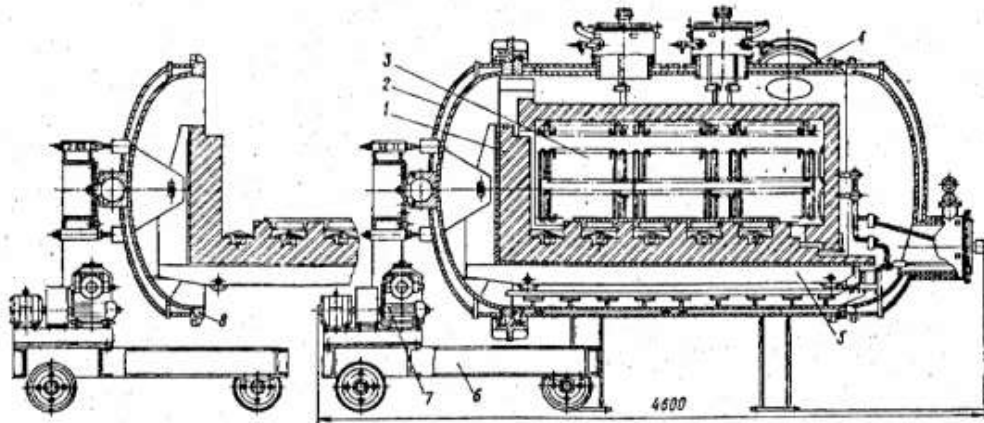


Рисунок 5.1 – Вакуумна камерна піч з викатуваним подом типу СДВ : 1- футерівка; 2 – кожух; 3 – нагрівники; 4 - вікно ; 5 – вікатний под ; 6 – візок; 7 – електропривод; 8 - вакуумний затвор (найчастіше механічний), трубопровод, вентилі, затвори [24].

Промисловість випускає серію електричних вакуумних печей різної конструкції: камерні, шахтні, елеваторні, штовхальні, з крокуючим подом, тунельні та ін. Потужність їх знаходиться у межах 10-1760 кВт. Робоча температура досягає 2500°C, залишковий тиск - 10^{-7} Па. Розміри робочого простору в лабораторних камерних печах типу СНВЛ становлять 100 x 300 x 100 мм, у тунельної печі типу СЛВ - 6000 x 1200 x 400 мм[24].

Висновок

Термообробка відпал, гартування, старіння проводиться в вакуумних печах або в печах з контрольованою атмосферою задля унеможливлення процесів окислення сплаву.

Піч складається з герметичного сталевого кожуху, в якому розміщена футеровка з нагрівачами та викатуваним подом. Завдячуючи вакууму такі печей дозволяють працювати при температурі до 2500 °С.

За допомогою вакуумного насосу створюється вакуум порядку 10^{-2} Па, що унеможливорює хімічну реакцію між титановим сплавом та елементами, що містяться в атмосфері.

ВИСНОВКИ

В процесі роботи над кваліфікаційною роботою було проведено:

1. Аналіз умов роботи деталі і призначені вимоги до властивостей матеріалу деталей.

2. Проведено аналіз матеріалів та технологій для виготовлення деталі бронепластина і обраний кольоровий легований титановий сплав ВТ6.

3. Розроблена маршрутна технологія металургії титану, отримання напівфабрикату – листового прокату, визначено спосіб отримання заготовки – вирубування в штампі.

4. Проаналізований взаємозв'язок між хімічним складом, структурою і властивостями сплаву ВТ6 і визначено оптимальні режими термічної обробки.

Термообробка сплаву ВТ6 складається з:

- відпалювання – для підготовки напівфабрикату до пластичного деформування – вирубування в штампі. Структура ВТ6 після відпалювання: змішана (дулексна) структура, представлена первинними зернами з α -фази і β -перетвореної тонкопластинчастої матриці – забезпечує поєднання в'язкості, пластичності, міцності.

- гартування – для отримання пересиченої легувальними елементами мартенситної α' фази і β -фази, кількість β -фази має бути максимальна

- старіння – дисперсне зміцнення - при ньому α' фаза та β -фаза розпадаються з утворенням нових фаз: α і α' ; α' і β або α і β .

При старінні зародження зміцнювальних фаз відбувається на дислокаціях, що в кінцевому підсумку призводить до структури, представленої дуже дрібними рівномірно розподіленими частинками α -фази в β -матриці, а міцність отримується за рахунок збільшення кількості границь між фазами і опору руху дислокацій від цього.

5. Вибраний нагрівальний пристрій для проведення термічної обробки сплаву ВТ6 – вакуумна піч з викочуваним подом. Піч дозволяє провести всі

види термічної обробки титанового сплаву без взаємодії з хімічними елементами, що містяться в повітрі.

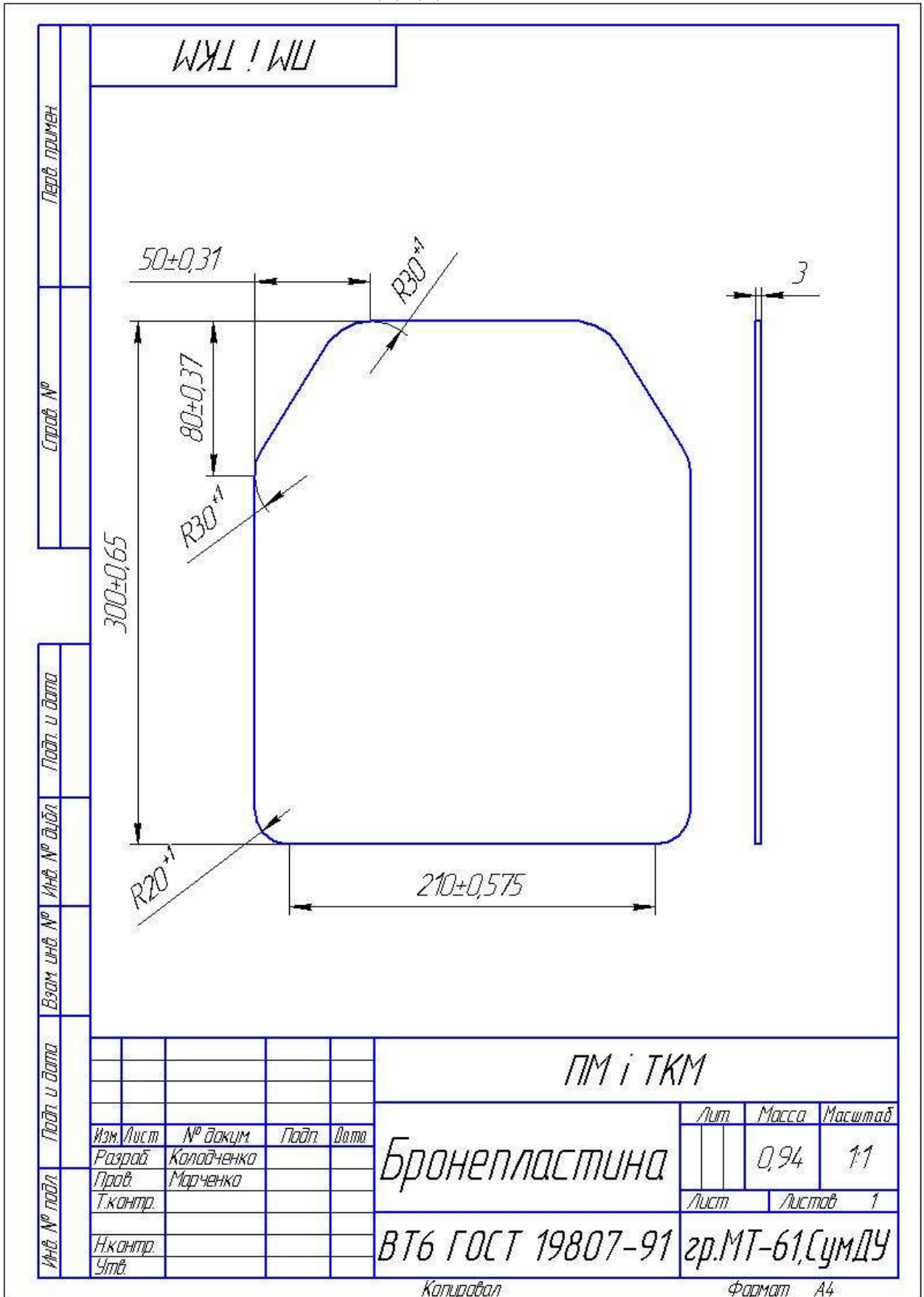
6. Якість проведеної термічної обробки контролюють за допомогою мікроструктурного аналізу на металографічному мікроскопі МІМ7, серед властивостей контролюємо ударну в'язкість випробуванням на копрі КМ-30.

ЛІТЕРАТУРА

1. Розробка класифікації бронезилетів за різними видами: веб-сайт. URL: https://er.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/8466/1/Zbirnyk_Herson_Bobrova%202017.pdf.
2. ДСТУ 8782:2018. Нові класи захисту бронезилетів : веб-сайт. URL: <https://uarm.co/ua/baza/porady/60.html>.
3. Бхатнагар А. Лёгкие баллистические материалы: Москва: ЗАО "РИЦ "Техносфера", 2011. 392 с.
4. И.Ф. Кобылкин В.В Селеванов. Материалы и структуры легкой бронезащиты : Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 192 с.
5. Чим британців підкорила українська технологія 3D-друку на металевому дроті : веб-сайт. URL: <https://business.ua/company-news/5699-chim-britantsiv-pidkorila-ukrajinska-tekhnologiya-3d-druku-na-metalevomu-droti>.
6. 3D-друк: веб-сайт. URL: https://fmat.io.ua/s2302326/informaciyni_tehnologie_poligrafichnoe_roboto_tehniki
7. Нові напрямки застосування алюмінідів титану : веб-сайт. URL: <https://tst.stu.cn.ua/index.pl?task=arcls&id=44>.
8. Колачев Б.А. , Ливанов В.А., Елагин В.И Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов Учебник для вузов. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: МИСИС, 1999. 416 с.
9. Методи випробовування механічних властивостей металів : веб-сайт. URL: <http://www.znanius.com/104.html>
10. Металографічні дослідження : веб-сайт. URL: <https://cpdk.com.ua/uk/service/metalografichni-doslidzhennya>.
11. Металографічні дослідження металу : веб-сайт. URL: <http://ua.tuev-dieks.com/services/technical-diagnosis/methods-of-survey/metalograficheskie-issledovaniya-metalla/>.
12. Білокур І. П. Основи дефектоскопії: Підручник.: «Азимут-Україна», 2004. 496 с.
13. В.С. Золоторевский, [и др.] ; том 2: Изд. Дом МИСиС, 2014. 528 с.
14. Производство титана : веб-сайт. URL: <https://metalspace.ru/education-career/osnovy-metallurgii/proizvodstvo-tsvetnykh-metallor/542-proizvodstvo-titana.html>.
15. А.М. Верховлюк, А.В. Нарівський, В.Г. Могилатенко / За ред. академіка НАН України В.Л. Найдека Технології одержання металів та сплавів для

- ливарного виробництва: Навч. посібник ..: Видавничий дім “Вініченко”, 2016. 224 с.
16. В. А. Лебедев, Д. А. Рогожников. Металлургия титана : учеб. пособие : Екатеринбург Издательство УМЦ УПИ, 2015. 194 с.
 17. А. Г. Илларионов, А. А. Попов. Технологические и эксплуатационные свойства титановых сплавов: учебное пособие Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2014. 137 с.
 18. Тарасов А.В. Металлургия титана Учебное пособие: Академкнига, 2003. 328 с.
 19. Седов Ю.Е., Адаскин А.М. Справочник молодого термиста. М.: Высш. шк., 1986. 239 с
 20. Термічна обробка титанових сплавів : веб-сайт. URL: <https://infopedia.su/2x6063.html>.
 21. Деформируемые титановые сплавы : веб-сайт. URL: <http://refleader.ru/polatymmermerbew.html>.
 22. Седов Ю.Е. Справочник молодого термиста. / Седов Ю.Е., Адаскин А.М., 1986. – 239 с.
 23. И.И. Новиков і інш. Металловедение : учеб . В 2 т. Т. 2. Термическая обработка. Сплавы , вид-во: НИТУ МИСиС:2014. 528 с
 24. БУДНИК А.Ф. Типове обладнання термічних цехів та дільниць: Навчальний посібник. Суми: Вид-во СумДУ, 2008. 212 с.
 25. Марочник сплавов: VT6 : веб-сайт. URL: http://metallicheckiy-portal.ru/marki_metallov/tit/VT6.

ДОДАТОК А



Перв. примеч.
Стр. №
Подп. и дата
Инв. № д.д.д.
Взам. инв. №
Подп. и дата
Инв. № подл.

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.		Колобченко		
Пров.		Марченко		
Т.контр.				
Н.контр.				
Утв.				

<i>ПМ і ТКМ</i>		
Бронепластина		
Лист	Масса	Масштаб
	0,94	1:1
Лист	Листов 1	
ВТ6 ГОСТ 19807-91 зр.МТ-61,СумДУ		

Копіював

Формат А4

ДОДАТОК Г

ЗІБ — Засоби Індивідуального Бронезахисту

кр — Критична

КМ — Композиційні матеріали

Екв — еквівалент

FDM (Fused deposition modeling)

КМК — Капілярний Метод Контролю

САНД