

Міністерство освіти і науки України

Запорізький національний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні

(назва факультету)

Кафедра металургійних технологій, екології та техногенної безпеки

(повна назва кафедри)

*З урахуванням  
17.05.2023*

## Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи бакалавра

рівень вищої освіти перший (бакалаврський) рівень  
(перший (бакалаврський) рівень)

на тему Технологічні особливості удрування титанових  
відходів

Виконав: студент 5 курсу, групи МСТ-18-103

Цупченко Т.Е.  
(ПІБ)

ЦФ  
(підпис)

спеціальності

136 Металургія

(шифр і назва)

спеціалізація

(шифр і назва)

освітньо-професійна програма

Металургія

(шифр і назва)

Керівник Нестеренко Т.М.

(прізвище та ініціали)

ТМ  
(підпис)

Рецензент

Валер Т.М.

(прізвище та ініціали)

ТМ  
(підпис)

Запоріжжя - 2023 року



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ  
ім Ю.М. ПОТЕБНІ

Кафедра металургійних технологій, екології та техногенної безпеки

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський) рівень  
перший (бакалаврський) рівень

Спеціальність 136 Металургія  
(шифр і назва)

Освітньо-професійна програма Металургія  
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри М.П.Е.П.Б.  
Ю.О. Белокоп

“ 25 ” 12 2023 року

ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЕКТ) СТУДЕНТУ

Ципленко Тетяна Євгенівна  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Технологічні особливості зварювання титанових відходів

керівник роботи (проекту) Гестеренко Тетяна Миколаївна, к.т.н., доцент  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “29” травня 2022 року № 1894-С

2. Строк подання студентом роботи (проекту) 19.05.2023

3. Вихідні дані до роботи (проекту) Титанове стружка забруднена маслом, емальсією, сторонніми предметами, уламками різців, які не мають магнітних властивостей, може бути зварюваною технологією, перевищує встановлені розміри.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Реферат. Вступ. Загальна частина. Технологічна частина. Конструкційна частина. Охорона праці та техногенна безпека. Перелік джерел посилання.



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

Креслення, презентаційний матеріал 11 слайдах (на 11 сторінках)

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата
		завдання прийняв
Загальна частина	Гестеренко Т. М., доцент	<i>Мем</i> 20.05.2023
Технологічна частина	Гестеренко Т. М., доцент	<i>Мем</i> 20.05.2023
Конструкційна частина	Гестеренко Т. М., доцент	<i>Мем</i> 20.05.2023
Осередок праці та технологічна безпека	Гестеренко Т. М., доцент	<i>Мем</i> 20.05.2023
Нормоконтроль	Белокоць Ю. О., завідувач кафедри	<i>ББ</i> 20.05.2023

7. Дата видачі завдання 29.12.2022

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Вступ	15.05. - 21.05.2023	Виконано
2	Держат	15.05. - 21.05.2023	Виконано
3	Загальна частина	20.03. - 26.03.2023	Виконано
4	Технологічна частина	27.03. - 09.04.2023	Виконано
5	Конструкційна частина	10.04. - 16.04.2023	Виконано
6	Осередок праці та технологічна безпека	17.04. - 23.04.2023	Виконано
7	Висновки	01.05. - 07.05.2023	Виконано

Студент

*ЦП*  
(підпис)

*Т. Е. Циланко*  
(прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи)

*Мем*  
(підпис)

*Т. М. Гестеренко*  
(прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

Розрахунково-пояснювальна записка: 74 с., 8 табл., 12 рис., 23 джерела.

АПАРАТ ГІДРУВАННЯ, ВОДЕНЬ, ВІДХОДИ, ГІДРУВАННЯ, РЕТОРТА, ТИТАНОВА СТРУЖКА, ШАХТНА ЕЛЕКТРОПІЧ.

Тема кваліфікаційної роботи бакалавра: Технологічні особливості гідрування титанових відходів.

Мета роботи – вивчення технологічних особливостей та розробка технології гідрування титанової стружки для повернення її в колообіг титану.

У розділі «Загальна частина» розглянуто діаграму стану системи титан – водень, дифузію водню в титан та механізм водневої крихкості титану; надано характеристику та фізико-хімічні властивості гідриду титану; описано класифікацію і напрями утилізації титанових відходів.

У розділі «Технологічна частина» розглянуто особливості гідрування титану та його сплавів і вплив домішок, сфери застосування процесу гідрування в промисловості та дослідницькій практиці, особливості дегідрування титанових матеріалів, особливості технології гідрування титанових відходів та їх підготовки до гідрування; розроблено технологічну схему гідрування титанової стружки, описано технологію гідрування титанової стружки; складено розрахунки матеріального балансу по елементу титану і повного матеріального балансу процесу гідрування титанової стружки. Визначено витратні коефіцієнти для сировини і матеріалів.

У розділі «Конструкційна частина» здійснено вибір та описано конструкцію і принцип дії шахтної печі для гідрування титанових відходів, наведено розрахунки апарата гідрування, складено розрахунок теплового балансу апарата гідрування титанових відходів. Визначено потужність печі.

У розділі «Охорона праці та техногенна безпека» проаналізовано шкідливі та небезпечні виробничі фактори процесу гідрування титанової стружки. Розроблено заходи щодо поліпшення умов праці.



## ЗМІСТ

Вступ.....	7
1 Загальна частина.....	9
1.1 Діаграма стану системи Ti – H .....	9
1.2 Теорія хімічного зв'язку у системі Ti – H.....	11
1.3 Дифузія водню в титан .....	14
1.4 Фізико-хімічні властивості гідриду титану.....	16
1.5 Механізм водневої крихкості титану .....	19
1.6 Класифікація і напрями утилізації титанових відходів .....	20
2 Технологічна частина .....	23
2.1 Особливості гідрування титану та його сплавів. Вплив домішок.....	23
2.2 Особливості процесу дегідрування титанових матеріалів.....	27
2.3 Застосування процесу гідрування титану в промисловості і дослідницькій практиці.....	29
2.4 Особливості технології гідрування титанових відходів.....	32
2.5 Підготовка відходів титану до гідрування.....	36
2.6 Технологічна схема гідрування титанової стружки .....	38
2.7 Опис технології гідрування титанової стружки.....	43
2.7.1 Підготовки установки до процесу гідрування і монтажу апарата .....	43
2.7.2 Опис технології процесу гідрування титанової стружки .....	45
2.8 Розрахунок матеріального балансу процесу гідрування титанової стружки.....	47
3 Конструкційна частина .....	51
3.1 Конструкція шахтної печі для гідрування титанових відходів.....	51
3.2 Розрахунок апарата гідрування .....	56
3.3 Розрахунок теплового балансу апарата гідрування титанових відходів.....	59
4 Охорона праці та техногенна безпека .....	64



4.1 Шкідливі та небезпечні фактори під час гідрування титанової стружки.....	64
4.2 Заходи щодо усунення шкідливих та небезпечних факторів виробничого середовища .....	66
Загальні висновки.....	72
Перелік джерел посилання.....	73



## ВСТУП

В промисловій практиці процес гідрування титану використовують як проміжну стадію під час отримання металевого порошку, а також для виробництва товарного гідриду титану.

В основу класифікації гідридів металів покладено багато різних принципів, починаючи від зовнішнього вигляду, агрегатного стану і закінчуючи характером хімічного зв'язку і характером змінення поглинання водню при нагріванні. Гідридів кольорових металів застосовують як паливо та джерело водню, для отримання елементів високої чистоти та покриттів, для захисту від нейронів, застосовують в порошковій металургії і ядерній техніці. З розвитком електронної техніки гідрид титану почали вживати як припій для з'єднання керамічних і металевих деталей та відновник оксидів. У металокерамічному виробництві використовується для активації спікання і збільшення щільності виробів.

Технологію гідрування різноманітних титанвмісних матеріалів досліджено та описано у багатьох роботах [1-3]. Проте в останні роки зростає кількість робіт щодо вивчення особливостей процесу гідрування титанвмісної сировини. Це пов'язано тим, що використання в порошковій металургії гідриду титану, порівняно з порошком титану, разом з додаванням легуючих елементів у вигляді лігатур дозволяє поліпшити синтез, хімічну гомогенність, однорідність мікроструктури, забезпечити підвищену відносну щільність, високі механічні властивості виробів із зниженням їх собівартості [4,5].

На швидкість гідрування титану впливають тип титанової сировини, її питома поверхня, стан і чистота [1,6,7]. Для промислових сплавів титану швидкість реакції поглинання водню матеріалом зменшується у ряду (зліва направо) VT-1, VT-15, VT-5, VT3-1, VT-3, VT5-1, VT-10, VT-6. Зростання вмісту алюмінію і хрому в бінарних сплавах Ti – Al і Ti – Cr знижує поглинання водню титаном під час гідрування. Крім того, подвійні сплави титану з хромом насичуються воднем під час гідрування більш активно, ніж Ti – Al-сплави. β-



сплави титану (сплави системи Ti – Cr) поглинають водень активніше, ніж сплави титану з  $\alpha$ -структурою (сплави системи Ti – Al).

Вплив тиску на вміст водню у титанових зразках, оброблених різними способами, різко відрізняється. Якщо кінетика гідрування неокислених титанових матеріалів визначається величиною поверхні, кількістю та типом легуючих добавок, величиною та формою мікрозерна, режимом проведення процесу, то на кінетику процесу гідрування відходів титанових матеріалів домінуючий вплив має стан окисного шару (ступінь окислення).

Метою кваліфікаційної роботи бакалавра є вивчення технологічних особливостей та розробка технології гідрування титанової стружки для повернення її в колообіг титану.

Завдання кваліфікаційної роботи бакалавра роботи:

1. Вивчити властивості титану і сполук на його основі. Проаналізувати напрями використання гідриду титану.

2. Вивчити класифікацію титанових відходів. Проаналізувати напрями утилізації титанових відходів.

3. Проаналізувати способи гідрування титанової стружки.

4. Вибрати і розрахувати апарат для гідрування титанової стружки. Описати конструкцію апарата гідрування.

5. Розрахувати матеріальний баланс процесу гідрування підготовленої титанової стружки.

6. Розрахувати тепловий баланс процесу гідрування підготовленої титанової стружки.

7. Вивчити особливості та розробити технологію гідрування титанової стружки для повернення її в колообіг титану.



## 1 ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА

### 1.1 Діаграма стану системи Ti – H

Гідрид титану відноситься до великого класу сполук, що характеризуються певними законами отримання і властивостями. Гідрування є окремим випадком гетерогенних реакцій газ – метал, але в той же час характеризується своїми, тільки йому властивими особливостями. Отримання і властивості гідриду титану є яскравим прикладом усіх закономірностей, властивих класу гідридів.

Оскільки вміст водню в гідриді залежить одночасно від тиску і температури, стан системи метал – водень повинна відбивати потрібна діаграма концентрація – температура – тиск. Проте із-за складності вираження її на площини і використання найчастіше застосовують діаграму концентрація водню – температура при атмосферному тиску.

Водневмісні  $\alpha$ - і  $\beta$ -фази є твердими розчинами водню в  $\alpha$ - і  $\beta$ -титані. Уперше систему титан – водень детально вивчив Хегг методом рентгеноструктурного аналізу і знайшов, що  $\alpha$ -твердий розчин існує до 33 % (ат.), а  $\beta$ -твердий розчин – в області концентрації 47,4–64,2 % (ат.). Було виявлено появу ліній зрушень в мікроструктурі титану і багатих титаном сплавів, що мали структуру  $\alpha$ -твердого розчину після тривалого відпалу в середовищі водню [1-3].

При поглинанні водню температура фазового переходу з  $\alpha$ - в  $\beta$ -фазу різко знижується від 885 °C до 335 °C [4]. Отже, водень стабілізує  $\beta$ -фазу. За температури 335 °C відбувається евтектоїдне розкладання  $\beta$ -фази на  $\alpha$ - і  $\gamma$ -фази. Евтектоїдна точка, за даними різних авторів, лежить в межах від 36 % (ат.) до 38 % (ат.) водню (рис.1.1) [4].

Маквілен встановив в системі Ti – H існування трьох фаз:  $\alpha$ -твердий розчин водню в гексагональному титані з щільно упакованими ґратами;  $\beta$ -

модифікація, в основі якої лежить сполука  $TiH_2$  (до 2,0 % водню), і  $\gamma$ -фаза на основі дигідриду титану (4,04 % водню).

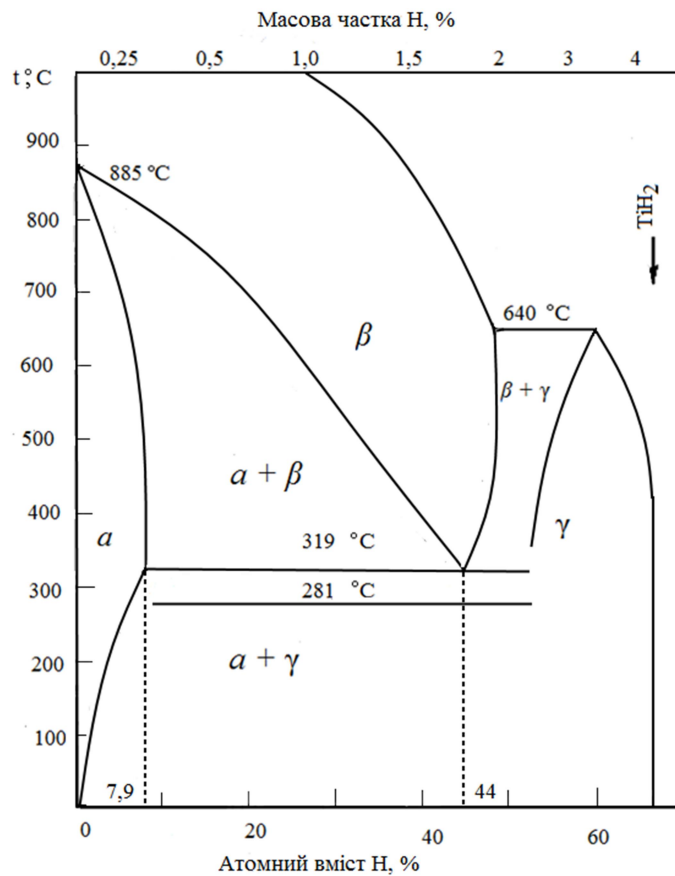


Рисунок 1.1 – Діаграма стану системи  $Ti - H$

Леннінг встановив евтектоїдний розпад  $\beta$ -фази на  $\alpha$ - і  $\gamma$ -фази при 320 °С. Методом вивчення мікроструктури він виявив явище старіння для зразків титану, загартованих до 400 °С перед гідруванням (малі кількості водню сильніше знижують ударну в'язкість зразків що відпалюють, чим загартованих, що пояснює існування твердих розчинів водню в титані вище за температуру евтектоїдного розкладання), що пізніше було підтверджене радіографічним методом із застосуванням тритію. За даними Ленінга, максимальна розчинність водню в титані в твердому стані дорівнює 0,2 % водню і зазнає різку зміну з пониженням температури, доходячи до нульового значення при 125 °С. Виходячи з цього, він припускає існування нижчого гідриду.



Діаграму стану системи Ti – H вивчав Кестер, за даними якого, крива розчинності плавно опускається вниз без якого-небудь розриву, а максимальна розчинність водню в титані складає при 300 °C приблизно 0,13 % водню. В системі Ti – H існує три фази:

$\alpha$  – твердий розчин водню в гексогональному титані з щільно упакованою решіткою;

$\beta$  – модифікація, в основі якої лежить сполука TiH (до 2,0 % водню),

$\gamma$  – фаза на основі гідриду титану (4,04 % водню).

Гідрид титану  $\gamma$  – фаза, утворюється в результаті розпаду  $\beta$  – фази при температурі 320 °C.

Гідрид титану стехіометричного складу (66,67 % (ат.) чи 4,04 % водню) отримано Гібом і Крушвицем [4,7]. Вони вказали на нестійкість гідриду титану при температурі вище 400 °C і відмітили, що він є метастабільною сполукою.

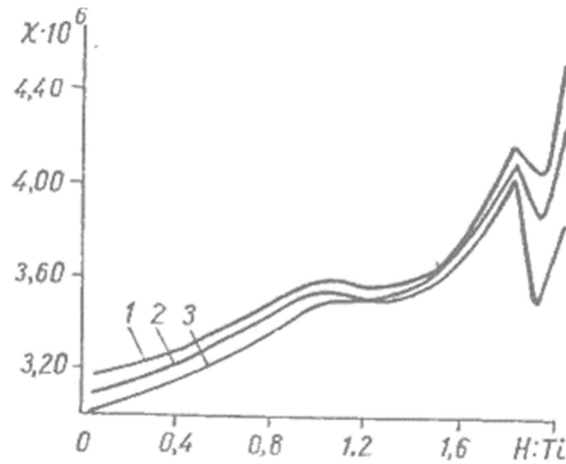
Вивчення діаграми стану системи Ti – H ускладнене термічною дисоціацією, що пояснює суперечність отриманих результатів. З цієї ж причини практично не вивчені потрібні діаграми типу Ti – Me – H, хоча саме такі системи цікаві для теорії і практики гідрування сплавів титану.

## 1.2 Теорія хімічного зв'язку у системі Ti – H

Про природу гідридів перехідних металів, зокрема гідридів титану, існує багато суперечливих думок. Відмічено, що в системі Ti – H при високих концентраціях водню утворюється твердий розчин. В той же час в системі Ti – H при високому вмісті водню існує фаза бертолідного типу, основою якої є TiH<sub>2</sub>. Відмічено також, що за звичайних умов утворюється сполука TiH<sub>1,75</sub>, що є твердим розчином TiH і TiH<sub>2</sub>.

Для глибшого розуміння сучасних точок зору на природу хімічного зв'язку в системі Ti – H вивчалися у деяких роботах [4,5,7] продуктів гідрування титану та порівнювалися магнітні властивості гідридів титана і паладію.

Паладій виявляє зі збільшенням вмісту водню лінійне зменшення магнітної сприйнятливості, яка при складі  $\text{PdH}_{0,64}$  стає практично рівною нулю. Результат цей інтерпретується заповненням 0,6 дірок на атом в d-зоні паладію електронами, відданими розчиненим і іонізованим.



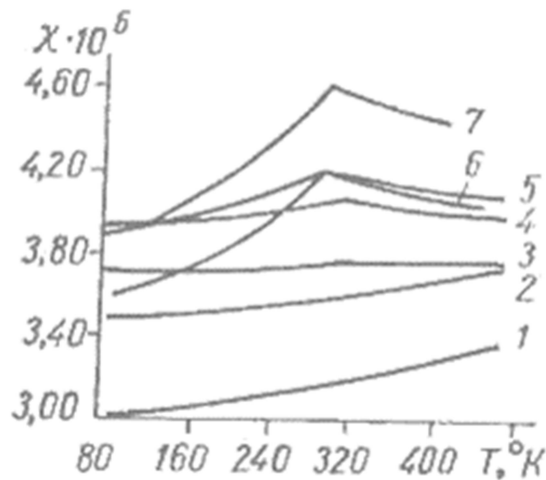
1 — 290 К; 2 — 230 К; 3 — 80 К

Рисунок 1.2 – Концентраційна залежність магнітної сприйнятливості титану, що гідрується [4]

Порівнянно з паладієм титан має в d-зоні менше число електронів, що становить приблизно три електрони на атом, а в гідридах це число зростає. У перехідних металах, як відомо, має місце сильне сполучення електронних оболонок сусідніх атомів металу. Безпосереднім доказом наявності таких сполученні можуть служити криві  $\chi = f(t)$  (рис. 1.3), титані у вигляді надзвичайно рухливих атомів [5]. У титані, що гідрується, відсутня їх жорстка локалізація.

Відмічено також, що в системі  $\text{Ti} - \text{H}$  внаслідок збільшення міжатомних відстаней в гідридній фазі збільшується магнітна сприйнятливості і на кривих температурної і концентраційної залежностей магнітної сприйнятливості з'являються максимуми, характерні для антиферомагнітних речовин (рис. 1.3). Такі зміни в магнітних властивостях, показують, що атоми водню переходять в процесі розчинення в іонний стан. Антиферомагнетизм гідриду титану обумовлений обміном електронами між катіонами титану, причому аніони

водню діють як посередники: s-електрони переходять від атомів водню на d-орбіту сусіднього катіона та ін.



1 – металічний титан; 2 –  $TiH_{1,00}$ ; 3 –  $TiH_{1,35}$ ;  
4 –  $TiH_{1,73}$ ; 5 –  $TiH_{1,805}$ ; 6 –  $TiH_{1,94}$ ; 7 –  $TiH_{1,98}$

Рисунок 1.3 – Температурна залежність магнітної сприйнятливості гідриду титану [5]

Показано також, що при розчиненні водень викликає майже лінійне розширення кристалічної решітки металу і падіння щільності. Розширення кристалічної решітки титану при гідруванні супроводжується її спотворенням тетрагона. Структурні кубічні для тетрагона перетворення в гратах наводненого титану помічені при температурі  $310 \pm 4$  K [5].

У металевих сполуках має місце делокалізація валентних пар електронів між атомами в кристалічній решітці металів, яка відбувається і при гідруванні перехідних металів, що свідчить про металізацію водню в гідридах перехідних металів.

За даними, теплота утворення гідриду титану лінійно зростає зі збільшенням змісту водню в титані в області гомогенності цієї фази. Це можна пояснити підвищенням вірогідності утворення зв'язків H:H і відповідним посиленням асиметрії розподілу електронної щільності в гратах гідриду (останнє положення висловлене Г. В. Самсоновим [4,5]).



При гідруванні перехідних металів утворюється водневий зв'язок між комбінованим атомом водню з частково позитивним зарядом і атомом з частково негативним зарядом, що мають орбіту з неподіленою парою електронів. Показано, що водень знаходиться в титані у вигляді надзвичайно рухливих атомів. У титані, що гідрується, відсутня їх жорстка локалізація.

Як найповніший аналіз характеру хімічного зв'язку між воднем і перехідними металами показує, що необхідно враховувати не лише акцепторну здатність атома перехідного металу і іонізаційний потенціал атома водню, але також схильність атомів водню до утворення ковалентного зв'язку. Обмінна взаємодія між атомами металу значною мірою носить ковалентний характер. У міру d-електронного рівня зростає доля електронів, що беруть участь в утворенні ковалентного зв'язку.

### **1.3 Дифузія водню в титан**

Дифузія водню в титан і кінетика гідрування титану – це питання, які неодноразово вивчалися. Незважаючи на фундаментальність постановки експериментів і ретельність обробки досвідчених даних, результати окремих досліджень розходяться. Не зупиняючись на усіх роботах, в яких висвітлено питання дифузії водню в титан, відмітимо деякі, на думку авторів, найцікавіші. Попутно вкажемо на деякі особливості процесу гідрування титану.

Швидкість дифузії водню в об'ємі титану надзвичайно висока і швидкість поглинання водню титаном визначається, в першу чергу, швидкістю вступу водню на поверхню металу. Розміри і форма зразків, що піддалися гідруванню, також істотно впливають на швидкість поглинання водню титаном.

При розгляді дифузії водню титаном необхідно вказувати чистоту металу і спосіб його отримання. Магнієтермічний титан, маючи дуже розвинену загальну поверхню, має незначну активну поверхню, зважаючи на наявність в порах металу домішок кисню, азоту, хлору та ін. Невеликі кількості хлориду магнію, що містить кристалогідратну воду, служать головною причиною

забруднення титану шкідливими для гідрування домішками. Магнійтермічний титан максимально поглинає водень в інтервалі температур 550-650 °С [2,5].

Процес гідрування електролітичного титану дещо відрізняється від процесу гідрування йодідного і магнійтермічного титану. При катодному осадженні титану одночасно утворюються як пластинчаті кристали, так і витягнуті голкоподібні і губчасті зростки, причому фракційний склад електролітичного титану дуже різноманітний. При електрокристалізації титану на катоді утворюються двовимірні зародки, які стають основою для отримання шару дрібнодисперсного титану, що є проміжним між катодом і основним шаром електролітичного металу.

Таблиця 1.1 – Залежність хімічного складу електролітичного титану від умов гідрування [5]

Фракція електролітичного титану, мкм	Умови гідрування			Хімічний вміст титанових матеріалів, %			
	t, °C	τ, год	P <sub>H2</sub> , атм	H	O	N	Fe
140-100	-	-	-	0,03	0,005	0,023	0,030
	700	0,5	0,3-0,5	2,70	0,030	0,080	0,0035
	600	0,5	0,3-0,5	3,60	0,030	0,080	0,045
	500	0,5	0,3-0,5	2,50	0,028	0,075	0,035
	400	0,5	0,3-0,5	1,50	0,030	0,100	0,050
	Ступеневе зниження від 600 до 350	3,0	0,5-0,6	3,98	0,020	0,070	0,060
56	-	-	-	0,03	0,019	0,038	0,030
	400	0,5	0,3-0,5	2,30	0,028	0,050	0,100
	600	0,5	0,3-0,5	3,50	0,040	0,070	0,180
	400	0,5	0,3-0,5	1,60	0,021	0,041	0,080

Форма, а також розміри кристалів титану залежать від цілого ряду чинників: локальних змін катодного потенціалу, вмісту іонів титану в електроліті, розподілу силових ліній електричного поля, міжполюсної відстані і соосадження домішок. Така особливість електролітичного титану веде до того, що після гідрометалургійної переробки якість металу різна : не лише різні

фракції мають різний склад, але і проби, відібрані від однієї фракції, нерідко відрізняються за змістом домішок (особливо кисню, азоту і хлору). Поза сумнівом, що це позначається на процесі гідрування електролітичного титану.

Автори роботи [5] спробували відібрати фракцію електролітичного титану з однаковим складом і однієї форми і прогідриувати її при різних температурах спектрально чистим воднем. Результати дослідів (табл. 1.1) свідчать про те, що оптимальна температура гідрування електролітичного титану дорівнює 600 °С (витримка близько 0,5 год, тиск водню 0,3-0,5 атм.).

Отже, абсорбція водню титаном залежить від таких чинників, як розміри і форма зразка, що гідрується, вміст і природа домішок в титані, стан поверхневого шару, величина макро- і мікрозерна, температура і час процесу, тиск водню при гідруванні, наявність мікротріщин і напруженого стану, характер попередньої термічної і пластичної обробки матеріал, пористість, спосіб отримання і інші [8].

#### 1.4 Фізико-хімічні властивості гідриду титану

Гідрид титану  $TiH_2$  – крихка, бінарна хімічна сполука металу титану з воднем. Гідрид титану стехіометричного складу стійкий тільки під тиском водню в 98066,5 Па і температурі 400 °С (табл.1.2).

Таблиця 1.2 – Властивості гідриду титану [1-3]

Характеристика	Показник
Молярна маса, г/моль	49,915
Агрегатний стан	тверда речовина
Забарвлення	сірувато-чорний порошок
Масова частка водню, %	4,04
Щільність, г/см <sup>3</sup>	3,76
Температура розкладання, °С	300
Температура СВС плавлення, °С	432
Молярна теплоємність, Дж/(моль·К)	7,19
Магнітна сприйнятливність	$4,58 \cdot 10^{-6}$

Гідрид титану існує в двох кристалічних модифікаціях:



- тетрагональна, просторова група з параметрами решітки  $a = 0,4528$  нм,  $c = 0,4279$  нм при температурі нижче  $37$  °С;

- кубічну гранецентровану решітку типу флюориту  $\text{CaF}_2$  з параметром решітки  $a = 0,4454$  нм при температурі вище  $37$  °С.

Дослідження хімічної стійкості гідриду титану представляє як теоретичний (для вивчення механізму процесів, що протікають при контакті гідриду з кислотами і лугами), так і практичний інтерес. Так, розроблений комбінований метод розділення компонентів титанових сплавів, ґрунтований на зв'язуванні титану в гідрид і подальшому гідрометалевому відділенні легуючих елементів [6]. Для успішного застосування вказаного способу необхідно знати розчинність гідриду титану в різних кислотах і лугах.

Первинне значення мають результати дослідження поведінки гідриду титану в кислотах при пасивації титану і сплавів на його основі, оскільки явище пасивації титану в кислотах пов'язане з утворенням гідриду в поверхневому шарі металу. Саме у зв'язку з вивченням корозійної стійкості титана і його пасивації в кислотах в літературі представлені зведення про хімічну стійкість гідриду титану.

У розділі приведені результати горотворення при кислотному розчиненні титану і залежність розчинності гідриду титану від змісту водню в матеріалі (міри гідрування). Ці відомості потрібні не лише як орієнтовні дані про хімічні властивості гідриду титану, але і як обґрунтування можливості застосування термохімічного методу для вивчення систем  $\text{Ti} - \text{H}$  і  $\text{Ti} - \text{Me} - \text{H}$ .

Титан практично не кородіє в азотній кислоті навіть при спільній дії високих температур і тисків. У дуже концентрованих розчинах кислоти, насичених оксидами азоту, а також з підвищенням температури швидкість корозії титану значно зростає. У сірчаній кислоті титан має низьку стійкість і зберігає стійкість тільки до  $5\%$   $\text{H}_2\text{SO}_4$ . У соляній кислоті при кімнатній температурі титан стійкий тільки до  $5\%$  концентрації кислоти [6]. Розчинення титану в соляній кислоті протікає з деяким гальмуванням в часі, пов'язаним з

пасивацією. При підвищенні температури швидкість корозії титану в соляній кислоті різко зростає.

У фосфорній кислоті до 30 % концентрації при температурі 35° С титан стійкий, а при підвищенні температури межа стійкості титану зміщується у бік менших концентрацій. Найбільш агресивним середовищем по відношенню до титану є фтористоводнева кислота: швидкість корозії проходить через максимум, що, ймовірно, обумовлено утворенням захисної плівки, яка складається з гідриду титану. Титан нестійкий в деяких органічних кислотах ( в киплячій 100 % трихлороцетовою, 50 % лимонною, шавлевою при підвищених температурах), але стійкий в молочній, дубильній і винній кислотах.

Гідрид титану - твердий крихкий порошок сірого кольору щільністю 3,76 г/см<sup>3</sup>, по своїй фізичній природі відноситься до фаз змінного складу зі зміною вмісту водню від 52 % до 67 % (ат.). Він має кубічні гранецентровані ґрати типу CaF<sub>2</sub> з періодом  $4,440 \pm 0,003 \text{ \AA}$ , що зазнає незначне спотворення тетрагона при вмісті водню 62 % (ат.). Водень в кубічних ґратах займає порожнечі тетраедрів в положеннях  $\pm 1/4, 1/4, 1/4; \pm 1/4, 3/4, 3/4; \pm 3/4, 1/4, \pm 3/4, 3/4, 1/4$ , параметри ґрат тетрагона а - 4,42, с = 4,18 Å, с/а = 0,94 [6,7].

Термічна стійкість гідриду титану залежить від складу гідриду. Була досліджена дисоціація, що проводилася при тиску 5 мм.рт.ст і концентрації водню до 66,7 % (ат.). Нахил прямих (рис.1.4), а отже, і теплота дисоціації сильно залежать від концентрації водню.

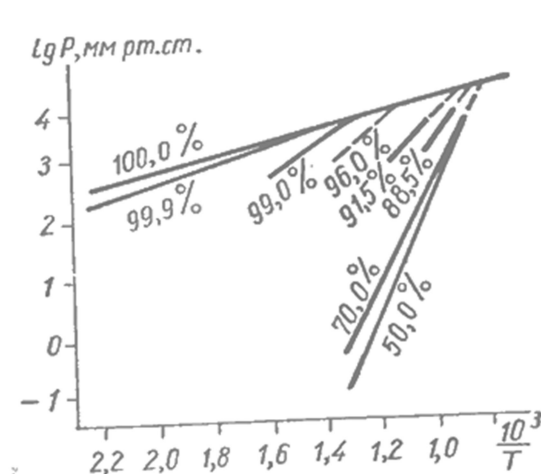


Рисунок 1.4 – Тиск дисоціації гідриду титану з різним вмістом водню

Визначена стійкість гідриду титану у вакуумі. Встановлено, що дисоціація  $TiH_{1,98}$  починається при температурі біля  $400^{\circ}C$  і при подальшому підвищенні температури різко зростає [7]:

t, °C	50	100	200	300	400	500	550	600
P, мм. рт.ст.	0	1,1	3,8	10,9	15,2	230,6	714,0	1764,0

### 1.5 Механізм водневої крихкості титану

Водневе окрихчування ( $\alpha+\beta$ )-сплавов, пов'язано з процесами, що відбуваються у поверхні розділу між  $\alpha$ - і  $\beta$ -фазами. При малих швидкостях розтягування наводороженого зразка протони переміщуються до поверхні розділу  $\alpha$ - і  $\beta$ -фаз з утворенням сегрегацій, що призводить до окрихчування. Рушійною силою цієї реакції, що зростає зі зменшенням температури, є витіснення водню  $\beta$ -фазою під дією тієї напруги, яка виникає в ній при накладенні навантаження.

Представляє інтерес гіпотеза сегрегацій водню, що виникають в мікрооб'ємах в результаті спрямованої дифузії водню під час пластичної деформації. В результаті спрямованої дифузії по межах  $\alpha$ - і  $\beta$ -фаз або в їх об'ємі утворюються мікрооб'єми, збагачені воднем, без порушення однорідності твердих розчинів. Такі мікрооб'єми створюються внаслідок тенденції водню скупчуватися у мікродефектів і меж зерен.

При певній концентрації водню в мікрооб'ємі може зародитися мікротріщина. Поза сумнівом, що цьому процесу сприяє недосконалість кристалічної будови. На водневу крихкість ( $\alpha+\beta$ )-сплавів накладаються також ефекти, пов'язані з розпадом пересичених розчинів в  $\alpha$ -фазі.

Окрихчування титану при гідруванні пов'язано з утворенням на межах зерен гідридної фази титану, що частково утрудняє дифузію водню в глиб зерна. При поглинанні водню титаном збільшується об'єм матеріалу із-за меншої щільності гідриду титану (щільність міняється від 4,52 при 0 ат.% Н до 3,91 г/см<sup>3</sup> при 40 ат.% Н). Останнє призводить до утворення мікротріщин в



матеріалі, які, зливаючись в макротріщини, викликають руйнування титану. Тріщини проходять по зерну і по місцях скупчень гідридів.

## **1.6 Класифікація і напрями утилізації титанових відходів**

Загальні ресурси металевих відходів титану і його сплавів складаються з відходів, що утворюються при виробництві губчастого титану, злитків, напівфабрикатів і виробів, а також амортизаційного брухту. Середній баланс утворення відходів, що переробляються титановою промисловістю показує, що з 100 % шихти, що надходить, у виробництво утворюється близько 75–80 % відходів, які треба утилізувати. Якщо цю кількість відходів прийняти за 100 %, тоді при виробництві злитків утворюється 20–22 % відходів за переробкою [9–11]. Від загальної кількості відходів, що утворюються, частка кускових відходів складає 25 %, листових – 20–30 % і стружки 45–55 %.

Титанові відходи утилізувалися по двох напрямках. Кондиційні титанові відходи у вигляді чистої неокисленої стружки, обрізків та інших видів дрібного скрапу шихтуються разом з губчастим титаном для виплавки злитків [9]. Некондиційні титанові відходи у вигляді окисленої або змішаної за марками сплавів стружки та обрізки, основна маса ливарних сплавів використовуються у виробництві феротитану, для розкислювання і легування сталі та в деяких інших сферах застосування титану, що вилучають титан з сфери його оборення. Частина некондиційних відходів переводиться в кондиційні відходи спеціальною обробкою.

За стандартом ДСТУ 3211–95 (ГОСТ 1639–93) відходи титану і титанових сплавів класифікуються на чотири основні класи [11]:

- а) клас А – брухт і кускові відходи титану і титанових сплавів;
- б) клас Б – стружка титану і титанових сплавів;
- в) клас З – листовий обріз титану і титанових сплавів;
- г) клас Г – шлаки та інші відходи титану і титанових сплавів.

Класи А, Б, З за хімічним складом поділяють на три групи:

I – титан чистий (нелегований);

II – сплави титану, леговані компонентами, окрім олова;

III – сплави титану, леговані оловом.

Відходи I групи можна використовувати під час виплавлення будь-якого титанового сплаву, відходи II і III груп – для тих сплавів, які відповідають марці сплаву відходів. Виділення в окрему групу сплавів, легованих оловом, зумовлено застосуванням титанових відходів в чорній металургії, де олово є шкідливою домішкою на відміну від інших легуючих елементів, що містяться в титанових сплавах.

За показниками якості кожену групу поділяють на сорти (наприклад, для класів А і З на чотири сорти, для класу Б на 3 сорти):

1-й сорт – неокислені відходи, які можна вводити в шихту для виплавки злитків первинних титанових сплавів без будь-якої підготовки.

2-й сорт – відходи, які після відповідної підготовки також можна використовувати в шихті;

3-й сорт і 2-й сорт титанової стружки для переплавлення на кондиційний метал не придатні і не застосовуються.

У брукхті та кускових відходах сортів 1, 1а, 2 не допускаються мастила, емульсії, сторонні предмети, технологічні змазки, відходи чорних і кольорових металів, нетитанові приробки. Прес-залишки від пресування, одержані під час виготовлення напівфабрикатів із заготовок, нагрітих у хлорбарієвих ваннах, або із застосуванням змазок, збирають і заготовляють за згодою із споживачами [6].

Характеристика та вимоги до стружки титану і титанових сплавів наведено у ДСТУ 3211-95. Для залучення в обіг титану до титанової стружки висувають такі вимоги. Стружка повинна бути:

- а) однієї марки сплаву, без кольорів мінливості.
- б) не забруднена маслом, емульсією, сторонніми предметами, уламками різців, які не мають магнітних властивостей,
- в) не бути гофрованою, волосоподібною, рулоноподібною.

Стружка є найбільш забрудненим видом титанових відходів оскільки під час утворення забруднюється залишками змащувальних і охолоджувальних рідин та окислюється.

Кількість мастила та вологи на поверхні стружки залежить від її товщини і може досягати до 30 % від її маси. Чим менша товщина стружки – тим більше мастила залишається на поверхні стружки (від 7,5 % до 30 %) [10].

Головна відмінність титану і його сплавів від відходів інших металів і сплавів полягає в тому, що вони в процесі утворення активно і технологічно безповоротно забруднюються газовими домішками, по-перше киснем і азотом. Крім того, титанові відходи дуже часто забруднено іншими металами і неметалами, а відходи різних марок титанових сплавів, як правило, перемішані між собою. Тому в основу якісної класифікації титанових відходів покладено принцип можливості або неможливості використання їх у шихті для виплавлення злитків первинних титанових сплавів. Такий поділ відходів титану та його сплавів щодо можливості використання відходів у шихті для виплавлення сплавів є умовним. За цією ознакою всі титанові відходи поділяють на кондиційні і некондиційні.

Кондиційні відходи після відповідної підготовки можна використовувати для підшихтовки в плавку для отримання титанових злитків. До них відносять відходи, що не змішані за марками сплавів і не мають на поверхні окисленого шару у вигляді кольорового забарвлення.

## 2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

### 2.1 Особливості гідрування титану та його сплавів. Вплив домішок

Одним з найбільш поширених методів отримання гідридів титану є безпосередня взаємодія металу з воднем. У лабораторних умовах гідрування здійснюють на установці Сивертса. Джерелом водню служить електролізер з нікелевими електродами і 15% КОН в якості електроліту. Очищення водню від пари і домішок кисню досягається пропусканням його через нагрітий до 400 °С платинований азбест, а потім – через твердий КОН і P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Видаляють вологу також виморожуванням, пропускаючи водень через трубки, що охолоджуються рідким азотом. Досконаліший спосіб отримання сухого водню полягає в прожаренні платинової черні, що заздалегідь гідрується, гідриду титана і гідриду урана.

Гідрид титану, що містить до 3,0 % водню, отримують відновленням двооксиду титану гідридом кальцію в атмосфері водню, а також в незначних кількостях - взаємодією титану при підвищених температурах з аміаком, парами води і деякими органічними речовинами. Цікавим способом отримання гідриду титану є освіта його в поверхневому шарі металу при контакті титану з розчинами деяких кислот.

На одному з металургійних заводів здійснено виробництво гідриду титану в напівпромисловому масштабі за технологією, розробленою інститутом ЦНДІЧормет. В якості початкових матеріалів використовують титановий порошок, виготовлений гідридно-кальцієвим методом з двооксиду титану, титанову губку магнієтермічного виробництва і електролітичний титан. Гідрування проводять в сталі X18H9T діаметром 273 мм, завдовжки 1200 мм при завантаженні реторти 45-50 кг з наступним оптимальним режимом: температура гідрування 500° С, час 1 год, витрату водню 2м<sup>3</sup>/год. Отриманий гідрид містить 3,4-3,5 % і поставляється у вигляді крупки (2-4 мм) або порошку (розмір часток 0,28 мм, насипна вага 0,8-0,9 г/см<sup>3</sup>).

Особливий інтерес представляє отримання гідриду титану у вигляді малопористих компактних зразків. У роботі описаний метод реакційного спікання при відносно низьких температурах (приблизно 600° С), в якому використовувалася теплота реакції взаємодії металу з воднем. Отримані зразки містили до 63 % (ат.) і мали пористість не більше 23-24 %. Для зменшення пористості рекомендується перед гідруванням провести спікання зразків у вакуумі при температурі 900 °С 60 хвилин.

Швидкість поглинання водню титаном залежить від величини макро- і мікрозерна. При зменшенні макро- і мікрозерна швидкість поглинання збільшується. На процес сорбції водню металом істотний вплив робить і вид зерен металу. Так, титан з витягнутих зерен активніше поглинає водень, чим титан рівноосний.

Кінетика сорбції водню компактным і пористим титаном при 300-800 °К і тиску  $1 \cdot 10^{-3} - 4 \cdot 10^{-5}$  мм.рт.ст. задовільно описується емпіричним рівнянням [6]:

$$\lg[(C - C_t)] = -k \cdot t \quad (2.1)$$

де  $C$  – рівноважна концентрація водню в поверхневому шарі металу;

$C_t$  – середня концентрація газу в металі у момент часу;

$t$  - час;

$k$  - постійна сорбції.

Орієнтовано  $k$  можливо виразити для компактного та пористого металу відповідним рівнянням:

$$k = -2,62 \cdot 10^{-2} \sqrt{P/l^{0.75}} \exp\left(-\frac{1500}{RT}\right) \quad (2.2)$$

$$k = -24.7 \cdot \sqrt{P/l} \exp\left(-\frac{13300}{RT}\right) \quad (2.3)$$

де  $P$  – тиск в мм.рт.ст.;

$l$  – товщина компактного металу;



T – температура, К.

В результаті численних досліджень показано, що чистісінький іодидний титану, такий, що відпалює у високому вакуумі, поглинає водень вже при кімнатній температурі, при чому швидкість абсорбції збільшується із зростанням температури і досягає максимуму при 300 °С. Кількість водню  $Q_t$ , поглиненого іодидним титаном за час  $t$ , складає [7]:

$$Q_t = V_0 \tau (1 - e^{-\frac{t}{\tau} P}) \quad (2.4)$$

де  $\tau$  – час зниження швидкості в  $l$  разів при  $P = 1$  мм.рт.ст.

Встановлено, що невеликий вміст кисню і азоту робить гідрид нестійким. При температурах вище 600 °С гідрид розкладається з виділенням водню і металевого титану. Кількість поглиненого водню пропорційна кореню квадратному з величини тиску, що свідчить про утворення твердих розчинів водню в титані. Ізотермічне насичення і відкачування водню виявляє гістерезис, петля якого збільшується з підвищенням змісту домішок.

Атоми кисню і азоту, впроваджені в октаедричні порожнини поверхневого шару  $\alpha$ -титану, практично повністю зупиняють процес гідрування. Шляхом попереднього відпалу титану у вакуумі поверхня металу очищається від оксидів і оксінітридів, оскільки при цьому відбувається дифузія атомів кисню і азоту в об'єм матеріалу. Гідрування титану, що відпалює, йде активно.

Відмічено, що в протилежність азоту і кисню, алюміній і олово збільшують розчинність водню в  $\alpha$ -титане при кімнатній температурі. нині встановлено, що розчинність водню в сплавах титану з  $\alpha$ -структурою значно нижче, ніж у  $\beta$ -сплавах. Водень розташовується в порожнечах тетраєдрів титану, а алюміній зменшує розміри цих порожнеч. Це веде, кінець кінцем, до збільшення розчинності водню в  $\alpha$ -титані, оскільки зменшення розмірів порожнин до величин сумірних з розмірами атома водню, знижує вільну енергію системи в цілому (зниження вільної енергії відбувається за рахунок хімічної взаємодії титана і водню, але немає збільшення вільної енергії за раху-

нок коливальної енергії атомів водню) [5,7].

Для промислових сплавів титану швидкість реакції поглинання водню матеріалом зменшується у ряду (зліва направо) ВТ-1, ВТ-15, ВТ-5, ВТЗ-1, ВТ-3, ВТ5-1, ВТ-10, ВТ-6 [6,7]. Незважаючи на численність проведених робіт, представлялося цікавим дослідити залежність концентрації водню в титані від вмісту  $\alpha$ - та  $\beta$ -легуючого елемента для бінарних сплавів титану. Для цього були виготовлені сплави на основі титану з такими вмістами легуючих компонентів: 2,56 % Al; 5,26 % Al; 14,95 % Al; 2,88 % Cr; 4,82 % Cr; 14,9 % Cr. Сумарний вміст домішок (O, N, Fe, Cl та ін.) у сплавах не перевищував 0,1 %.

Зразки стружки піддавали гомогенізуючому відпалу у вакуумі ( $\sim 1 \cdot 10^{-3}$  мм рт. ст.) при температурі 950 °С протягом 30 хв, після чого гідрувалися спектрально чистим воднем, отриманим під час розкладання гідриду електролітичного титану. Гідрування проводили за температури 600 °С і тиску водню 150 кПа протягом 2 годин. Іншу серію дослідів провели з такими самими матеріалами, але при наступних режимах: температура 500 °С, тиск водню 170 кПа, впродвж 2 години. У отриманих гідридах аналізували вміст водню (рис. 2.1).

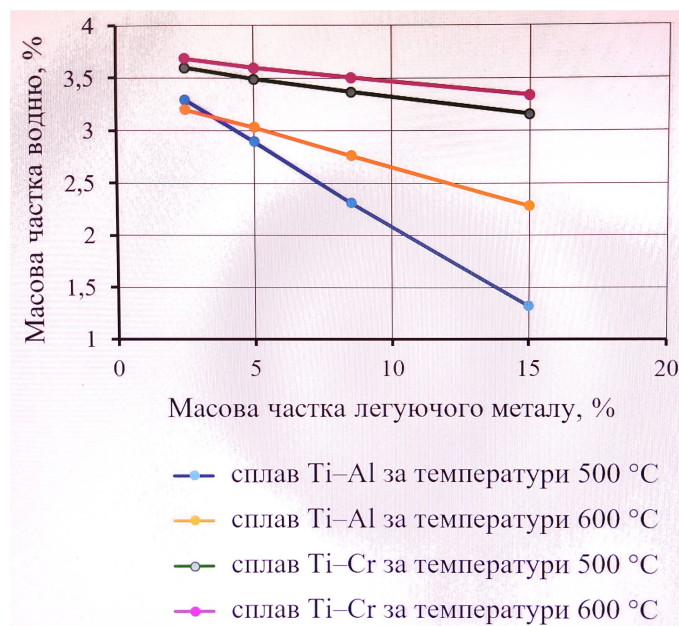


Рисунок 2.1 – Залежність концентрації водню в титані від вмісту легуючого металу [8]

Результати дослідів свідчать, що зростання вмісту алюмінію і хрому в бінарних сплавах Ti–Al і Ti–Cr знижує поглинання водню титаном під час гідрування [4,7]. Крім того, подвійні сплави титану з хромом насичуються воднем під час гідрування більш активно, ніж Ti–Al-сплави. Дослідами підтверджено, що  $\beta$ -сплави титану (сплави Ti–Cr) поглинають водень активніше, ніж сплави титану з  $\alpha$ -структурою (сплави Ti–Al).

Природа впливу домішок заміщення на процес гідрування титану, очевидно, пов'язана зі зміною розміру пір кристалічної решітки. Проте істотніший вплив на процес гідрування титану роблять домішки типу впровадження. атоми яких, розташовуючись в порах кристалічної решітки, перешкоджають проникненню водню в метал.

## 2.2 Особливості процесу дегідрування титанових матеріалів

Останнім часом приділяється велика увага питанням гідрування титана і його сплавів, проте недостатньо досліджено дегідрування титану. Питання про дегідрування порошкоподібного титану з отриманням якісного, неспеченого матеріалу вимагає подальшої розробки з причини недостатньої ефективності існуючих методів дегазації порошоків титану.

Основною трудностю процесу дегідрування титану є спікливість порошкоподібного металу при температурі 900 °C і вище. Крім того, при дегідруванні у вакуумі йде твердофазна дифузія заліза з матеріалу реактора (1X18H9T або Ст.3) в титан з утворенням евтектик титану - 1X18H9T ( $T_{пл} = 1030^\circ \text{C}$ ) в титан - залізо ( $T_{пл} = 1080^\circ \text{C}$ ), що призводить до руйнування апаратури.

Для видалення водню з титану в твердому стані запропонована обробка металевим кальцієм в нейтральному розплаві неорганічних солей при 500-850 °C. У США розроблений спосіб дегідрування порошкоподібного гідриду титану, що полягає в наступному. Порошок гідриду нагрівають у вакуумі до 400° C в закритому евакуйованому реакторі, а потім до 650-750 °C в середовищі

водню, що виділився, при тиску 500 мм.рт.ст. і вище до отримання м'якого напівспеченого брикета. Брикет витримують при температурі 450-750 °С до повного видалення водню.

У роботі [13] внесені невеликі зміни в режимі вказаного способу: температура з 650-750 °С поступово підвищується з одночасним регулюванням розрядки так, щоб тиск водню підтримувався на рівні 400-600 мм.рт.ст. Коли тиск водню слабшає, реактор евакуювали повторно (температура підтримується безперервно в інтервалі 400-750 °С). Спечений матеріал подрібнюється в кульовому млині.

З підвищенням температури процес виділення водню з гідриду титану прискорюється. Покриття, наприклад, хромо-нікелевий окисний шар значно знижує процес дегазації. Тривалість витримки при дегазації мало залежить від розмірів зразка при товщині до 10 мм, а також від змісту характеру розподілу водню. Інтенсивне дегідрування йде при температурах вище 600-650 °С.

Наявність окисних плівок на поверхні зразків не позначається на швидкості дегазації. Вказано, що на вплив кисню і азоту на швидкість десорбції водню титаном. Для перевірки цього явища провели досліді по дегазації зразків з титану з різною мірою окислення і встановили, що вплив кисню і азоту на процес дегідрування дуже трохи. Проте промисловий титан і його сплави дегідруються повільніше, ніж іодидний титан. Швидкість дегазації обернено пропорційна до квадрата діаметру циліндричного зразка і що обезводнювання титану і його сплавів в струмі інертного газу вимагає великої витрати цього газу.

Питання гідрування титанових матеріалів, верб першу чергу дегазації порошкоподібного гідриду титану, поза сумнівом, вимагають подальшої фундаментальної розробки.

### 2.3 Застосування процесу гідрування титану в промисловості і дослідницькій практиці

Боротьба з насиченням титану воднем - одна з найважливіших проблем авіабудування. Водневій крихкості присвячені багато робіт, де приведені результати досліджень процесу гідрування різних титанових матеріалів, розкрита природа окрихлення металу при гідруванні і намічені шляхи відвертання адсорбції водню титановими матеріалами в певних інтервалах температур.

З іншого боку, гідрування титану широко використовується в промисловості, причому сфера застосування гідриду титана і операції гідрування безперервно розширюється. Достатньо відмітити, що гідрид титану застосовується в ядерній техніці, електроніці і металоорганічному синтезі, щоб оцінити перспективність використання його в промисловості і дослідницькій практиці. Найбільш старими сферами застосування гідриду титану є виробництво пінометалів (зокрема піноалюмінію, де гідрид титану є піноутворювачем) і використання гідриду як оборотного генератора водню.

З розвитком електронної техніки гідрид титану стали вживати як припій для з'єднання керамічних і металевих деталей і відновник оксидів. У металокерамічному виробництві він використовувався з метою активування спікання і збільшення щільності виробів. При напівгарячому пресуванні гідрид титану додають невеликими порціями в пресовану суміш. При температурах 350-500° С гідрид повільно виділяє водень, поновлюючи окисні плівки на частках металу [3]. Це покращує контакт між частками порошкоподібного металу, що, у свою чергу, прискорює спікання.

Операція гідрування використовується в піротехніці для приготування швидко займистого титанового порошку, що служить компонентом в запальних сумішах. З цією метою гідрид титану з насипною вагою 0,4-1,7 г/см<sup>3</sup> нагрівають у вакуумі ( ~0,05 мм.рт.ст.) при 500-600 °С до тих пір, поки зміст водню в титані не досягне величини 0,425 ваг.%, а насипна вага - 0,4 г/см<sup>3</sup> [2,5].



В результаті розкладання насиченого воднем порошку титану на поверхні міді при високій температурі утворюється шар міднотитанового сплаву, що має високу твердість. Ця операція підвищення твердості мідних виробів, де гідрид титану служить своєрідною лігатурою при отриманні міднотитанового сплаву, останнім часом знайшла досить широке застосування в техніці.

Сплави з питомою вагою менше п'яти, приготовані з гідриду титану, карбиду титана і деякої кількості вуглецю і титану і, мають достатню твердість і в'язкість і зберігають ці властивості при високій температурі (до 1200 °С). Методи застосування оборотного процесу виділення і зв'язування водню частково розкладеним гідридом титану для регулювання потужності і теплопередачі в техніці. У основу цих методів покладена надзвичайна чутливість процесів абсорбції і десорбції водню титаном до зміни температури.

Окрихлення воднем використовується в промисловості для отримання високоякісних титанових порошків. Матеріал піддають гідруванню і подальшому подрібненню до потрібної фракції. При нагріві у вакуумі водень практично без остачі віддаляється і повертається для гідрування черговій партії матеріалу. Для окрихчування заготівлю з титану поміщають в закритий контейнер і витримують в атмосфері водню при 600-750 °С і тиску до 0,7 атм в плинні певного часу.

Титанова губка піддається активізуючій обробці у вакуумі ( $10^{-5}$  мм.рт.ст.) при температурі 700° С в течії близько 5 хвилин, а потім охолодженню до 450° С, після чого гідрується чистим воднем. Водень очищають пропусканням його через нагріту титанову губку або через паладієву гільзу. Гідрована губка дробиться до фракції 300 меш, після чого пресується і спекається. Залишкова пористість спечених деталей складає близько 2 %, а лінійна усадка при спіканні - 12-14 % [6].

Гідрид можна використати для виробництва карбиду титана. З цією метою металевий титан нагрівають до температури 325-350° С в середовищі водню. Продукт гідрування змізернюють до 100 меш, ретельно змішують з сажею і суміш нагрівають у вакуумі при 1800-2000 °С. При дегідруванні виходить дуже

активний (мікропористий) титан, який утворює карбід швидше в порівнянні з порошкоподібним титаном, не активізованим воднем.

Одним з цікавих способів використання гідрування для отримання металевого титану полягає в наступному. Галогеніди трьох- або чотиривалентного титана відновлюють за допомогою рідкої амальгами лужних або лужноземельних металів до двовалентного галогеніду, після чого проводять реакцію диспропорціонування і обробку воднем. Частина металу перетворюється на гідрид, з якого отримують досить якісний порошок титану.

Для отримання компактного титана і його сплавів пропонується порошок гідриду титану пресувати і нагрівати до 650 °С в середовищі водню, потім спікати при 950-1050 °С з поглинанням водню, що виділяється, нагрітим рідкоземельним металом і для попередження поглинання водню спеченим титаном охолодження вести після евакуації посудини з поглиначем шляхом герметичного перекриття зони спікання [6].

Гідрид титану – ефективний засіб для біологічного захисту від нейтронів і жорстких гамма-променів . Останнім часом він широко застосовується в атомній техніці. В цьому відношенні цікавий процес гідрування з метою отримання матеріалу, що відповідає вимогам атомної промисловості. Гідрид титану змізерніють до розміру часток менше 200 меш, пресують при 20° С під тиском 5000 кг/см<sup>2</sup> в диски завтовшки 1 см, діаметром 5 см, щільністю 3,35 г/см<sup>3</sup> і твердістю по Віккерсу 54,2. Порошок не виділяє водень у вакуумі при температурі менш 350° С і має високу термічну стійкість.

Гідрид титану можна вводити в шихту для приготування (Ti - Al - Mn) сплаву (80 % Ti, 10% Al, 10 % Mn), що складається з гідриду титану, порошкоподібної лігатури Ti-Al і порошку електролітичного марганцю. Гідрид титану використовують як каталізатор при гідруванні органічних сполук, наприклад при температурі 175 °С і тиску водню 05-140 кг/см<sup>2</sup> він є активним каталізатором реакції гідрування олефінов (фенілацетилен перетворюється на стирол і фенілетан, а нітрил переходить в аміни) [2,5]. Крім того, гідрид

додають до сумішей порошків при пресуванні для кращого спікання останніх зважаючи на підвищену поверхневу активність дегідрованого матеріалу.

Використання гідриду титану в реакторах атомних двигунів для космічної апаратури, а також метод отримання складних виробів, складається з наступних операцій. На поверхню керамічної деталі, зокрема плавненого кварцу або кварцового скла, наноситься шар склеювальної речовини (наприклад, розчину полівінілового спирту), а потім – шар порошку гідриду титану (товщина шару порошку дорівнює розміру часток). Порошок гідриду покривається шаром металу, що є припоєм (In, Ga, Sb, Zn, Cd). Керамічну деталь нагрівають у вакуумі або інертній атмосфері до температури розкладання гідриду; при цьому активний дегідрований метал реагує з кварцом і сплавляється з припоєм.

Разом із застосуванням гідриду титану в атомній техніці, в годинниковій промисловості ( для світлого відпалу дрібних деталей), для отримання чистого водню і так далі, останнім часом операція гідрування використовується як ефективний спосіб окрихчування компактних відходів титанових матеріалів при рафінуванні. Подрібнені гідруванням відходи сплавів можна також хлорувати.

Перераховані способи охоплюють далеко не увесь круг питань, пов'язаних з використанням гідрування титану в промисловості, і служать ілюстрацією зростаючого значення цієї операції в сучасній техніці і необхідності ретельного вивчення процесів гідрування титанових матеріалів.

## **2.4 Особливості технології гідрування титанових відходів**

Як відомо, титан і його сплави погано обробляються різанням. Причина цього полягає в схильності часток металу до налипання на різальні грані інструменту і в малій теплопровідності, що призводить до різкого підвищення температури в місці контакту стружки з різцем (до 1200 °С). Крім того, наявність на поверхні титанових зливків карбідів, нітриду і оксидів сприяє

зносу інструменту. Кування зливків супроводжується також нагрівом металу до температури 980-1100° С, тому на поверхні металу утворюється товстий шар оксидів. в результаті технологія обробки зливків надзвичайно складна. Наприклад, для сплаву Ti – 6Al-4V вона складається з видалення окисного шару (обробка в розплавленій солі; труїть з метою нейтралізації; труїть в 20% азотної і 2% плавикової кислотах); шліфовки абразивною стрічкою; очищення (труїть 20% азотної і 2% плавикової кислотах) і промивання у воді.

При виготовленні титанового прокату на металургійних заводах і готових виробів на машинобудівних заводах утворюється велика кількість титанових відходів (обрізків, стружки, бракованих деталей і тому подібне). Встановлено що загальну кількість відходів складає орієнтовно 70-80 % від ваги шихти для виплавки зливків. Для переробки відходів титану нині застосовують термічне або електролітичне рафінування, що вимагає подрібнення крупнокускових відходів сплавів титану - одна їх першочергових завдань, без рішення якої не можна успішно здійснити процес рафінування сплавів титану [11].

Вживані на металургійних заводах механічні методи подрібнення кондиційних відходів (автогенне різання, перековування і розруб в гарячому виді) трудомісткі, вимагають громіздкого устаткування і, головне, додатково забруднюють відходи киснем і азотом, що негативно позначається на їх подальшій переробці. Ефективнішим способом подрібнення титану є його гідрування (розчинення водню в титана до  $TiH_{1,75}$  супроводжується, як було вказано, збільшенням об'єму металу на 15,5 %).

Процес гідрування титанових відходів складається з наступних операцій: попереднього відпалу відходів в атмосфері водню або у вакуумі при температурі 900-950 °С упродовж 30 хвилин (або труїть); охолодження до температури 650 °С і гідрування при ступінчастому зниженні температури до 300° С з інтервалом 50 °С і витримці при кожній температурі до насичення матеріалу воднем (тиск газу в реторті підтримується постійним і рівним 0,5-1,0 атм.). Кінець процесу визначається по припиненню поглинання водню випробовуваним зразком; подрібнення матеріалу, що гідрується; дегідрування

подрібненого до заданої великості матеріалу нагріванням у вакуумі ( $10^{-2}$ - $10^{-3}$  мм.рт.ст.) при 950-1000 °С протягом 30-40 хвилин до залишкового вмісту водню в матеріалі 0,03-0,01 %.

Подрібнений за допомогою гідрування матеріал легко піддається рівномірному зміщенню, відбору проб і підшихтовці у вигляді однорідної добавки до первинного металу без його додаткового забруднення киснем.

Вплив тиску на вміст водню у зразках, оброблених різними способами, різко відрізняється (рис. 2.2). Шматки сплаву ВТ-6 однакових розмірів, відрізані від одного темплету, гідрувалися за температури 450 °С протягом 1,5 год. Одна партія зразків відпалювалася у вакуумі при 900 °С протягом 30 хв, інша оброблялася протягом 4 годин травильним розчином, що містив 24 %  $H_2SO_4$  і 10 %  $NaF$ . За даними рис. 2.2 визначено, що операція травлення є ефективнішою порівняно з вакуумним відпалом.

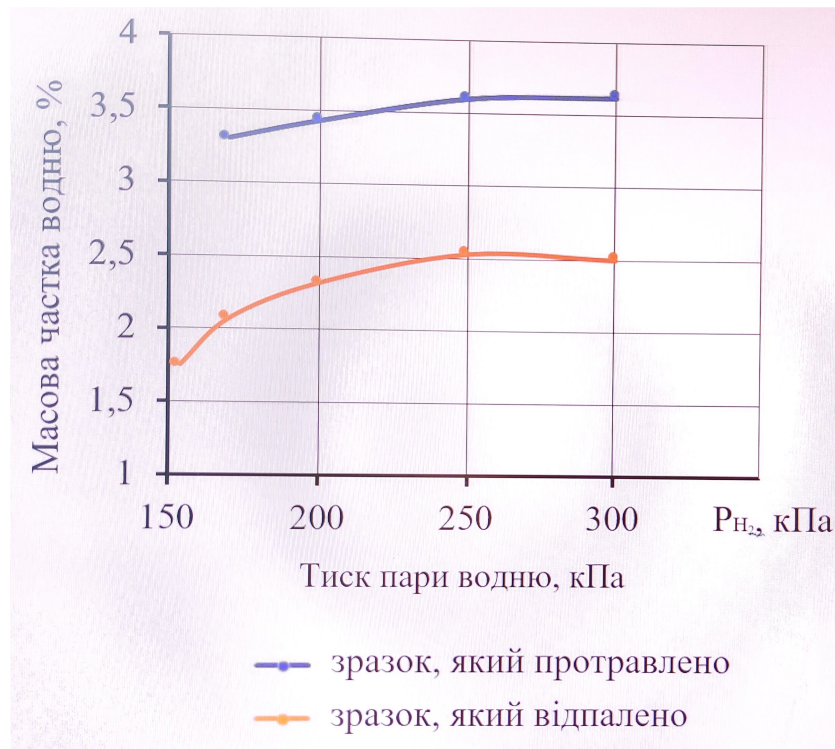


Рисунок 2.2 – Залежність вмісту водню у відходах сплаву ВТ-6 від тиску для зразків із різним ступенем підготовки [12]



Максимальний вміст водню в необробленому матеріалі не перевищує у 1,9 % (рис. 2.3). Тому зразки сплаву ВТ-6 перед гідруванням піддавалися попередньому травленню протягом 3 годин у вказаному травильному розчині. Гідрування протравлених зразків проводили при температурі 400 °С протягом 1,5 год і тиску 200 кПа. Такий режим не відрізняється від оптимальних режимів гідрування зразків з чистого сплаву ВТ-6.

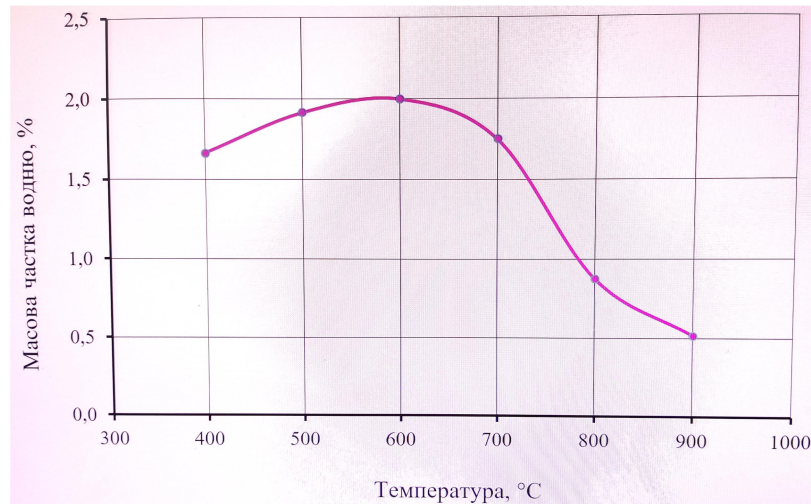


Рисунок 2.3 – Залежність вмісту водню у відходах сплаву ВТ-6 від температури гідрування [12]

Якщо кінетика гідрування неокислених титанових матеріалів визначається величиною поверхні, кількістю та типом легуючих добавок, величиною та формою мікрозерна, режимом проведення процесу, то на кінетику процесу гідрування відходів титанових матеріалів домінуючий вплив має стан окисного шару (ступінь окислення). Достатньо зазначити, що після окислення зразків литого титану при температурі 550 °С товщина плівки досягає величини 0,45 мкм, а швидкість гідрування таких зразків знижується в 25 разів.

Процес гідрування титанових матеріалів залежить від величини та форми мікрозерна, оскільки водень дифундує по межах зерен та утворює з титаном гідридну фазу. В результаті відбувається розтріскування зразків по межах зерен

та площин спайності. Для інтенсифікації гідрування необхідно після видалення оксидного шару матеріал піддати вакуумному відпалу. Режим відпалу вибирають залежно від необхідної величини подрібнення. Так, для підготовки сплаву ВТ-6 до електролітичного рафінування, матеріал відпалюється у вакуумі ( $\sim 10^{-2}$  мм рт. ст.) при температурі 900 °С протягом 30 хв. При вакуумному відпалі відбувається збільшення зерна, що сприяє отриманню матеріалу, який після гідрування та дегідрування відповідає вимогам подальшої переробки на товарний продукт. Наприклад, для електролітичного рафінування крупність шматків має бути від 5 мм до 12 мм [12].

Для детального вивчення процесу гідрування титанових матеріалів і оцінки раціональності застосування його для переробки відходів титану необхідно розглянути детально операцію підготовки матеріалу до гідрування, оскільки від стану поверхневого шару залежить можливість проведення гідрування. Гідрування відходів титану відрізняється від гідрування чистого титану додатковою операцією видалення оксидного шару. Технологія видалення оксидного шару з метою підготовки матеріалу до гідрування аналогічна розробленому процесу підготовки відходів титанових сплавів до плавки.

## **2.5 Підготовка відходів титану до гідрування**

Нині розроблена система класифікації відходів титану з урахуванням шляхів використання їх в промисловості. Усі титанові відходи поділяють на дві групи: кускові відходи і стружку. Кожна з цих груп поділяється на три сорти. Перші два сорти в кожній групі представляють кондиційні відходи і можуть бути використані в шихті для плавки безпосередньо або після відповідної підготовки (подрібнення, галтовка, травлення). До третього сорту належать некондиційні відходи, непридатні для переплавки, які доцільно піддавати електролітичному рафінуванню. Співвідношення між кондиційними і некондиційними відходами приведені в таблиці 2.1.

Наявність і глибина газонасиченого шару визначається видом відходів

(шматки або стружка) і видом виробництва. Середня товщина газонасиченого шару для кускових відходів коливається в межах від 0,08 мм до 1,2 мм.

Таблиця 2.1 – Співвідношення між кондиційними і некондиційними відходами титану [14]

Вироби	Відходи, %		
	кондиційні	некондиційні	усього
Злитки обточені	10	3	13
Ковальські напівфабрикати	22	8	30
Труби	50	21	71

Підготовка відходів для подальшої їх підшихтовки і виплавки зливків складається з наступних операцій: подрібнення відходів негабаритів до необхідних розмірів; знежирення; видалення окалини і, у разі потреби, брикетування.

Подрібнення включає перековування і розруб або розрізання в гарячому виді. Ця операція дуже трудомістка і супроводжується додатковим окисленням відходів. Її можна здійснювати на анодно-механічних установках, автогенним різанням і на механічних ножицях. Доцільно для автогенного різання використати шматки розміром більше 80 мм, інакше процес економічно не вигідний. Зважаючи на простоту автогенне різання дуже поширене. Остаточний вибір методу подрібнення можна зробити тільки виходячи з умов подальшої переробки. Зокрема, при отриманні порошку титану гідруванням допустиме застосування великогабаритних шматків близько 400x600 мм.

Стружку готують аналогічно, але, у відмінності від шматків, дроблення її робиться в млинах. Після дроблення стружка звільняється від домішок магнітною сепарацією. Домішки, що вийшли при руйнуванні твердосплавного різального інструменту, видаляють відмиванням у воді при інтенсивному барботуванні повітря. Відмивання від механічних домішок можна поєднати з операцією знежирення. Поверхня відходів, особливо стружки, часто забруднена органічними домішками (залишки мастила або мастильно-охолоджувальної рідини). Для очищення застосовують бензин, тетраклоретилен або інші

розчинники. Іноді поверхню стружки для видалення механічних домішок обробляють гарячою водою, парою або розчином їдкого натрію і соди. Для переробки великих кількостей стружки цікавий досвід створення потокової лінії при підготовці алюмінієвої стружки до переплавки. З метою видалення олії і бруду стружку відмивають в шнекових апаратах водним розчином, що містить 6 % тринатрійфосфата, 4 % рідкого стекла, 2,5 % кальцинованої соди і 0,5 % хромпіка.

Поверхня окисленого титану містить декілька шарів різною по структурі і хімічному складу окалини, під якою розташований так званий альфірований шар з вмістом кисню, що убуває по глибині. Стійкість окалини і підбір типу травильників для не залежить від температури проведення термічної обробки матеріалів. Для видалення окалини застосовують піскоструминну або дробометну обробку і галтовку. Дробометною обробкою альфірований шар не віддаляється, а галтовкою подовжує процес. Повного видалення оксидів з поверхні титану можна досягти таким, що труїть, хоча цей метод більш складний і дорогий.

Те, що труїть досі застосовувалося для обробки напівфабрикатів і виробів з титану, тому склади і методика того, що труїть частенько визначалася вимогою збереження високих механічних властивостей виробу (наприклад, оберігання від наводнення поверхні). Труїть пред'являють такі вимоги, як дешевизна, простота, швидкість здійснення, можливість надійної нейтралізації стоків. Поширені методи того, що протравлюють у водних розчинах кислот, розплавах солей і лугів і електролітичне, що труїть.

## **2.6 Технологічна схема гідрування титанової стружки**

Підготовка титанової стружки до виплавки злитків титанових сплавів, отримання титанових порошків методом гідрування-дегідрування, отримання титанових порошків методом гідрометалургійної обробки складається з таких основних етапів:

- подрібнення стружки до розмірів, потрібних для подальшої переробки;
- очищення стружки від поверхневих забруднень, які утворюються під час механічної обробки сплавів,
- поділу, збереження і транспортування відходів.

Кількість мастила та вологи на поверхні титанової стружки залежить від її товщини, може становити до 30 % від маси стружки. Обробка титанових сплавів ВТ1-0, ВТ3-1, ВТ6 і ВТ8 зі швидкістю різання не більше 15–20 м/хв супроводжується утворенням зливної стружки [11]. При різанні з більшою швидкістю зливна стружка переходить в елементну. Змінення режимів різання супроводжується утворенням титанової стружки з різними кольорами мінливості. Для залучення в колообіг титану забруднена титанова стружка повинна бути очищена від залишків змащувально-охолоджувальної рідини, емульсії, сторонніх предметів.

Технологічна схема процесу гідрування титанової стружки складається з таких операцій: приймання і складування титанової стружки; подрібнення та розсівання; магнітна сепарація; знежирення і промивання; пневмосепарація, деоксидація і промивання; сушіння; гідрування; розмелювання гідриду титану; затарювання і відвантаження споживачу (рис. 2.4).

Титанова стружка, що знаходиться в сталевих бочках місткістю 250 літрів (ГОСТ 15968-81), автомобільним або залізничним транспортом завозиться на приймальний склад металургійного підприємства. Кожну партію титанової стружки піддають піротехнічному і радіаційному контролю. Вибухонебезпечні і радіоактивні прироблення, що виявлені, відокремлюються. Стружку з сертифікатом складують окремо. У стружці, що надходить без сертифікату, визначається масова частка мастила, води і засміченості. Титанова стружка, що містить мастила більше 0,5 %, а також в'юноподібна стружка та змішана за марками сплавів відправляється на ділянки первинної обробки.

Грейферним краном з бункера вихідна титанова стружка подається в завантажувальну воронку молоткової дробарки СМД-7, де вона потрапляє під удар молотків, які швидко обертаються, руйнується від зіткнення з ними і

відкидається до броньової плити. Частинки стружки після вдару об цю плиту, відлітають від неї і потрапляють знову під молотки. Зруйновані і відкинуті другий раз до броньової плити фрагменти стружки знову повертаються під молотки.

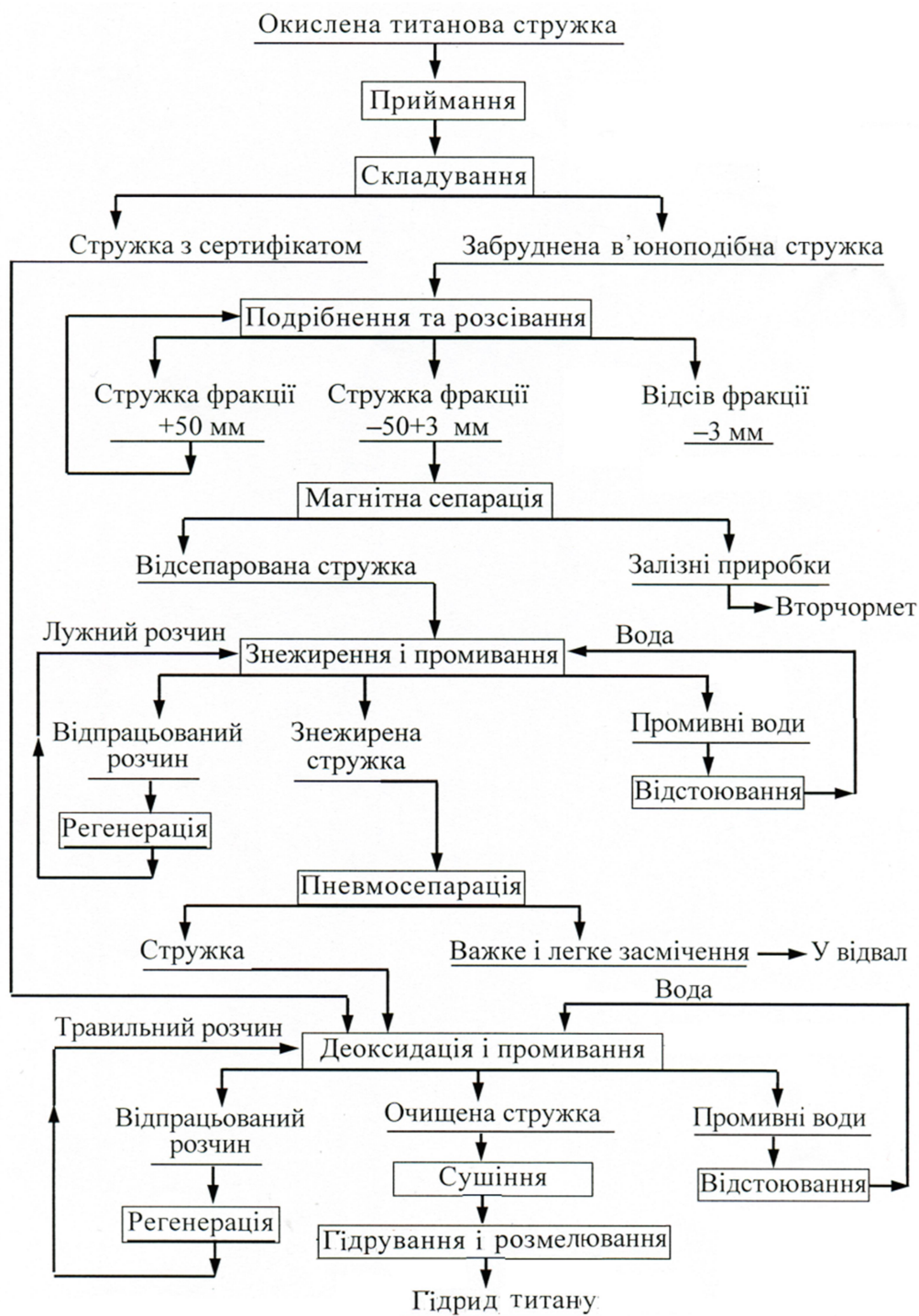


Рисунок 2.4 – Технологічна схема гідрування титанової стружки



Такий рух і руйнування титанової стружки відбувається доки частинки не потраплять на колосникові решітки і не вийдуть із зони руйнування крізь її отвори. Куски титанової стружки розміром більше 50 мм, що не встигли досягти потрібного розміру за перший прохід, через зону подрібнення рухомими молотками можуть руйнуватися на черневих решітках або підніматися і повертатися знову в зону інтенсивного подрібнення.

Після подрібнення стружка стрічковим конвеєром прямує на двоситовий віброгуркіт, де відбувається її розсівання на фракції. Фракцію +50 мм повертають на повторне дроблення в молоткову дробарку. Відсів фракції -3 мм прямує в спеціальний бункер, а потім у відвал. Фракція -50+3 мм поступає на магнітну сепарацію.

Магнітним сепаратором СЕ-3, з напруженістю магнітного поля на поверхні барабану не менше 120 кА/м, видаляються залізні приробки, які потім прямують на підприємства Вторчормету. Стружка після відокремлення залізних приробок надходить на знежирення в механічний агітатор. Під час процесу знежирення відбувається відмивання залишків змащувально-охолоджувальних рідин, емульсій, поверхневого бруду з поверхні титанової стружки. У цьому ж агітаторові відбувається промивання стружки гарячою і холодною водою (р:т = 5:1). Крізь дозувальний пристрій заливають промивну воду (спочатку гарячу, а потім холодну). Після чого стружку промивають гарячою і холодною водою. Потім очищену стружку вивантажують з апарата.

Знежирена стружка подається в пневмосепаратор для видалення важких включень і легких домішок. У верхній частині апарату знаходиться завантажувальне вікно, через яке подається стружка. У нижній конічній частині тангенціально підведене стисле повітря, що створює усередині апарата направлені висхідні потоки повітря. Важкі включення осідають на днище апарата. Титанова стружка і легке засмічення, що захоплюються потоками повітря, спливають вгору; засмічення йдуть через переливний отвір разом з водою, а титанова стружка, при ударі у дефлектор, потрапляє у вивантажувальний штуцер.

Після цього стружка надходить в агітатор на гідрометалургійну деоксидацію. Через завантажувальне вікно в агітатор зверху засипається стружка, а через спеціальний штуцер заливається травильний хлоридно-фторидний розчин. Під час процесу деоксидації, що протікає протягом 30 хвилин, відбувається видалення окисленої плівки з поверхні титанової стружки, а також насичення стружки воднем. Відпрацьований травильний розчин випускають через патрубок у днищі. Для вивантаження стружки шток опускають вниз і відкривають клапан. Регулюванням розміру отвору вивантажувального патрубка спочатку зливають відпрацьований хлоридно-фторидний розчин. Крізь дозувальний пристрій заливають промивну воду (спочатку гарячу, а потім холодну). Після чого стружку промивають гарячою і холодною водою (р:т = 10:1).

Очищену вологу стружку сушать у вакуумній шафі ЦВШ. Разове завантаження не більше 100 кг, тривалість сушіння при температурі 80 °С становить 4–6 годин. Полична вакуумна сушарка є циліндричним горизонтальним апаратом з однією або двома поворотними торцевими кришками контактного типу. Усередині корпусу змонтовані полиці – плити з внутрішнім обігрівом. Волога стружка завантажується в деки, що встановлені на плитах. Апарат вакуумується до залишкового тиску 1,33 кПа. У плити подається теплоносій – повітря. Просушена стружка йде на гідрування.

До початку процесу гідрування слід видалити повітря з підводу водню продувкою аргону. Перед подачею водню в реторту на процес продувають її через свічку допалювання зі спалюванням водню. Підготовлену реторту вакуумують до залишкового тиску не менше 0,001333–66,66 Па, включають електропідігрів і реторту розігрівають до температури 400 °С при безперервному вакуумуванні. Контроль температури слід проводити по внутрішній термодіаграмі реторти. Кількість поглинання водню визначається по лічильнику. Якщо при температурі 400 °С не починається активне поглинання водню, то температуру в реторті підвищують до початку активного поглинання, але не вище 500 °С.

По закінченню процесу гідрування сільфонний вентиль подачі водню

перекривають, тиск водню в реторті не більше 0,1 Па. Після цього реторту заповнюють аргоном до тиску 0,3 Па, і охолоджують її до температури не вище 50 °С шляхом обдування зовнішньої стінки стисненим повітрям. Охолоджену до 50 °С реторту промивають аргоном. З кожного піддону реторти ретельно за допомогою совка знімають верхній, окислений шар гідриду і збирають в металеву бочку для накопичення і подальшої переробки. Гідрид титану у вигляді напівспеченої титанової стружки розмелюють, протирають порціями на ситі 2 мм вручну, завантажують в металічну тару с поліетиленовим вкладишем і відправляють на склад готової продукції.

## **2.7 Опис технології гідрування титанової стружки**

### **2.7.1 Підготовки установки до процесу гідрування і монтажу апарата**

Реторту очищають від залишків гідриду титану, окалини та інших домішок, встановлюють на стенд, де оглядають її зовнішній вигляд для виявлення можливих дефектів (тріщини, підплавлення і т.п.) і обстукування зварних швів молотком вагою 0,5 кг для виявлення відшарування. Перевіряється візуально пластина вибухової мембрани для виявлення її цілісності.

Підготовлену до гідрування титанову сировину завантажують в попередньо очищенні від залишків порошку гідриду титану і возгонів противні **етажерки** або стакан. Висота засипки не повинна перевищувати 0,8 висоти ємності. Загальна вага завантаженого титанового матеріалу повинна бути не **більш 400** кг [18]. Зверху етажерки (або стакану) встановлюють противень з **титановою стружкою**, в якості гетеру. Потім етажерку або стакан встановлюють в реторту. Реторту закривають кришкою, роблять налаштування вибухової мембрани.

Для налаштування вибухової мембрани в реторту задають аргон до тиску 58,840 кПа [18], голку встановлюють таким чином, щоб зазор між вістрям голки і пластини з вакуумної резини товщиною 6 мм становив 1,5–2,5 мм. Потім тиск

скидають до нуля, на вибуховій мембрані збирають котушку і перехідній патрубком, який служить для приєднання до трубопроводу свічі дожигання водню. Далі реторту випробовують на герметичність. Для цього в реторту задають аргон до тиску 49,033–58,840 кПа [18], перевіряють зварюванні шви і роз'ємні з'єднання шляхом омилення. У випадку виявлення протікання в корпусі реторти або в кришці, потребуючих для їх усунення зварювальних робіт, реторту демонтують, стакан з титановим матеріалом витягають з реторти. Перед ремонтом при наявності в реторті залишків титану її піддають мийці і сушінню.

Змонтовану і перевірену на герметичність реторту за допомогою електромостового крану встановлюють в піч на підкладках висотою 50 мм. До неї під'єднують підвід води, тросики заземлення, вакуумують лінію, вмикають водне охолодження кесонів, підвід аргону і контрольно-вимірювальні прилади. Перевіряють герметичність вакуумної системи і апарату, для чого реторту вакуумують до залишкового тиску 13,33 Па [18] і перевіряють на натікання, яке не повинно перевищувати 5 мкм/хв. Потім перевіряють наявність аргону в балонах в рампі і продути аргонопровід через вентиль «Аргон» біля печі гідрування, переконатись в надходженні аргону в систему.

Після ремонту цехового підводу водню необхідно перевірити його на герметичність. Для цього в підвід водню задають аргон до тиску 58,840 кПа. Омилуванням виявляють місця витоків і приймають заходи до герметизації підводу водню. Перевіреній підвід водню і його арматуру продувають аргоном протягом 3 - 5 хвилин [18], після чого відбирають пробу на вміст кисню, який не має перевищувати 1 % по об'єму. Для видалення аргону підвід водню продувають воднем зі спалюванням на свічці не менш 3 м<sup>3</sup> водню.

Кількість водню, спалюваного на свічці, контролюється по витратоміру, встановленому на лінії підводу водню. Підвід водню повинен знаходитись під постійним тиском водню або аргону, крім випадків виводу його в ремонт.

Перед початком процесу гідрування необхідно перевірити рівень масла в масляному гідрозатворі, який повинен бути не менш 180 мм і не більше 290 мм.

Рівень масла ВМ-4 заміряють щупом. За необхідності слід долити вакуумне масло ВМ-4 до рівня, передбаченого інструкцією.

### 2.7.2 Опис технології процесу гідрування титанової стружки

До початку процесу гідрування (та після ремонту трубопроводу і арматури) слід видалити повітря з підводу водню продувкою аргону і відібрати з нього пробу для визначення кисню.

Перед подачею водню в реторту на процес продувають її через свічку допалювання зі спалюванням не менше 3 м<sup>3</sup> водню.

Процес гідрування заснований на взаємодії титану з воднем в інтервалі температур від 300 °С до 560 °С (1 кг титану поглинає 0,3–0,4 м<sup>3</sup> водню) [15]. При взаємодії титану з воднем утворюються гідриди титану і ряд твердих розчинів. Формула одержуваного продукту  $TiH_x$ , де  $x=1,00–1,95$ . Процес поглинання водню титаном при температурі вище 300 °С досягає високої швидкості. У зв'язку з екзотермічністю реакції (31 кДж/моль  $TiH_2$ ) температура металу підвищується за рахунок теплоти реакції, що призводить до інтенсивного розігріву матеріалу і реактора навіть без подачі теплоти ззовні. Інтенсивність насичення титану воднем підвищується з ростом температури, однак загальна кількість поглинутого титаном водню знижується. При температурі 700 °С і нормальному тиску чистий титан може поглинути до 1,8 % водню [16,17] на масу титану, при 600 °С – до 3 %, при 500 °С – до 3,3 %. Процес максимального насичення титану воднем здійснюється при зниженні температури протягом тривалого часу.

Підготовлену реторту вакуумують до залишкового тиску не менше 0,001333–66,66 Па, включають електропідігрівач і реторту розігрівають до температури 400 °С [18] при безперервному вакуумуванні. Швидкість росту температури вибирають в залежності від стійкості величини залишкового тиску в реторті. При збільшенні тиску необхідно припинити підйом температури і продовжувати відкачку. Контроль температури слід проводити по внутрішній

термопарі реторти. При температурі 400 °С виконують витримку протягом не більше однієї години, при досягненні залишкового тиску в реторті не більше 1,333 Па (натікання не повинно перевищувати 5 мкм/хв). При п'яти хвилинній витримці нагрівачі печі відключають і з підготовленого підводу водню подають в реторту водень. Тиск водню в реторті під час проведення процесу повинно підтримуватись регулюючим клапаном не більше 0,6 Па. Кількість поглинання водню визначається по лічильнику.

Якщо при температурі 400 °С не починається активне поглинання водню, то температуру в реторті підвищують до початку активного поглинання, але не вище 500 °С [19].

Охолодження від максимальної температури ведеться до 600 °С при безперервній подачі водню, з витримкою при 600 °С, 500 °С, 400 °С, 300 °С.

Час витримок регламентують завданням на процес, а задану витрату водню визначають за формулою:

$$Z_{\text{в.в.}} = (V_3 \times V) / 0,09, \quad (2.3.)$$

де  $Z_{\text{в.в.}}$  – задана витрата водню, м<sup>3</sup>;

$V_3$  – вага завантаженого матеріалу з гетером, кг;

$V$  – відсотковий вміст водню в кінцевому продукті, %;

0,09 – вага 1 м<sup>3</sup> водню, кг.

При проведенні процесів повного гідрування охолодження проводять в атмосфері водню при його тиску в реакторі не нижче атмосферного і не вище 0,6 Па, при неповному гідруванні – при тих же умовах в атмосфері аргону.

По закінченню процесу гідрування сільфонний вентиль подачі водню перекривають, тиск водню в реторті не більше 0,1 Па. Після цього реторту заповнюють аргонем до тиску 0,3 Па, і охолоджують її до температури не вище 50 °С шляхом обдування зовнішньої стінки стисненим повітрям. Охолоджену до 50 °С реторту промивають аргонем. Промивку реторти аргонем ведуть до припинення горіння водню на свічці, потім перекривають вентиль подачі

аргону на кришці реторти, реторту вакуумують насосом ВН-6 протягом 5–6 хв до залишкового тиску 26,66 Па. Після чого реторту заповнюють аргонем до тиску 0,2–0,3 Па, витримують при цьому тиску протягом 10–15 хв. Потім повторно промивають аргонем на протязі 5–6 хвилин [19].

Від реторти відокремлюють підвід водню, вакуумують лінію, аргонопідвід, напірні шланги для охолодження і контрольно-вимірювальні прибори. Демонтують кришку з реторти і витягають стакан з продуктом гідрування.

З кожного піддону ретельно за допомогою совка знімають верхній, окислений шар гідриду і збирають в металеву бочку для накопичення і подальшої переробки [12]. Напівспечену титанову стружку (гідрид титану) розмелюють, протирають порціями на ситі 2 мм вручну, завантажують в металічну тару с поліетиленовим вкладишем і відправляють на склад готової продукції.

## **2.8 Розрахунок матеріального балансу процесу гідрування титанової стружки**

Вихідна титанова стружка, що надходить як сировина для отримання гідриду титану, може бути забруднена мастилом, емульсією, сторонніми предметами, уламками різців, які не мають магнітних властивостей, гофрованою, рулоноподібною, перевищувати встановлені розміри. Тому така вторинна сировина – титанова стружка до гідрування проходить попередню підготовку шляхом подрібнення і вибирання шматків стружки розміром від 3 мм до 50 мм, магнітної сепарації для відокремлення залізних приробок, знежирення і промивання для очищення від мастил і емульсії, пневмосепарації для видалення сторонніх предметів, уламків різців, деоксидації для видалення поверхневого окисленого шару, промиванню і сушінню. Після попередньої підготовки очищена титанова стружка надходить на гідрування.



За практичними даними приймаємо, що втрати титану на кожній операції технологічної схеми гідрування титанової стружки (рис.2.1) становлять:

- при відбиранні проб – 0,3 % ( $x_3 = 0,003$ );
- при складуванні – 0,5 % ( $x_5 = 0,005$ );
- при подрібненні та розсіванні – 4 % ( $x_7 = 0,04$ );
- при магнітній сепарації – 0,3 % ( $x_9 = 0,003$ );
- при знежиренні та промиванні – 0,2 % ( $x_{11} = 0,002$ );
- при пневмосепарації – 0,3 % у важку фракцію і 0,1 % у легку фракцію засміченості ( $x_{13} = 0,003$  і  $x_{14} = 0,001$ );
- при деоксидації і промиванні – 5 % ( $x_{16} = 0,05$ );
- при сушінні – 0,2 % ( $x_{17} = 0,002$ );
- при гідруванні та розмелюванні – 0,3 % ( $x_{19} = 0,003$ ).

Розрахунок матеріального балансу процесу гідрування титанової стружки складаємо на 100 кг очищеної стружки.

Масу титанової стружки, що витрачається для отримання 100 кг очищеної стружки, визначаємо, враховуючи кількості втрат титану (коефіцієнти втрат титану  $x_3, x_5, x_7, x_9, x_{11}, x_{13}, x_{14}, x_{16}, x_{18}, x_{20}$ ), тобто коефіцієнти вилучення титану на кожній технологічній операції:

$$x_2 = 1 - x_3 = 1 - 0,003 = 0,997;$$

$$x_4 = 1 - x_5 = 1 - 0,005 = 0,995;$$

$$x_6 = 1 - x_7 = 1 - 0,04 = 0,96;$$

$$x_8 = 1 - x_9 = 1 - 0,003 = 0,997;$$

$$x_{10} = 1 - x_{11} = 1 - 0,002 = 0,998;$$

$$x_{12} = 1 - x_{13} - x_{14} = 1 - 0,003 - 0,001 = 0,996;$$

$$x_{15} = 1 - x_{16} = 1 - 0,05 = 0,95;$$

$$x_{17} = 1 - x_{18} = 1 - 0,002 = 0,998;$$

$$x_{19} = 1 - x_{20} = 1 - 0,003 = 0,997.$$

де  $x_2, x_4, x_6, x_8, x_{10}, x_{12}, x_{16}$  – коефіцієнти вилучення титану на  $i$ -ій технологічній операції, частка;

$X_3, X_5, X_7, X_9, X_{11}, X_{13}, X_{14}, X_{16}$  – коефіцієнти втрат титану на  $i$ -ій операції технологічної схеми, частка.

Отже, для отримання 100 кг очищеної стружки потрібно вихідної стружки

$$100 : (0,997 \cdot 0,995 \cdot 0,96 \cdot 0,997 \cdot 0,998 \cdot 0,996 \cdot 0,95 \cdot 0,998 \cdot 0,997) = 112,092 \text{ кг.}$$

Кількості втрат титану на кожній технологічній операції визначаємо аналогічно, складаємо для гідрування стружки поелементний матеріальний баланс по титану та записуємо в таблицю 2.2.

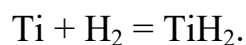
Таблиця 2.2 – Матеріальний баланс по титану

Надходження			Витрачання		
Найменування	Кількість		Найменування	Кількість	
	кг	%		кг	%
Кількість титану у вихідній стружці	112,092	100,00	Втрати титану при:		
			- відбиранні проб	0,301	0,27
			- складуванні	0,504	0,45
			- подрібненні	4,200	3,74
			- магнітній сепарації	0,318	0,28
			- знежиренні	0,212	0,19
			- пневмосепарації	0,423	0,38
			- деоксидації	5,577	4,98
			- гідруванні та розмелюванні	0,336	0,30
			Кількість титану в очищеній стружці	100,00	89,21
Усього	112,092	100,00	Усього	112,092	100,00

Розрахунок матеріального балансу процесу гідрування передбачає обчислення витрати титанової стружки, кількості та складу гідриду титану, кількості водню і аргону, кількості та складу газів, що відходять з печі.

За даними хімічного аналізу сировини в очищена титанова стружка не містить домішок.

На гідрування надходить 100,336 кг титанової стружки. Обчислюємо стехіометричну витрату водню за реакцією:



Стехіометрична (теоретична) кількість водню становить

$$100,336 \cdot 2,0 : 48 = 4,181 \text{ кг.}$$

Отже, утворюється

$$100,336 + 4,181 = 100,517 \text{ кг гідриду титану,}$$

з яких у товарний гідрид титану надходить

$$100,00 + 100,00 \cdot 2,0 : 48 = 104,167 \text{ кг.}$$

Решта гідруду титану є відсівами, що утворюються при розмелюванні.

Враховуючи технологічні витрати водню і аргону на підготовку апарата гідрування, проведення гідрування приймаємо витрату водню 16,766 кг та 245,823 кг аргону.

Результати розрахунків зводимо в таблицю 2.3.

Таблиця 2.3 – Матеріальний баланс гідрування титанової стружки

Надходження			Витрачання		
Речовина	Кількість		Речовина	Кількість	
	за один цикл, кг	%		за один цикл, кг	%
Титанова стружка	100,336	27,65	Гідрид титану	104,167	28,70
Водень	16,766	4,62	Відсіви гідриду титану	0,350	0,10
Аргон	245,823	67,73			
			Гази, що відходять, в тому числі:	258,408	71,20
			водень	12,585	3,47
			аргон	245,823	67,73
Усього	362,925	100,00	Усього	362,925	100,00

За даними матеріального балансу обчислюємо витратні коефіцієнти для вихідних речовин на 1 кг титанової стружки:

$$\text{водень } 16,766 : 100,366 = 0,167 \text{ кг/кг стружки;}$$

$$\text{аргон } 245,823 : 100,366 = 2,449 \text{ кг/кг стружки.}$$

## 3 КОНСТРУКЦІЙНА ЧАСТИНА

### 3.1 Конструкція шахтної печі для гідрування титанових відходів

Для гідрування титанових матеріалів використовують шахтні печі – футеровані шахти циліндричного або квадратного перерізу. Каркас печі виконаний з листової сталі. Робочий простір печі перекривається кришкою, що може мати ручний, пневматичний або електромеханічний приводи. Для зручності обслуговування шахтні печі будують у напрямку на цегляному або бетонному фундаменті. Печі розміщуються в зоні дії транспортних засобів: електричних талей, мостових кранів тощо. Нагрівання шахтних печей проводиться з використанням рідкого та газоподібного палива або електричної енергії. Паливні шахтні печі зі звичайною повітряною атмосферою (серія ТШО) мають максимальну робочу температуру 1100 °С. У печах з використанням контрольованих атмосфер (серії ТШЗ) встановлюється муфель із жароміцної сталі. Максимальна робоча температура цих печей становить 900 °С.

Електричні шахтні печі з окисною атмосферою (серія СШО) мають максимальну робочу температуру 700 °С, а з контрольованою атмосферою (серія СШЗ) – до 1300 °С. Конструкцію шахтної електричної печі серії СШЗ із контрольованою атмосферою зображено на рис. 3.1. Електричні шахтні печі типів СШО і СШЗ випускаються з такими розмірами робочого простору: діаметр 200-6000 мм, висота 300-6000 мм [14]. Максимальна температура печей серії СШЦ становить 1050 °С [14]. Розміри робочого простору: діаметр 300-600 мм, висота – 450-1200 мм; потужність печей – 20-110 кВт.

Охолодження деталей після обробки завантаженого матеріалу здійснюється в колодязі в середовищі відпрацьованих газів. Колодязь монтують поруч із піччю. Він має вигляд сталевого циліндра з подвійними стінками, між якими циркулює вода. Деталі під час охолодження не окиснюються. Відпрацьований газ відводиться через трубку і спалюється. Для створення вихрових потоків газу та вирівнювання складу газової суміші в реторті встанов-

лено вентилятор. У всіх типів шахтних печей температура вимірюється за допомогою термопар і регулюється автоматично. На великих печах термопари встановлюють в кількох зонах робочого простору.

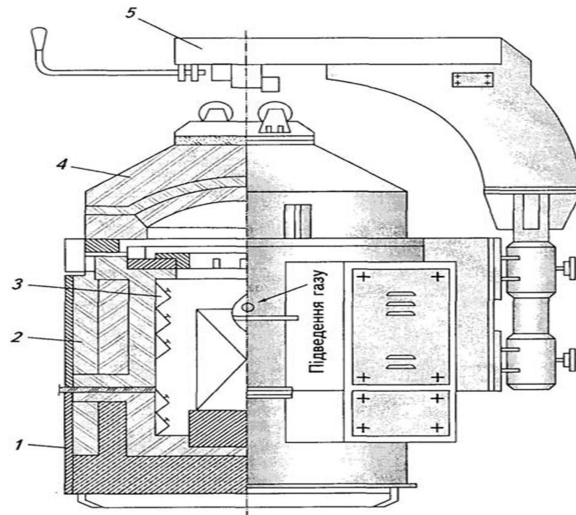


Рисунок 3.1 – Електрична шахтна піч серії СШЗ із контрольованою атмосферою [14]

Максимальна температура печей серії СШЦ становить 950 °С. Робочі розміри реторт: діаметр 300 мм, 450 мм та 600 мм; висота 450 мм, 600 мм, 900 мм і 1200 мм; потужність печей – 35-110 кВт.

Для газової цементації деталей із застосуванням природного газу або ендогазу з домішками вуглеводнів часто застосовують безмуфельні печі серії СШЦ. При однаковому завантаженні порівняно з муфельними печами серії СШЦ вони мають в 2,5-3 рази більшу продуктивність, у 2-2,5 рази меншу витрату електричної енергії, в 2-3 рази скорочений цикл цементації.

Максимальна температура печей серії СШЦ становить 1050 °С. Розміри робочого простору: діаметр 300-600 мм, висота – 450-1200 мм; потужність печей – 20-110 кВт.

Порівняно з камерними шахтні печі займають у цеху меншу площу, а на одиницю площі поду дають більшу кількість продукції. До загальних недоліків шахтних печей слід віднести: нерівномірне нагрівання по висоті печі (особливо

деталей великої довжини) та велику витрату жаротривких сталей на муфелі, а також пристрої.

*Вакуумні печі.* Ці печі застосовуються для безокисного нагрівання при термообробці деталей з трансформаторних й електротехнічних сталей, тугоплавких металів і сплавів. Вони мають вигляд герметичного сталевого кожуха, що охолоджується водою, в якому розміщено нагрівальну камеру. Нагрівання камери здійснюється металевими (ніхромовими, вольфрамовими, молібденовими, танталовими) або графітовими нагрівниками опору. З метою виключення електричного пробою, що легко виникає при підвищених температурах у вакуумі, всі печі працюють на зниженій напрузі. У деяких печах використовують індукційне нагрівання.

Мурування печей виконується з кераміки, графіту або роль теплової ізоляції відіграють системи металевих екранів. До складу вакуумної печі 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.

Вакуумна система складається з вакуумного насоса (найчастіше механічного), трубопроводів, вентилів, затворів. 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.

Промисловість випускає цілу 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 °С, 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.

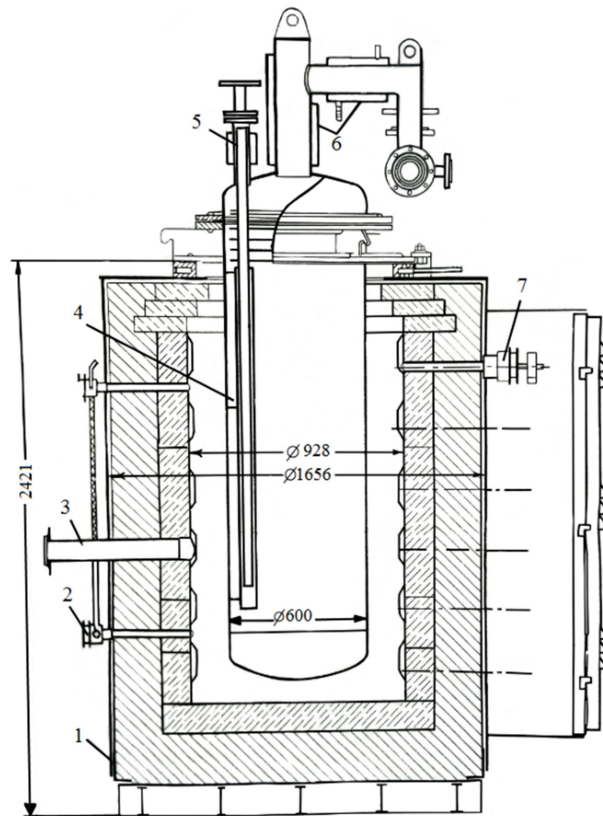
Електропіч серії UPF - піч шахтного типу, з резистивним нагрівом, вертикальною ретортою, циліндричною робочою зоною, системою вакуумного відкачування і конвекційним нагрівом садіння в середовищі інертного газу.

Піч призначена для проведення процесів спікання, відпалу і відпустки, зокрема, механічно оброблених деталей і зварних деталей з титанових сплавів. Конвекційний нагрів дозволяє добитися оптимальної температурної рівномірності і часу нагріву садіння. Захисний газ циркулює по робочій зоні, при цьому він продувається за допомогою спеціального вентилятора. Два окремі вентилятори служать для охолодження реторти при її зовнішньому обдуванні.



Рисунок 3.2 – Електропіч опору шахтна вакуумна моделі UPF–100150

Характеристика обладнання для гідрування відходів. Процес гідрування проводять у шахтній печі (рис.3.3). Піч являє собою циліндр футерований вогнетривким матеріалом, у пазах якого на гачках підвищено стрічкові нагрівачі технічні характеристики шахтної печі (табл. 3.1). Патрубок для створення контрвакууму при вакуумуванні реторти при підвищених температурах використовується також для подачі охолодженого повітря при проведенні процесу гідрування в апараті, встановленому в піч.



1 – корпус електропечі; 2 – термощупи для заміру температури всередині печі; 3 – патрубок для створення контрвакууму при вакуумуванні реторти при підвищених температурах; 4 – труба для термопарного чохла; 5 – термопарний чохол трьохспайної термопари; 6 – водоохолоджені рубашки патрубоків для подачі водню і аргону; 7 – струмопідведення печі

Рисунок 3.3 – Шахтна електропеч [15]

Реторта для процесу гідрування виконана зі сталі 12X18H9T, має внутрішній діаметр 600 мм та висоту 1800 мм. Реторта має робочу ємність 0,45 м<sup>3</sup> і ємність 0,51 м<sup>3</sup> [15].

Матеріал для гідрування може завантажуватися у апарат двома способами: дрібний матеріал насипають у піддони діаметром 550 мм, які ставлять на стрижень (етажерку). Кількість піддонів становить 10 шт. Крупнокусковий матеріал завантажують у стакан діаметром 540 мм і висотою 1500 мм. Стакан і піддони виготовлені з матеріалу ст. 12X18H10T.



Таблиця 3.1 – Технічні характеристики шахтної печі [15]

Характеристика	Величина	Одиниці вимірювання
Потужність	84	кВт
Максимальна робоча температура	900 – 950	°С
Напруга на нагрівателях,	220	В
Піч має в зоні, фази	3	----
Довжину	2038	мм
Ширина	1686	мм
Висота,	2421	мм
Вага печі без реторти,	4110	кг

Для монтажу та демонтажу апарату гідрування поряд з шахтною піччю змонтовано стенд виготовлений зі ст.3, що має внутрішній діаметр 800 мм та висоту 535 мм.

Для безпечної роботи з воднем, для запобігання потрапляння повітря у апарат гідрування передбачений гідрозатвор. Гідрозатвор виявляє з себе полий циліндр, діаметр 310 мм, висота 380 мм. У циліндр залите масло висота, якого коливається від 290 мм до 180 мм [16].

### 3.2 Розрахунок апарата гідрування

До установки приймаємо реактор з внутрішнім діаметром 600 мм, виготовлений зі сталі 12Х18Н10Т, продуктивністю 100 кг титанових відходів за цикл. Розрахунок проведено за методикою, наданою в [19].

Визначаємо об'єм  $V_{\text{стр}}$ , що займає стружка при цикловому завантаженні:

$$V_{\text{стр}} = M / \rho = 1000 : 300 = 3,33 \text{ м}^3,$$

де  $M$  – маса одночасного завантаження, кг;

$\rho$  – насипна щільність стружки, кг/м<sup>3</sup>.

Приймаємо робочий об'єм реактора  $V_p$  з запасом 40 %. Тоді об'єм реактора становить

$$V_p = 1,4 \cdot V_{\text{стр}} = 1,4 \cdot 3,33 = 4,62 \text{ м}^3.$$

Визначаємо висоту робочої частини реактора

$$h_p = 4 \cdot V_p / (\pi \cdot d_{\text{вн}}^2) = 4 \cdot 4,62 / (3,14 \cdot 0,6^2) = 4,1 \text{ м.}$$

де  $d_{\text{вн}}$  – внутрішній діаметр реактора, м.

Радиус кошику визначаємо за формулою:

$$R_k = (d_{\text{вн}} - (0,03 + d_b + 2\delta_1)) : 2 = 0,435 \text{ м,}$$

де  $d_b$  – внутрішній діаметр реактора, м;

$\delta_1$  – відстань між валом і кошиком, 0,075 м;

0,03 – компенсаційна відстань, м.

Визначаємо висоту кошику  $h_k$ , якщо відомо об'єм стружки і відновника:

$$h_k = 4V / [2 \cdot \pi (d_{\text{вн}} - 0,03)^2 - (d_b + 2\delta_1)^2] = 1,7 \text{ м.}$$

Визначаємо площу бічної поверхні одного піддону, якщо розташовано 8 піддонів:

$$S_{\delta} = 2S_{\delta 1} + S_{\delta 2} + S_{\delta 3} + S_{\text{oc}} = 2 \cdot R_k \cdot h_k + 2\pi \cdot (d_{\text{вн}} - 0,03) / 2 \cdot 8 \cdot h_k + \\ + 2\pi (d_b + \delta_1) / 2 \cdot 8 \cdot h_k + \pi \cdot [(d_{\text{вн}} - 0,03) / 2]^2 - [(d_b + 2\delta_1) / 2]^2 / 8 = 2,585 \text{ м}^2.$$

Тоді маса одного піддону складає

$$m_k = \rho \cdot V_k = \rho \cdot S_{\delta} \cdot \delta_2 = 2,585 \cdot 0,005 \cdot 7800 = 100,8 \text{ кг,}$$

де  $\delta_2$  – товщина стінки піддону, м;

$\rho$  – щільність сталі, кг/м<sup>3</sup>.

Маса реактора з валом (без піддонів) складає

$$m_p = \pi \cdot h_{\text{об}} \rho \cdot (d_{\text{н}}^2 - d_{\text{вн}}^2) / 4 + \pi \cdot h_{\text{об}} \rho \cdot d_b^2 / 4, \quad (3.1)$$

де  $h_{\text{об}}$  – загальна висота реторти, м;

$d_b$  – діаметр валу, м.

Тоді за формулою (3.1) маса реактора становить

$$m_p = 3,14 \cdot 4,3 \cdot 7800 \cdot (1,22^2 - 1,2^2) / 4 + 3,14 \cdot 4,3 \cdot 7800 \cdot 0,15^2 / 4 = 1867 \text{ кг.}$$

Отже, загальна маса реактора становить

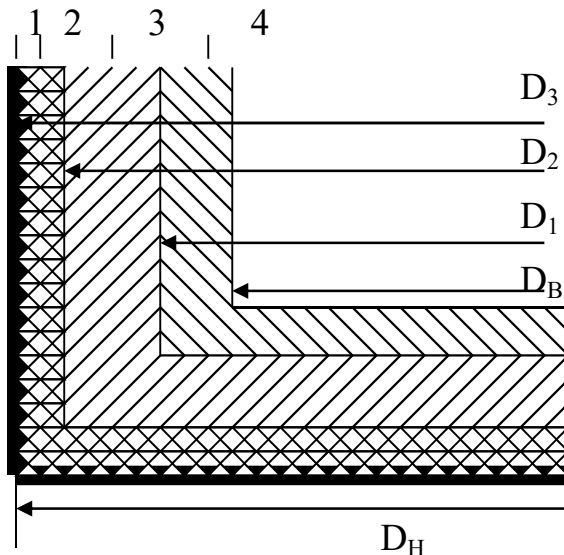
$$1867 + 16 \cdot 100,8 = 3479,8 \text{ кг.}$$

На підставі основних габаритних розмірів приймаємо такі дані, що характеризують реактор:

Діаметр, мм:

внутрішній	1200
зовнішній	1860
фланця (дорівнює діаметру кришки)	2090
Висота робочої частини, мм	4100
Загальна висота, мм	4300
Товщина кришки, мм	10
Відстань від верхнього ряду кошиків до кришки, мм	500
Маса реактора з піддонами, кг	3479,8

Для розрахунку розмірів печі приймаємо структуру футерування, наведену на рис. 3.2.



1 – залізний кожух; 2 – азбестове набивання; 3 – шамотна ультра легковага цегла; 4 – шамотна легковага цегла.

Рисунок 3.2 – Структура футеровки печі гідрування

Приймаємо, що футеровка стін печі і подини однакові. Товщину шарів футеровки і кожуха, приймаємо  $S_1 = 20$  мм;  $S_2 = 50$  мм;  $S_3 = 250$  мм;  $S_4 = 230$  мм. Відстань від зовнішньої стінки реактора до гачків підвіски нагрівачів 100 мм. Гачки підвіски нагрівачів виступають з футерування на 32 мм.

Відстань від подини печі до днища реактора 32 мм.

Внутрішній діаметр печі гідрування знаходимо по формулі [13]:

$$D_B = d_{cp} + 2c + 2l = 1050 + 2 \cdot 100 + 2 \cdot 32 = 1314 \text{ мм},$$

де  $d_{cp} = (d_B + d_H)/2$  – середній діаметр реактора, м;

$c$  – відстань від зовнішньої стінки реактора до гачків підвіски нагрівачів, 0,1 м;

$l$  – висота виступу гачків підвіски нагрівачів з футерування, 0,032 м.

$$D_B = (1,246 + 1,226)/2 + 2 \cdot 0,100 + 2 \cdot 0,032 = 1,500 \text{ м}.$$

Зовнішній діаметр печі знаходимо по формулі:

$$D_H = D_B + 2S_1 + 2S_2 + 2S_3 + 2S_4, \quad (3.2)$$

де  $S_1, S_2, S_3$  – товщина шарів футеровки печі, мм;

$S_4$  – товщина кожуха печі, мм.

$$D_H = 1,500 + 2 \cdot (0,02 + 0,050 + 0,250 + 0,23) = 2,6 \text{ м}.$$

Загальну висоту печі визначаємо з виразу:

$$H = h + l_g + h_n + h_\phi, \quad (3.3)$$

де  $h$  – висота реактора, мм;

$l_g$  – відстань від поду печі до днища реактора, 0,300 м;

$h_n$  і  $h_\phi$  – відповідно товщина пода печі і фланця реактора, м.

Тоді за формулою (3.3) отримаємо:

$$H = (4,1 - 0,05) + 0,3 + 0,01 + 0,02 + 0,05 + 0,25 + 0,23 + 0,03 = 4,94 \text{ м}.$$

### **3.3 Розрахунок теплового балансу апарата гідрування титанових відходів**

Складаємо тепловий баланс гідрування титанової стружки в апараті гідрування за один цикл.

Витрати теплоти.

Потужність печі розрахуємо по періоду початкового розігріву від 300 до 455 °С, який повинен забезпечити найбільшу швидкість розігріву. Тривалість розігрівання 2 години.

Під час розігріву печі мають місце такі тепловтрати:

- тепло, яке акумульовано кладкою печі,  $Q_1$ ;
- тепло, що витрачається на нагрів реактора,  $Q_2$ ;
- тепло, що втрачається через кришку реактора,  $Q_3$ ;
- тепло, що втрачається в навколишній простір,  $Q_4$ ;
- тепло, що витрачається на нагрів води, що охолоджує фланці,  $Q_\phi$ .

1. Визначаємо кількість теплоти, яка акумульована футеровкою печі:

$$Q_1 = Q_{\text{л}} + Q_{\text{а}} + Q_{\text{у}} + Q_3,$$

де  $Q_{\text{л}}$  – тепло, що акумульоване легковою цеглою;

$Q_{\text{а}}$  – тепло, що акумульоване азбестовим засипанням;

$Q_{\text{у}}$  – тепло, яке акумульоване ультралегковою цеглою;

$Q_3$  – тепло, яке акумульоване залізним кожухом.

Для розрахунків приймаємо на початку розігріву печі температуру, °С:

внутрішньої поверхні кладки	300
зовнішньої поверхні кожуха	30
на межі легковою - ультралегковою цегли	160
на межі ультра легковою цегли - азбест	90
на межі азбест-залізо	30.

В кінці розігріву печі відповідно до наведеного, °С: 700; 50; 600; 100; 50.

Визначаю середню температуру вогнетривких шарів:

- на початку розігріву:

$$t'_{\text{ср.л}} = \frac{(300 + 160)}{2} = 230^{\circ} \text{C};$$

$$t'_{\text{ср.у}} = \frac{(160 + 90)}{2} = 125^{\circ} \text{C};$$

$$t'_{\text{ср.м}} = \frac{(90 + 30)}{2} = 60^{\circ} \text{C};$$

- в кінці розігріву:

$$t''_{\text{ср.л}} = \frac{(865 + 700)}{2} = 780^{\circ} \text{C};$$

$$t''_{\text{ср.у}} = \frac{(700 + 100)}{2} = 400^{\circ} \text{C};$$

$$t''_{\text{ср.м}} = \frac{(100 + 50)}{2} = 75^{\circ} \text{C};$$

Знаходимо масу легкової цегли при її щільності  $\rho_l = 1 \text{ т/м}^3$ :

$$m_l = \frac{(\pi \cdot D_l^2) - \pi D_6^2}{4} H \cdot \rho_l = \frac{(3,14 \cdot 1,45^2) - 3,14 \cdot 1,314^2}{4} \cdot 1 \cdot 3,05 = 0,898; \quad (3.3)$$

Встановлюємо зміну середньої температури легкової цегли за період розігріву печі:

$$\Delta t_{\text{ср.л}} = t''_{\text{ср.л}} - t'_{\text{ср.л}} = 780 - 230 = 550^{\circ} \text{C}. \quad (3.4)$$

Теплоємність легкової цегли (при  $a = 1,046$  і  $b = 0,00092$ ) визначаємо за формулою:

$$C_l = a + b t_{\text{ср.}} = 1,046 + 0,00092 \cdot 550 = 1,553 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К}. \quad (3.5)$$

Кількість тепла, яке акумулюється легковою цеглою:

$$Q_l = m_l \cdot C_l (t_2 - t_1) = 898 \cdot 1,553 \cdot 550 = 767027 \text{ кДж}. \quad (3.6)$$

Знаходимо масу ультралегкової цегли при його щільності  $0,33 \text{ т/м}^3$ :

$$m_y = \left( \frac{\pi D_2^2}{4} - \frac{\pi D_1^2}{4} \right) H \cdot \rho_y = \left( \frac{3,14 \cdot 2,27^2}{4} - \frac{3,14 \cdot 1,45^2}{4} \right) \cdot 0,33 \cdot 3,05 = 2,41; \quad (3.7)$$

Встановлюємо зміни середньої температури залізного кожуха за період розігріву печі:

$$\Delta t_{\text{ср.з}} = t''_{\text{ср.з}} - t'_{\text{ср.з}} = 50 - 30 = 20^{\circ} \text{C}.$$

Приймаємо теплоємність заліза  $0,51 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К}$ .

Кількість тепла, що акумулюється залізом, знаходимо за формулою:

$$Q_3 = m_3 \cdot C_3 \cdot \Delta t = 2872 \cdot 0,51 \cdot 20 = 30298 \text{ кДж}.$$

Всього тепла, що акумулюється футеровкою печі:

$$Q_1 = 86702 + 324085 + 13461 + 30298 = 253071 \text{ кДж}.$$

2. Кількість тепла, що йде на нагрів реактора, визначаємо наступним чином. Реактор встановлюється в піч після попереднього нагрівання до  $700^{\circ} \text{C}$  з подальшим розігрівом в печі до  $755^{\circ} \text{C}$ . Приймаємо теплоємність заліза при  $755^{\circ} \text{C}$  рівною  $0,67 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К}$ .

Знаходимо різницю температур при нагріванні реактора:

$$\Delta t = 755 - 700 = 55^{\circ} \text{C}.$$

Визначаємо тепло, що йде на нагрів реактора:

$$Q_2 = m_p \cdot C_3 \cdot \Delta t = 3850 \cdot 0,67 \cdot 55 = 254370 \text{ кДж/год}$$

3. Для визначення теплоти через кришку реактора від розплаву приймаємо: коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла  $5,7 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$ ; коефіцієнт діафрагмування  $0,75$ ; температура поверхонь розплаву і кришки  $0,8$ ; температуру навколишнього середовища  $293 \text{ К}$  ( $t_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ); коефіцієнт конвекції у горизонтальній площині вгору  $2,8$ ; коефіцієнт випромінювання

6. Визначаємо теплоти, що йде на нагрівання піддонів:

$$Q_6 = 16 \cdot m_k \cdot C_{кр} \cdot (t_k - t_п) = 16 \cdot 100,8 \cdot 0,586 \cdot (950 - 20) = 878944 \text{ кДж/год}$$

або

$$Q_6 = 878944 : 4 = 219736 \text{ кДж/год.}$$

7. Визначаємо тепло, що йде на нагрівання стружки:

$$Q_7 = m_{стр} \cdot C_T \cdot \Delta t = 1000 \cdot 0,656 \cdot (950 - 20) = 610080 \text{ кДж/год}$$

або

$$Q_7 = 610080 : 4 = 152520 \text{ кДж/год.}$$

Загальні втрати теплоти в період гідрування:

$$\begin{aligned} Q_{\text{вит}} &= 253071 + 254370 + 219736 + 152520 + 121363 + 51293 = \\ &= 1052353 \text{ кДж/год.} \end{aligned}$$

Частина втрат компенсується за рахунок тепла, що вноситься реактором і піччю, нагрітими до  $700$  і  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  відповідно.

8. Кількість тепла, яке повинно бути підведено за рахунок електричного нагрівання

$$Q_{\text{ел}} = 1246708 - 619850 - 236484 = 922317 \text{ кДж/год.}$$

Необхідну електричну потужність печі при коефіцієнті запасу потужності  $K = 1,15$  знаходжу з виразу:

$$P = K \cdot Q_{\text{ел}} / 3600 = 1,15 \cdot 262957 / 3600 = 84 \text{ Вт.}$$

9. Визначаємо кількість теплоти, що внесено нагрітим реактором:

$$Q_p = m_p \cdot c_{ст} \cdot t_п = 3479,8 \cdot 0,46 \cdot 700 = 35494 \text{ кДж.}$$

Прихід теплоти за 1 годину розігріву печі:

$$Q_p = 35494 : 4 = 2281 \text{ кДж/год.}$$

10. Визначаємо кількість теплоти, що внесено стружкою:

$$\begin{aligned} Q_{\text{ст}} &= (m_{\text{ст}} \cdot c_{\text{ст}} + m_k \cdot c_k + c_M m_M) \cdot t_п = \\ &= (1000 \cdot 0,935 \cdot 0,515 + 1000 \cdot 0,005 \cdot 0,94 + 1000 \cdot 0,06 \cdot 1,38) \cdot 20 = \end{aligned}$$

$$= 11381 \text{ кДж або } 11381 : 16 = 711 \text{ кДж/год.}$$

Прихід теплоти за 1 годину розігріву печі:

$$Q_{\text{над}} = 922317 + 2281 + 711 + 3861 + 123183 = \\ = 1052353 \text{ кДж/год.}$$

Таблиця 3.2 – Тепловий баланс апарата гідрування

Надійшло			Отримано		
Стаття	Кількість		Стаття	Кількість	
	кДж/год	%		кДж/год	год
Теплота електричного нагріву	922317	87,64	Теплота, що акумулюється футеровкою печі	253071	24,05
Теплота, що вноситься реактором	2281	0,22	Теплота, що витрачається на нагрів реактора	254370	24,17
Теплота, що вноситься стружкою	711	0,07	Теплота, що витрачається на нагрів кошиків	219736	20,88
Теплота екзотермічних реакцій	3861	0,37	Теплота, що витрачається на нагрів стружки	152520	14,49
Теплота нагрітих до 0 °С кладки та кожуха печі	123183	11,70	Втрати теплоти через футеровку печі	121363	11,53
			Теплота, що втрачається через кришку реактора	51293	4,88
Усього	1052353	100,00	Усього	1052353	100,00



## **4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА**

### **4.1 Шкідливі та небезпечні фактори під час гідрування титанової стружки**

Вимоги до умов виробництва і технологічної чистоти приміщення, де відбувається виробництво гідриду титану визначаються, в першу чергу, властивостями титанової стружки та гідриду титану, що володіють високорозвиненими поверхнями, здатністю сорбувати вологу повітря, що призводить до погіршення якості отриманого гідриду титану. Одночасно, низька відносна вологість повітря в виробничому приміщенні може призвести до значного накопичення статичної електрики в потоці рухомих частинок гідриду титану і, таким чином, підвищити пожежну небезпеку виробництва. Згідно з санітарними нормами відносна вологість повітря у виробничих приміщеннях повинна становити 40-60 % [21].

У виробничому приміщенні на людину можуть негативно впливати наступні чинники [22]:

- 1) підвищена або знижена температура повітря;
- 2) надмірна запиленість загазованість повітря;
- 3) підвищена або знижена вологість повітря;
- 4) недостатня освітленість робочого місця;
- 5) шум, що перевищує допустимі норми;
- 6) небезпека ураження електричним струмом.

Основними шкідливими виробничими факторами на ділянці гідрування титанової стружки є шум, що досягає 86 дБА, джерелом якого є металургійне обладнання, електромостовий кран, вентиляційні установки, та небезпека ураження електричним струмом. Також основними небезпечними речовинами є водень, маслянисті пари та аргон. Водень утворює вибухову суміш з повітрям в межах від 4 % до 75 % за об'ємом [21]. Допустима концентрація масляних парів

у повітрі  $300 \text{ мг/м}^3$ , масляного туману  $5 \text{ мг/м}^3$  [21]. Аргон може накопичуватись в непровітрюваних місцях і викликати задуху у людини[21].

Аналіз шкідливих і небезпечних факторів та карта умов праці для робочого місця працівника ділянки гідрування надано в таблиці 4.1 [23].

Таблиця 4.1 – Оцінка факторів виробничого процесу на ділянці гідрування

№ п/п	Фактори виробничого середовища та трудового процесу	Нормативне значення ГДР, ГДК	Фактичне значення	III клас: шкідливі та небезпечні умови, характер праці			Час дії фактора, %
				I ступінь	II ступінь	III ступінь	
1	Шкідливі хімічні речовини, $\text{мг/м}^3$ : II клас безпеки Гідроген	5	0,80				89,13
2	Пил переважно фіброгенної дії, $\text{мг/м}^3$	10	13	1,30			89,13
3	Вібрація (загальна і локальна), дБ	92	72,00				100,00
4	Шум, дБА	80	86,00	6,00			100,00
5	Мікроклімат в приміщенні: - температура повітря, К	288-294	6,20			8,80	89,13
	- швидкість руху повітря, м/с	0,1-0,4	0,24				89,13
	- відносна вологість повітря, %	40-75	79	4,00			89,13
6	Важкість і напруженість праці						
	- маса підіймання і переміщення вантажу, кг	>30 чол., >15 жін.		15			89,13

Ділянка гідрування титанової стружки та отримання гідриду титану є приміщенням важкої категорії ( виконуються важкі фізичні роботи, робота з працюючими металургійними механізмами які під'єднанні до електродвигунів)

#### **4.2 Заходи щодо усунення шкідливих та небезпечних факторів виробничого середовища**

*Виробнича санітарія.* Для збереження здоров'я працюючих велике значення має чистота повітря, відсутність у ньому шкідливих газів, парів і пилу, або їх наявність у дозах, нешкідливих для організму.

Мікроклімат виробничих приміщень характеризується температурою, вологістю повітря, швидкістю переміщення повітряних мас, а також тепловим випромінюванням від нагрітих обладнання, машин, предметів праці. Від комплексного впливу цих елементів залежать теплові відчуття і зумовлені ними фізіологічні та психічні стани працівників.

У зв'язку з тим, що ряд виробничих операцій розмелювання і розсівання гідриду титану і титанових матеріалів, ремонт млинів, дробарок тощо являють собою важкі фізичні, роботи допустимі норми температури, відносної вологості і швидкості руху повітря в робочій зоні виробничих приміщень повинні відповідати вимогам, що висувають до робіт III категорії.

Робітники, зайняті отриманням гідриду титану, повинні бути забезпечені побутовими приміщеннями, обладнані душовими згідно СНіП.

Мікроклімат ділянки для отримання гідриду титану зумовлюється технологічним процесом і певною мірою зовнішніми метеорологічними умовами. В цеху для виробництва гідриду титану тепловиділення від обладнання, матеріалів становить 10 ккал на 1 м<sup>3</sup> за годину. Як правило, основними при цьому є теплові випромінювання від нагрітих поверхонь обладнання і матеріалів. Виконання роботи в умовах теплового випромінювання і високих температур викликає різко виражені фізіологічні

зрушення в організмі працюючих. Їхня працездатність в таких умовах знижується на 50 %. Фізіологами встановлено, що температура 22 °С є тією межею, за якою починається прогресивне зниження працездатності. Так, при підвищенні температури до 26 °С вона зменшується на 4 % з кожним градусом, а при подальшому її підвищенні до 30 °С на 6 %.

Розмелювання титанових матеріалів на млинах, розсівання на грохотах супроводжується шумом та вібрацією, які негативно впливають на працездатність і здоров'я працівників. Механічні коливання вузлів і деталей викликають коливання повітря і сприймаються органами слуху людини як звуки. Комплекс хаотичних звуків, різних за частотою та інтенсивністю, які викликають неприємні суб'єктивні відчуття, називається шумом. Шуми різняться за гучністю (в фонах) і за висотою (менше як 350 Гц низькочастотні; 350-800 Гц середньо частотні; понад 800 Гц високочастотні). Людина сприймає звуки частотою 16-20000 Гц. Звуки з частотою до 16 Гц називаються інфразвуками, а понад 20000 Гц ультразвуками. Хоча вони вухом не сприймаються, зате відчуваються тканинами організму. На виробництві шум може бути постійним і непостійним, коли рівень його під час роботи змінюється більше ніж на 5 дБ. Непостійні шуми поділяються на перервні, імпульсні та флюктуючі, коли рівень шуму весь час коливається. Ступінь негативного впливу шуму залежить від сили і частоти звуку, тривалості його дії, фізичного і психічного стану людини. Шкідливий вплив виробничого шуму виявляється як у вигляді специфічного ушкодження органів слуху, так і у вигляді порушень багатьох інших органів, в першу чергу центральної нервової системи. Інтенсивний виробничий шум призводить до часткової або повної втрати слуху. Зміни слуху наступають при дії шуму більше 80 дБ і відбуваються протягом 3-5 років залежно від фізичного стану працівника. Ознаками розвитку приглухуватості є погане сприйняття розмови пошепки та шум у вухах. Збільшення тривалості роботи в умовах підвищеного шуму супроводжується прогресивним розвитком втрати слуху. При цьому спочатку виникає слухова адаптація зниження слухової чутливості і швидке відновлення

слуху після припинення дії шуму. Згодом процес відновлення слуху затягується, а втома слухового аналізатора переходить у перевтому.

Тривалий (більше 10 років) вплив шуму вище 90 дБ на працівника може викликати не тільки приглухуватість, але й абсолютну втрату слуху внаслідок дегенерації чутливих клітин внутрішнього вуха в зв'язку з їх перенапруженням. Такі розлади слуху у працівників кваліфікуються як незворотні [44,45]. Під впливом шуму відбуваються зміни не тільки в слуховому центрі нервової системи, але і в тих відділах, які регулюють такі життєво важливі функції, як кровообіг, дихання, травлення, кровотворення, рухову діяльність та інші. Це зумовлено тим, що нервові імпульси від органів слуху посилюються ретикулярною формацією і поширюються по всьому мозку.

*Інженерні заходи для поліпшення умов праці* є: належний стан вікон, ліхтарів, перекриттів будівлі, які перешкоджають попаданню атмосферної вологи всередину виробничих приміщень; автоматичне закриття воріт; душення осушеним теплим повітрям в'їзних воріт та вхідних дверей в холодний період року; систему кондиціонування повітря або подачу осушеного повітря в місця найбільших вантажопотоків титанових матеріалів (створення підвищеного барометричного тиску); систематичний, цілодобовий контроль температури й вологості повітря.

*Виробниче освітлення.* Обов'язковою умовою яке висувається до всіх виробничих приміщень це наявність природного освітлення. Штучне освітлення слід використовувати всередині приміщень і на вулиці, де постійно або тимчасово присутні працівники. Виробничі цехи, відділення, кабінети мають такі види освітлення: робоче та аварійне. Метою робочого освітлення є забезпечення освітлення робочої поверхні не менше стандартного. Аварійне освітлення забезпечує не менше 5 % від норми на робочих поверхнях. У разі систем загального освітлення рівень аварійного освітлення в будівлі повинен бути не менше 2 Лк.

Евакуаційне освітлення повинно забезпечувати не менше 0,5 лк на поверхнях, сходах на проходах. При поганому або недостатньому освітленні

приміщень у працівників підприємства можуть виникати проблеми з органами зору також це може призвести до негативних наслідків для здоров'я під час виконання роботи.

*Заходи з електробезпеки.* Електробезпека – це система організаційних і технічних заходів, які повинні забезпечувати захист людей від шкідливого та загрозового впливу електричного струму, електромагнітного поля, електричної дуги та статичної електрики. Для уникнення нещасних випадків та опіків від електричного струму керівництво фірми має піклуватися про заземлення та занулення кожної електроустановки. В кожному відділі підприємства знаходиться щонайменше 5 електроприладів. Всі співробітники повинні бути ознайомлені з правилами безпечної роботи з обладнанням та електроприладами та сумлінно дотримуватися їх.

При виконанні робіт необхідно застосовувати спецодяг: костюм для захисту від підвищених температур НПАОП 270-3.01-08, взуття і засоби індивідуального захисту: каска, окуляри захисні, респіратори, навушники протишумні типу ВЦННІОТ-2М4А, вкладиші протишумові «беруши». Засоби індивідуального захисту. Специфічні вимоги до техніки безпеки на ділянці виробництва гідриду титану визначаються, виходячи з потреби використання різноманітного обладнання під час багатостадійного пожежа-небезпечного виробництва, а також в умовах підвищеної запиленості - вибухонебезпечного матеріалу. Наявність різноманітного обладнання з рухомими робочими органами, засобів механізації та різного виду транспортних вантажно-розвантажувальних машин і механізмів (мостові крани, електронавантажувачі, електрокари, кантователі та ін.), компонування обладнання з розташуванням робочих місць на значній висоті від підлоги, обумовлюють можливість підвищеної травмо небезпечності.

Горіння сполук металів, їх сплавів, металовмісних речовин, в тому числі металоорганічних речовин згідно ДСТУ 27331 поділяють на 3 класи:

- клас Д1 - горіння легких металів (алюміній, магній і їх сплави, кальцій, титан), умовно "важких" металів (цирконій, ніобій, уран та ін.);

- клас Д2 - горіння лужних металів (літій, натрій, калій та ін.);
- клас Д3 - (металоорганічні сполуки: алюмо-, літій-, цинк- органіка, гідриди алюмінію, літій та ін.).

Здатністю займатися володіють лужні метали, стружка, металеві порошки, що мають не окислену активну поверхню, гідриди металів, МОС (класи пожеж Д2, Д3). Найбільш пожежо-вибухонебезпечними металами, горіння яких відбувається по класу Д1, є легкі метали у вигляді продуктів їх переробки : порошоків різної дисперсності, стружки. Метали у вигляді виробів різної конфігурації (листи, профілі і тому подібне) підпалити практично не можливо, якщо забезпечуються умови переважання тепловідводу над теплоприходом.

Гідриди металів займають проміжне положення між металами і органічними сполуками. Пов'язано це з тим, що при їх розкладанні виділяється водень, що можна розглядати як аналогію процесу виділення горючих газів при піролізі органічних матеріалів, що згорають в газовій фазі. При цьому гідриди металів значно розрізняються між собою за своїми фізико-хімічними властивостями, по механізму горіння і займання. Так, гідриди титану, ніобію, танталу та інші є по суті розчинами водню в металі і мають змінний склад з металевим типом зв'язку. Вони горять в основному в тліючому режимі, полум'яне горіння водню практично відсутнє.

Будівлю, в якій отримують гідрид титану по вибуховій і пожежній небезпеці можна віднести до приміщення категорії Д, оскільки є горючі і важкоспалимі речі (різне металургійне устаткування, балони під тиском), які при взаємодії з вогнем можуть горіти з вибухом. За конструктивними характеристиками будівлю можна віднести до будівель з несучими та огорожуваними конструкціями з природних або штучних кам'яних матеріалів, бетону або залізобетону. Отже, ступінь вогнестійкості будівлі можна визначити як третю (III) [21].

Причиною виникнення пожежі у будівлі можуть бути:

- несправності електропроводки, розеток і вимикачів, які можуть привести до короткого замикання або пробою ізоляції;
- виникнення пожежі в наслідок попадання блискавки в будинок;
- загоряння будівлі внаслідок зовнішніх впливів;
- недотримання заходів пожежної безпеки.

Для гасіння пожеж на ділянці гідрування титанової стружки використовуються порошкові вогнегасники, пісок, кошма та ручні пожежні інструменти – гаки, ломи, сокири, відра, лопати. Інструменти розміщені на видних і доступних місцях на стендах та щитах.

Для швидкого виявлення та повідомлення про місце виникнення пожеж в цеху є автоматична пожежна сигналізація АДС (автоматичний димовий сповіщувач). Для зв'язку використовують телефон, радіотелефон [21].

Необхідними заходами для запобігання пожежі є своєчасний ремонт електроприладів, якісне виправлення поломок, протипожежний інструктаж, на якому працівники ознайомлюються з правилами протипожежної безпеки та використання первинних засобів пожежогасіння [21].

Особливу увагу необхідно приділяти евакуації людей з приміщень. Евакуація проводиться по заздалегідь спланованих шляхах. Схеми евакуації розташовані в доступних для огляду людини місцях.



## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Титан знаходить широке застосування в авіа-, ракето- і суднобудуванні, хімічному машинобудуванні, медицині й інших галузях техніки.
2. Гідрид титану застосовується: а) як паливо та джерело водню; б) для отримання елементів високої чистоти та покриттів; в) як захист від нейронів; г) в порошковій металургії; д) в ядерній техніці.
3. Титанові відходи класифікують на 4 класи: а) клас А – брухт і кускові відходи титану і титанових сплавів; б) клас Б – стружка титану і титанових сплавів; в) клас З – листовий обріз титану і титанових сплавів; г) клас Г – шлаки та інші відходи титану і титанових сплавів. Від загальної кількості відходів, що утворюються, частка кускових відходів складає 25 %, листових – 20–30 % і стружки 45–55 %.
4. Проаналізовано способи гідрування титанової стружки. Для гідрування титанової стружки вибрано пряме насичення титану воднем.
5. Вивчено особливості та розроблено технологію гідрування титанової стружки.
6. Для гідрування титанових відходів вибрано апарат гідрування, виконано його конструктивний розрахунок.
7. Складено матеріальний баланс гідрування титанової стружки та визначено витратні коефіцієнти.
8. Виконано розрахунок теплового балансу процесу гідрування титанової стружки. Визначено потужність печі.
9. Проведено аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів процесу гідрування титанової стружки. Розроблено заходи щодо поліпшення умов праці.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Основи металургійного виробництва металів і сплавів : підручник / Д. Ф. Чернега та ін. ; за ред. Д. Ф. Чернеги, Ю. Я. Готвянського. Київ : Вища школа, 2006. 503 с.
2. Верховлюк А. М., Нарівський А. В., Могилатенко В. Г. Технології одержання металів та сплавів для ливарного виробництва : навч. посіб. / за ред. акад. НАН України В. Л. Найдека. Київ : ВД“Вініченко”, 2016. 224 с.
3. Nesterenko T. M. Modern state and technologies of titanium alloys production. *Innovation in der modernen Wissenschaft* : monografische Reihe «Europäische Wissenschaft». Buch 12. Teil 1. Karlsruhe, 2022. S. 5,8–34,165–167.
4. Сучасний стан і прогноз розвитку світової титанової промисловості на період до 2026 року. Повідомлення 4. Феротитан / Колобов Г. О. та ін. *Металургія*. Запоріжжя, 2020. Вип. 1. С. 5–10.
5. Гарнець В. М., Коваленко В. М. Конструкційне матеріалознавство. Київ : Либідь, 2007. 384 с.
6. Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів / В. В. Хільчевський, С. Є. Кондратюк, В. О. Степаненко, К. Г. Лопатько. Київ: Либідь, 2002. 327 с.
7. Norgate T. E., Wellwood G. The potential applications for titanium metal powder and their life cycle impacts. *Ibid.* 2006. V. 58, N 9. P. 58–63.
8. Leyens C., Peters M. Titanium and titanium alloys. Fundamentals and applications. Wiley–VCH, Germany, 2003. 513 p.
9. Нестеренко Т. М., Скачков В. О., Воденнікова О. С. Теорія і технологія порошкової металургії : навч. посіб. Запоріжжя : ЗДІА, 2016. 192 с.
10. ДСТУ 3211–95 (ГОСТ 1639–93) Брухт і відходи кольорових металів і сплавів. Загальні технічні умови. Київ : Держстандарт України, 1997. 62 с.
11. Patent 5968224 USA : IPC6 C 22 B 34/12. Recovery of titanium from granular chip by melting in electrical furnace / S. J. Gerdemann, J. C. White. № 9/126867. patent 31.07. 1998; published 19.10.1999.

12.Нестеренко Т. М., Нестеренко О. М. Дослідження впливу попередньої обробки поверхні стружки титанових сплавів на вибір подальшої технології рециркулювання. *Інноваційні підходи до розвитку техніки і технологій*. В 2 кн. Кн.2 : монографія. Одеса, 2015. С. 76–88.

13.Ivanov V. I., Nesterenko T. M., Lukoshnikov I. E. About metal layer deposition on cathode at electrolysis of ionic melts. *SWorld Journal*. 2017. Issue 11. Vol.10. P. 83–86.

14.Nesterenko T. M., Nesterenko O. M. Degreasing of titanium chips for production of titanium powders by hydrometallurgical deoxidation method. *SWorld Journal*. 2017. Issue 13. P. 220–223.

15.Основи фізичного матеріалознавства : навч. посіб. : у 2 ч. / В. С. Княшкін, А. С. Опанасюк, К. О. Дядюра. Суми, 2015. Ч. 2. 291 с.

16.Металознавство і термічна обробка металів і сплавів / Ю. М. Таран та ін. Дніпропетровськ: Дніпрокнига, 2002. 260 с.

17.Джонс М. М. Підготовка відходів титанових сплавів до переробки. *Титан*. 2008. № 5. С. 27–30.

18.Нестеренко Т. М., Червоний І. Ф., Грицай В. П. Теоретичні основи гідрометалургійних процесів : підручник. Київ : Вища школа, 2013. 408 с.

19.Гороновський І. Т., Назаренко Ю. П., Некряч Є. Ф. Довідник з хімії. Під загал. ред. А. Т. Пилипенко. 5-е вид., виправл. та доп. Київ : Наукова думка, 2003. 631 с.

20.Гандзюк М. П., Желібо Е. П., Халимовський М. О. Основи охорони праці : підручник. Київ : Каравела, 2005. 393 с

21.Катренко Л. А., Пістун І. П. Охорона праці в галузі освіти. Київ: Університетська книга, 2001. 340 с.

22.Дмитрієв С. Л., Нестеренко С. В. Основи пожежної безпеки. Харків: ХНАМГ, 2008. 64 с.

23.Жидецький В. Ц., Джигирей В. С., Мельников О. В. Основи охорони праці. Львів: Афіша, 2000. 348 с.