

Міністерство освіти і науки України

Запорізький національний університет

(повна найменування вищого навчального закладу)

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

( назва факультету )

Кафедра металургійних технологій, екології та техногенної безпеки

(повна назва кафедри )

## Пояснювальна записка

до кваліфікаційної магістерської роботи

рівень вищої освіти другий (магістерський )  
(другий (магістерський) рівень)

на тему Аналіз процесів поверхневого  
зміцнення та визначення жаростійкості поверхневого шару на титанових  
сплавах

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1362-омт

Лобко Дмитро Сергійович  
(ПІІІ) (підпис)

спеціальності  
136 Металургія  
(цифри і назва)

спеціалізація  
(цифри і назва)

освітньо-професійна програма  
обробка металів тиском  
(цифри і назва)

Керівник к.т.н. доц. Бондаренко Ю.В.  
(організація та ініціали) (підпис)

Рецензент Белоконь Ю.О.  
(організація та ініціали) (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 другий магістерський рівень

другий (магістерський) рівень

Спеціальність 136 металургія

(цифра і назва)

Освітньо-професійна програма обробка металів тиском

(цифра і назва)

З А Т В Е Р Д Ж У Ю  
Завідувач кафедри МТЕТБ  
Ю.О. Белоконь

" 07 " 05 2023 року

**З А В Д А Н Н Я  
НА КВАЛІФІКАЦІНУ РОБОТУ (ПРОЕКТ) СТУДЕНТУ**

Добко Дмитро Сергійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Аналіз процесів поверхневого зміцнення та визначення жаростійкості поверхневого шару на титанових сплавах

керівник роботи (проекту) Бондаренко Юлія Володимирівна к.т.н. доцент

( прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від "07" 05 2023 року № 1581-с від 09.10.2023

2. Строк подання студентом роботи (проекту) 01.12.2023

3. Вихідні дані до роботи (проекту) є аналіз отримання захисних покриттів на титанових сплавах та визначення жаростійкості поверхневого шару що отримано в умовах саморозповсюджувального температурного синтезу

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Реферат. Вступ. Аналітично-пошукова частина. Матеріали, обладнання та методики проведення експериментів. Розробка оптимальної технології і складів для отримання багатоконпонентних захисних покриттів. Охорона праці та техногенна безпека. Висновки. Перелік джерел посилань.

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
<u>Розділ 1</u> <u>Дослідницько-розрахункова частина</u>	<u>Бондаренко Ю.В., доцент</u>	
<u>Розділ 2</u> <u>Матеріали, обладнання та методика проведення експериментів</u>	<u>Бондаренко Ю.В., доцент</u>	
<u>Розділ 3</u> <u>Розробка оптимальної технології і складів для отримання багатокомпонентних захисних покриттів</u>	<u>Бондаренко Ю.В. доцент</u>	
<u>Розділ 4</u> <u>Охорона праці та техногенна безпека</u>	<u>Бондаренко Ю.В. доцент</u>	
<u>Надмаконтракт</u>	<u>Бєлокань Ю.О. завідувач кафедри</u>	

7. Дата видачі завдання 07.05.2023

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН



№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	<u>Вступ</u>	<u>до 30.11.2023</u>	
2	<u>Реферат</u>	<u>до 30.11.2023</u>	
3	<u>Аналітично-пошукова частина</u>	<u>до 30.06.2023</u>	
4	<u>Матеріали, обладнання та методика проведення експериментів</u>	<u>до 19.11.2023</u>	
5	<u>Розробка оптимальної технології і складів для отримання багатокомпонентних захисних покриттів</u>	<u>до 26.11.2023</u>	
6	<u>Охорона праці та техногенна безпека</u>	<u>до 30.11.2023</u>	
7	<u>Висновки</u>	<u>до 30.11.2023</u>	

Студент \_\_\_\_\_ Добка Д.С.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи) \_\_\_\_\_ Ю.В. Бондаренко  
(підпис) (прізвище та ініціали)

## Реферат

Кваліфікаційна робота магістра: 80 стр., 7 рис., 11табл.,52 джерел  
посилань

ТИТАН, ОБРОБКА, СТРУКТУРА, ВЛАСТИВОСТІ, ЗАХИСТ,  
ПОВРХНЯ, СПЛАВИ, ЗМІЦНЕННЯ, ХІМІКО-ТЕРМІЧНА ОБРОБКА,  
ДИФІЗИЯ, СИНТЕЗ,ШАР, ЗАХИСНІ ПОКРИТТЯ, МІКРОТВЕРДІСТЬ,  
ЗНОСОСТІКІСТЬ, ЖАРОСТІЙКІСТЬ

Об'єкт дослідження – шарові дифузійні покриття, що отримано на титанових сплавах.

Мета роботи є аналіз отримання захисних покриттів на титанових сплавах та визначення жаростійкості поверхневого шару що отримано в умовах саморозповсюджувального температурного синтезу.

В результаті математичного планування були отримані поверхні відгуку 10 та рівняння регресії, що описують вплив кожного фактора на параметр оптимізації. Так Оптимальні показники жаростійкості зі збільшенням маси зразка показані синім кольором на поверхнях і становлять 9-15 г/м<sup>2</sup> при температурі насичення 950-1050° С часу витримки 75-90 хв і вмісту кремнію в суміші 12-20%..

При дослідженні на жаростійкість встановлено, що зі збільшенням вмісту алюмінію, величина зменшення ваги зменшується. Оптимальним вмістом алюмінію є 22% мас.

Оптимальним режимом протікання процесу самозаймання є температура витримки – 1025° С, час витримки - 120 хв, максимальна температура розігріву 1200° С.

Оптимальні показники жаростійкості – 11-14 мг/м<sup>2</sup>. Похибка рівнянь регресії становила не більше 1%.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 АНАЛІТИЧНО-ПОШУКОВА ЧАСТИНА.....	9
1.1 Загальні відомості про титан та його сплави.....	9
1.2 Механічна обробка титанових сплавів.....	13
1.3 Аналіз структури, властивостей та методів захисту поверхні титанових сплавів.....	18
1.4 Зміцнення титанових сплавів хіміко-термічними методами.....	20
1.5 Дифузійне насичення титанових сплавів за допомогою саморозповсюджувального високотемпературного синтезу (СВС).....	21
1.6 Формування дифузійних шарів.....	29
2. МАТЕРІАЛИ, ОБЛАДНАННЯ ТА МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТІВ.....	33
2.1. Матеріали та обладнання.....	33
2.2 Методика проведення експерименту та статистична обробка отриманих результатів.....	35
3. РОЗРОБКА ОПТИМАЛЬНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ І СКЛАДІВ ДЛЯ ОТРИМАННЯ БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ ЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ.....	45
3.1 Мікротвердість.....	53
3.2. Зносостійкість зміцнених зразків.....	54
3.3. Залишкові напруження.....	55
3.4. Жаростійкість поверхонь.....	56
3.5. Дослідження характеристик міцності титанових сплавів.....	57
3.6. Дослідження корозійної стійкості.....	59
3.7. Дослідження шорсткості поверхні.....	61
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА.....	63
4.1 Загальні вимоги охорони праці.....	63

	6
4.2 Аналіз небезпечних виробничих факторів.....	63
4.3 Аналіз шкідливих виробничих факторів.....	64
4.4 Допустимі рівні шуму на робочих місцях.....	68
4.5 Влаштування системи відведення та очищення газів.....	71
4.6 Пожежна безпека.....	72
ВИСНОВКИ.....	74
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	75

## ВСТУП

Титанові сплави грають велику роль авіаційної техніці, де потрібно отримати найлегшу конструкцію разом із необхідної міцністю. Титанові сплави мають меншу вагу порівняно з іншими сплавами, але в той же час може працювати при більш високих температурах. З титанових сплавів виготовляють обшивку, деталі кріплення, силовий набір, деталі шасі, різні агрегати. Також ці матеріали застосовуються в конструкціях авіаційних реактивних двигунів. Це дозволяє зменшити їхню масу на 10-25%.

Багато властивостей, які надають титановим сплавам статусу привабливого матеріалу для виготовлення деталей, мають значний ефект на його оброблюваність. Це з відносно швидким зносом інструмента. А основну частку обробки титанових сплавів для авіабудування виробляють кінцевими фрезами, лопатки через наявність глибоких кишень, складних профілів і тонкості деталей. Тому вдосконалення конструкцій запчастин для авіабудування з титанових сплавів є актуальною темою.

Одним із методів підвищення жаростійкості, зносостійкості та корозійної стійкості титанових сплавів є хіміко-термічна обробка (ХТО), в результаті якої змінюється хімічний склад поверхневих шарів металу. Однак через високу хімічну активність титану і малу швидкість дифузії насичувальних елементів багато видів ХТО, що широко застосовуються для зміцнення сталей, для титанових сплавів практично не розроблені. Перспективним для титанових сплавів є силікування. Силіциди титану, що утворюються на поверхні, особливо вищий силіцид, мають комплекс властивостей, необхідних для роботи в умовах високих температур, зношування і корозійних середовищ. У роботах [1-3] було досліджено процес дифузійного силікування титанових сплавів у порошкових середовищах на основі кремнію та міді та показано високі експлуатаційні властивості силіцидних покриттів, отриманих цим методом. Додавання в зазначене

порошкове середовище легкоплавких металів призвело до подальшого підвищення службових властивостей та товщини дифузійних шарів [4]. Теоретичний і практичний інтерес представляє дослідження дифузійного насичення в цих же середовищах, але з добавками перехідних металів, оскільки, по-перше, вивчення впливу перехідних металів на процеси насичення дозволить отримати нові дані про механізм формування покриттів високоактивних насичувальних середовищах, по-друге, легування силіцидних покриттів, як правило, підвищує їх експлуатаційні властивості.



## 1 АНАЛІТИЧНО-ПОШУКОВА ЧАСТИНА

### 1.1 Загальні відомості про титан та його сплави

Титан (Ti) (Titanium) – хімічний елемент з порядковим номером 22, атомна вага 47,88, легкий сріблясто-білий метал. Щільність 4,51 г/см<sup>3</sup>,  $t_{пл.}=1668 (\pm)5^{\circ}C$ ,  $t_{кіп.}=3260^{\circ}C$ . Для технічного титану марок ВТ1-00 та ВТ1-0 щільність приблизно 4,32 г/см<sup>3</sup>. Титан та титанові сплави поєднують легкість, міцність, високу корозійну стійкість, низький коефіцієнт теплового розширення, можливість роботи у широкому діапазоні температур (від мінус 290°C до 600°C) [1,2].

Низькотемпературна альфа-модифікація, що існує до 882,5 °C високотемпературна бетта-модифікація, стійка від 882,5 °C температури плавлення.

За щільністю та питомою теплоємністю титан займає проміжне місце між двома основними конструкційними металами: алюмінієм та залізом. Варто також відзначити, що його механічна міцність приблизно вдвічі більша, ніж чистого заліза, і майже в шість разів вища за алюміній. Але титан може активно поглинати кисень, азот та водень, які різко знижують пластичні властивості металу. З вуглецем титан утворює тугоплавкі карбіди, що мають високу твердість.

Титан – парамагнітний метал. У парамагнітних речовин магнітна сприйнятливність при нагріванні зазвичай зменшується. Титан становить виняток із цього правила - його сприйнятливність суттєво збільшується з температурою.

З переваг та недоліків титану та його сплавів, як оброблюваного різанням матеріалу, відзначимо наступні:

Переваги:

- мала щільність ( $4500 \text{ кг/м}^3$ ) сприяє зменшенню маси матеріалу, що використовується;
- висока механічна міцність. При підвищених температурах ( $250\text{-}500^\circ \text{C}$ ) титанові сплави за міцністю перевершують високоміцні метали алюмінію і магнію;
- висока корозійна стійкість, обумовлена здатністю титану утворювати на поверхні тонкі ( $5\text{-}15 \text{ мкм}$ ) суцільні плівки оксиду  $\text{TiO}_2$ , що міцно пов'язані з масою металу;
- питома міцність (відношення міцності та щільності) кращих титанових сплавів досягає  $30\text{-}35$  і більше, що майже вдвічі перевищує питому міцність легованих сталей.

#### Недоліки:

- висока вартість виробництва, титан значно дорожчий заліза, алюмінію, міді, магнію;
- активна взаємодія при високих температурах, особливо в рідкому стані, з усіма газами, що становлять атмосферу, внаслідок чого титан та його сплави можна плавити лише у вакуумі або серед інертних газів;
- проблеми залучення у виробництво титанових відходів;
- погані антифрикційні властивості, зумовлені налипанням титану на багато матеріалів;
- висока схильність титану та багатьох його сплавів до водневої крихкості та сольової корозії;
- погана оброблюваність різанням, аналогічна оброблюваності нержавіючих сталей аустенітного класу;
- велика хімічна активність, схильність до зростання зерна за високої температури і фазові перетворення при зварювальному циклі викликають труднощі при зварюванні титану.

За використанням як конструкційний матеріал титан знаходиться на 4-му місці, поступаючись лише Al, Fe і Mg. Алюмініди титану є дуже стійкими к окислювальні і жаростійкі, що в свою чергу зумовило їх застосування в

авіаційній та автомобілебудуванні в якості конструкційних матеріалів. Біологічна нешкідливість титану робить його відмінним матеріалом для харчової промисловості та реконструктивної хірургії [1,2,3].

Титан і його сплави широко використовуються в машинобудуванні завдяки високій механічній міцності, яка зберігається при високих температурах, корозійної стійкості, жароміцності, питомої міцності, низької щільності та іншим корисним властивостям. У багатьох випадках висока вартість титану і його сплавів компенсується їх більшими експлуатаційними характеристиками, а в ряді випадків вони є єдиним матеріалом, з якого може бути виготовлено обладнання або конструкції, здатні працювати в даних специфічних умовах [2,3].

Титанові сплави відіграють важливу роль в авіаційній техніці, де прагнуть отримати максимально легку структуру в поєднанні з необхідною міцністю. Титан має невелику вагу в порівнянні з іншими металами, але в той же час може працювати при високих температурах. З титанових сплавів виготовляють обшивку, кріпильні деталі, силову установку, деталі шасі, різні вузли. Ці матеріали також використовуються при конструюванні авіаційних реактивних двигунів. Це дає можливість знизити їх вагу від 10 до 25%. З титанових сплавів виготовляють диски і лопатки компресора, деталі повітрозбірника і направляючої лопатки, кріпильні елементи [2,3,4].

Використання титану в пасажирських літаках, випущених до 2008 року, не перевищувало 6%. Останнім часом частка титану в цивільній авіації зростає. Вага найбільшого в світі пасажирського літака Airbus A380 на 14% складається з титану, а останнього Boeing B 787 - вже на 18%. Якщо говорити про вітчизняні літаки, то можна відзначити, що сімейство реактивних пасажирських літаків Ан148 містить 13% титану (рис. 1.1).



Рисунок 1.1 Процентний вміст титанових сплавів в авіабудуванні

Сьогодні половина виробленого в світі титану споживається аерокосмічною промисловістю. Більш того, в наступному десятилітті очікується подвоєння показника. Широке впровадження титану в авіабудування успішно вирішує вимогу зниження ваги конструкції. Широке застосування композитних матеріалів (наприклад, вуглецевих волокон) в авіабудуванні вимагає застосування титану, так як він набагато краще, ніж алюміній, зчіплюється з вуглецевими волокнами і збільшує термін служби літаків на 60%. Крім високої міцності, додається властивість незначних деформацій при перепадах температури, що підвищує стабільність розмірів конструкцій.

Титанові сполуки також широко використовуються в різних галузях промисловості. Карбід титану має високу твердість і використовується у виробництві ріжучого інструменту та абразивних матеріалів. Білий діоксид титану ( $TiO_2$ ) використовується у фарбах (наприклад, титанових білил), а також у виробництві паперу та пластмаси. Сполуки органотитану (наприклад, тетрабутоксититан) використовуються як каталізатори та затверджувачі в хімічній та лакофарбовій промисловості. Неорганічні

сполуки титану використовуються в хімічній, електронній, скловолоконній промисловості як добавка. Диборид титану є важливим компонентом надтвердих матеріалів для обробки металу. Нітрид титану використовується для покриття інструментів.

## **1.2 Механічна обробка титанових сплавів**

У порівнянні з іншими матеріалами, механічна обробка титанових сплавів вимагає більш високих вимог і має безліч обмежень. Титанові сплави мають деякі властивості, які можуть істотно впливати як на процес різання, так і на матеріал, який ріжеться. Якщо режим і інструмент підібрані правильно, а також заготовка надійно закріплена, то процес металообробки титану буде високоефективним. Багатьох проблем при обробці титану можна уникнути, якщо подолати особливості впливу титанових сплавів на процес металообробки.

Багато властивостей, які роблять титанові сплави привабливим матеріалом для деталей, роблять істотний вплив на їх оброблюваність [2,3,5,6], а саме:

висока міцність в поєднанні з низькою щільністю, що дозволяє знизити вагу конструкцій, її щільність становить 60% ніж у сталі;

низька теплопровідність;

Більш висока корозійна стійкість, ніж нержавіюча сталь

Всі перераховані вище властивості означають, що титанові сплави мають високі і концентровані сили, що діють на ріжучу кромку при її обробці. Це часто призводить до вібрацій при механічній обробці і призводить до швидкого зносу ріжучої кромки інструменту. Крім того, титан є поганим провідником тепла. Тому обробка титану вимагає від інструменту високої червоностійкості [2,3,7,33]

Одним з негативних явищ при обробці титанових сплавів є явище адгезії (рис. 1.2), причому в ряді випадків відбувається поверхневе зміцнення

титанових сплавів, що сприяє значному притупленню РІ. Вміст вуглецю більше двох десятих відсотка сприяє утворенню карбіду титану, за рахунок того, що вуглець розчиняється в титановому сплаві лише до 0,2%, якщо вміст вуглецю в титановому сплаві перевищує це число, то утворюються тверді карбіди титану, які діють на ріжучу кромку інструменту як абразив і притупляють його. На рисунках 1.3 і 1.4 схематично показана механічна обробка сталі і титанового сплаву.

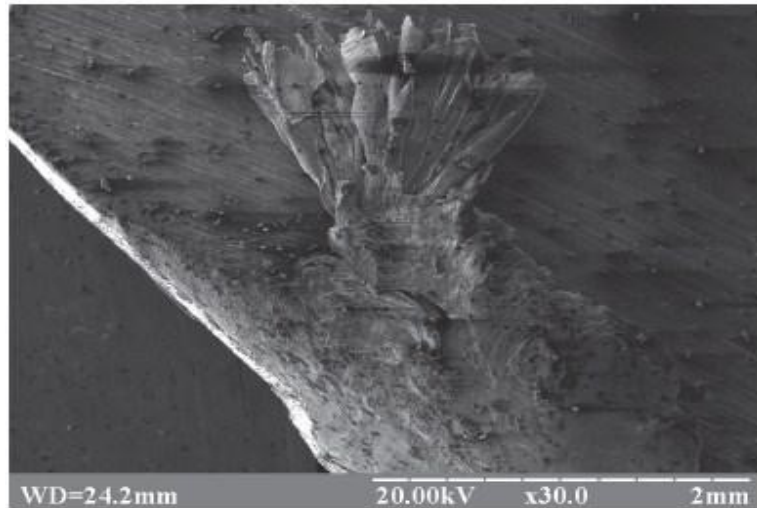


Рисунок 1.2 Нарощування на РІ

Крім того, при механічній обробці титанових сплавів, як показано на рисунку 1.4, в порівнянні з обробкою сталі, показаної на рисунку 1.3, довжина контакту титанової стружки з лицьовою поверхнею значно менше, ніж при механічній обробці сталі. Цим же пояснюється утворення великих кутів зсуву з малою усадкою стружки при різанні титанових сплавів, як правило, його коефіцієнт усадки по довжині близький до одиниці. Це видно з коефіцієнтів усадки різних марок титану і карбіду, а також залежності поздовжньої деформації стружки від швидкості різання і подачі.

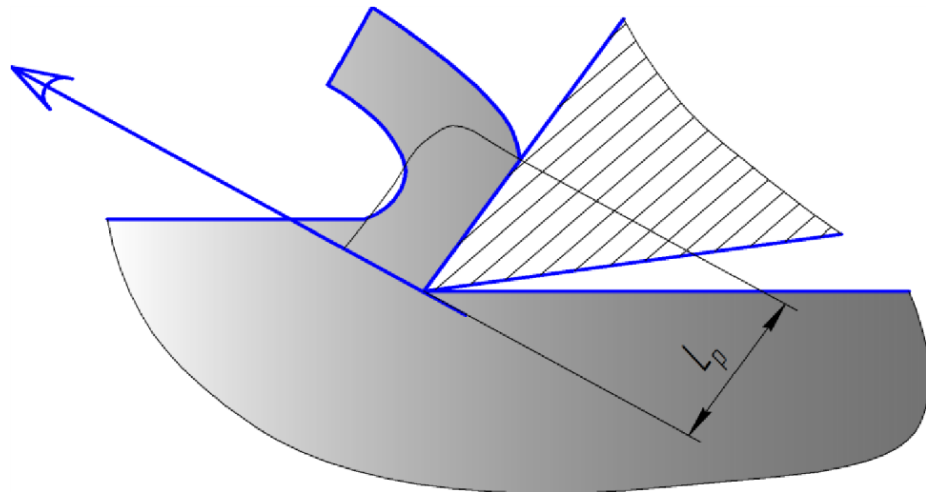


Рисунок 1.3 Стружкоутворення при обробці сталі

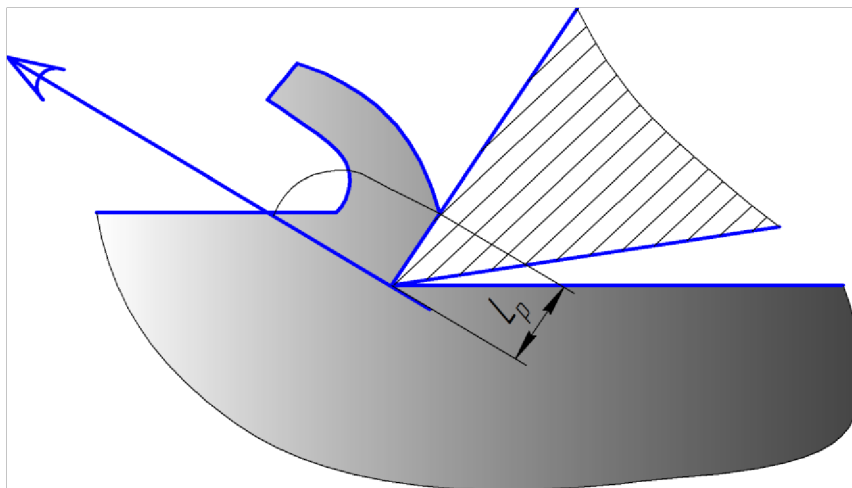


Рисунок 1.4 Утворення стружки при механічній обробці титанових сплавів

У деяких випадках в результаті поглинання кисню і азоту з повітря при обробці титанових сплавів виходить так звана негативна усадка, тобто довжина одержуваної стружки більше відстані різання. Зменшення усадки стружки зі збільшенням швидкості різання обумовлено також різким зменшенням сил тертя стружки об лицьову поверхню ріжучої частини інструменту. Титанові сплави характеризуються високими коефіцієнтами тертя, що обмежує їх застосування для рухомих з'єднань. В результаті при обробці титанових сплавів все навантаження розподіляється на дуже малу

площу вістря леза, що згодом призводить до зменшення ресурсу інструменту і швидкого руйнування його ріжучої кромки [5,6,7].

Вважається, що титан важко піддається механічній обробці, але це не характерно для сучасних верстатів, інструментів і методів обробки. Частково складність механічної обробки титану є новою областю, в якій ще недостатньо досвіду. Титан також може бути складнішим в обробці, ніж інші метали, такі як чавун або низьколеговані сталі. Титан слід обробляти з іншою подачею та швидкістю порівняно з іншими металами, але його все одно можна досить легко обробити. Якщо титанова деталь жорстко затиснута на верстаті, який знаходиться в справному стані і оснащений спеціальним конічним шпинделем ISO 50 з коротким вильотом інструменту, проблем виникнути не повинно, за умови, що ріжучий інструмент підібраний правильно [2,3,8,33].

Але стабільні та ідеальні умови не завжди присутні в фрезеруванні. Крім того, багато титанові деталі мають складну форму з вузькими, неглибокими або глибокими і великими кишнями, тонкими фасками і стінками. Для правильної і успішної обробки цих форм необхідний інструмент з великою довжиною ріжучої частини, що може швидко привести до деформації інструменту, яка виникає через вібрації при обробці титану і його сплавів. Існують методи, які дозволяють значно знизити вібрації при обробці титану. Більшість фрезерних верстатів, що використовуються для обробки титанових сплавів, оснащені 40-конічними шпинделями. У зв'язку з інтенсивним використанням цих верстатів знижується їх ефективність з точки зору точності і надійності обробки. Обробка титану, як правило, включає контурування, обробку канавок або кромки, що може спричинити вібрацію [2,3,8]. Тому необхідно вживати заходів щодо його запобігання, максимально збільшуючи затискну здатність заготовки.

Основним способом вирішення цієї проблеми є багатоступінчастий затиск заготовки, при якому заготовки розміщуються ближче до шпинделя, що знижує вібрацію.



Завдяки тому, що титанові сплави зберігають міцність і твердість при високих температурах, ріжуча кромка піддається високому навантаженню при механічній обробці. При цьому в місці різання виділяється велика кількість тепла, що тягне за собою ризик деформації. Тому правильний вибір геометрії змінної пластини і марки сплаву має велике значення при механічній обробці титану. Вирішенням цієї проблеми є плити з PVD-покриттям, які дозволяють значно підвищити ефективність [8,9].

Існує ряд умов для даних різання при обробці заготовок з титанових сплавів. Точність торця і раціональне биття інструментів дуже важливі при механічній обробці титану. Наприклад, якщо вставка неправильно встановлена в корпус фрези, ріжучі кромки будуть швидко пошкоджені. Хоча перевага віддається геометрії з позитивним переднім кутом, інструмент з дещо негативним переднім кутом здатний обробляти при більш високих подачах, які досягають 0,5 мм на зуб. При цьому важлива надійність затиску заготовки і жорсткість верстата. Мінімальна подача, що застосовується при фрезеруванні титану, зазвичай становить 0,1 мм на зуб. Також можна зменшити частоту обертання шпинделя для отримання рекомендованої швидкості різання, як показано в таблиці 1.1. Неправильно підібрана частота обертання шпинделя може скоротити термін служби інструменту до 90% при мінімальній подачі на один зуб. Інший спосіб - зменшити кількість різців, або вибрати фрезу з найменшою кількістю вставок [2,3,7].

При обробці титану рекомендується витримувати невелику довжину контакту з оброблюваною деталлю, щоб забезпечити охолодження зубів фрези в період «перепочинку» в процесі різання.

Всі перераховані вище рекомендації по конструкції інструменту і даних різання титану і його сплавів враховуються сучасними виробниками при проектуванні інструменту. Різні конструкції кінцевих фрез з титанових сплавів призначені для підвищення продуктивності.

Таблиця 1.1 Групи титанового сплаву

Групи титанового сплаву, його структура та марка	Матеріал ріжучого інструменту	швидкість різання, м/с	Коефіцієнт технологічності Відношення до сталі 45
Пластикові: Низька міцність ВТ1-1, ОТ4-0, АТ2 Середня міцність ВТ5-1, ВТ5, ОТ4, АТ3	ВК6М; ВК8	1-1,7	0,45
Надміцна конструкція: ВТ6, ИРМ1 (( $\alpha+\beta$ )- структура) ВТ20, АТ6, ОТ4-2 ( $\alpha$ - структура)	ВК8; ВК6М; Р9К5	1-2,3 0,75-1,2	0,55 0,32
Високоміцні сплави: ВТ14, ВТ16, ВТ22, ВТ23 (( $\alpha+\beta$ )- структура) ВТ15, ТС6 ( $\beta$ - структура)	ВК8;ВК6М	0,8-1,6 0,5-1	0,4 0,25
Жароміцні сплави: ВТ3-1, ВТ8, ВТ9(( $\alpha+\beta$ )- структура)	ВК8	0,5-1,2	0,28

### 1.3 Аналіз структури, властивостей та методів захисту поверхні титанових сплавів.

Титанові сплави ВТ-5, ОТ-4 та ін.  $\alpha$ -сплави) добре обробляються тиском у гарячому стані та зварюються, характеризуються задовільними величинами міцності та пластичності [6].

Найкраще поєднання якостей досягаються в ( + ) - сплавах (ВТ-6, ВТ3-1 та ін). Вони мають хороші механічні та технологічні властивості. Їх рекомендується застосовувати для виготовлення важконавантажених деталей, а також деталей, які тривалий час працюють при високих температурах [6].

Титанові сплави типу ВТ-15, ВТ-22, ВТ-32 та ін.  $\beta$ -сплавів і характеризуються хорошими величинами міцності та пластичності [2].

Поряд з позитивними якостями титанові сплави мають суттєвий недолік, що обмежує їх широке застосування в промисловості - висока схильність до контакту захоплення при терті [3,6]. Ця властивість створює

відомі труднощі при використанні титану в вузлах, що труться, механізмів і машин.

До цього часу не знайдено матеріалу в парі з неукріпленим титаном. Ряд проведених досліджень [7,30] показали, що титан та його сплави при роботі з іншими металами або переносяться (налипають) на поверхні твердішого металу, після чого тертя протікає як у парі титан-титан, або на поверхню титану відбувається перенесення м'якшого металу та тертя протікає як в однойменній парі з м'якого металу.

Зазначений недолік значною мірою може бути усунений хіміко-термічною обробкою.

У цьому актуальною є розробка нових технологій, які забезпечують отримання покриттів необхідних експлуатаційних характеристик за мінімального часу формування. Такими технологіями можуть бути способи отримання покриттів на основі саморозповсюджувального високотемпературного синтезу [21].

З аналізу літературних даних [33-47] видно, що з усіх розглянутих способів алітування, борування та силікування виробів у порошках є найпростішим і надійнішим. Він є найбільш застосовним нині. До його переваг можна віднести: одержання практично будь-якого складу покриття; високу стабільність властивостей та хорошу якість одержуваних покриттів; простоту технології та технологічного обладнання в порівнянні з іншими методами; порошки легко регенеруються, що знижує собівартість покриттів; можливість використання на підприємствах наявного пічного обладнання.

У той же час слід врахувати, що при цьому неможливо регулювати склад газового середовища в процесі хіміко-термічної обробки, а також наносити покриття на великогабаритні деталі.

Слід зазначити, що в даний час віддати перевагу якомусь одному з методів важко, оскільки поряд з перевагами в кожному способі є недоліки. Вибір способу визначається умовами роботи поверхні, що зміцнюється (глибиною дифузійного шару, твердістю, робочою температурою, швидкістю

зношування), вимогами захисту навколишнього середовища (токсичністю, теплопровідністю тощо) і економічними міркуваннями (трудомісткістю, витратою ресурсів, вартістю інгредієнтів).

#### **1.4 Зміцнення титанових сплавів хіміко-термічними методами**

Одним із методів підвищення жаростійкості, зносостійкості та корозійної стійкості титанових сплавів є хіміко-термічна обробка (ХТО), в результаті якої змінюється хімічний склад поверхневих шарів металу. Однак через високу хімічну активність титану і малу швидкість дифузії насичувальних елементів багато видів ХТО, що широко застосовуються для зміцнення сталей, для титанових сплавів практично не розроблені. Перспективним для титанових сплавів є силікування. Силіциди титану, що утворюються на поверхні, особливо вищий силіцид ШЬ, мають комплекс властивостей, необхідних для роботи в умовах високих температур, зношування і корозійних середовищ. У роботах [1-3] було досліджено процес дифузійного силікування титанових сплавів у порошкових середовищах на основі кремнію та міді та показано високі експлуатаційні властивості силіцидних покриттів, отриманих цим методом. Додавання в зазначене порошкове середовище легкоплавких металів призвело до подальшого підвищення службових властивостей та товщини дифузійних шарів [4]. Теоретичний і практичний інтерес представляє дослідження дифузійного насичення в цих же середовищах, але з добавками перехідних металів, оскільки, по-перше, вивчення впливу перехідних металів на процеси насичення дозволить отримати нові дані про механізм формування покриттів високоактивних насичувальних середовищах, по-друге, легування силіцидних покриттів, як правило, підвищує їх експлуатаційні властивості.

### **1.5 Дифузійне насичення титанових сплавів за допомогою саморозповсюджувального високотемпературного синтезу (СВС)**

В останні роки процеси дифузійного насичення робочих поверхонь деталей набули широкого поширення. Однак відомі методи нанесення захисних покриттів є енергоємними та характеризуються великою тривалістю процесу. У цей час головним недоліком хіміко-термічної обробки (ХТО) є мала товщина дифузійних шарів, які у випадках не забезпечують високих експлуатаційних характеристик деталей машин.

У зв'язку з цим актуальною проблемою є розробка нових технологій, що забезпечують отримання покриттів необхідних експлуатаційних характеристик за мінімального часу їх формування. Такими технологіями можуть бути способи отримання покриттів на основі саморозповсюджувального високотемпературного синтезу (СВС) [31-33].

Використання саморозповсюджувального високотемпературного синтезу (СВС) для формування захисних покриттів засноване на застосуванні порошкових екзотермічних сумішей є сильноекзотермічної взаємодії хімічних елементів в конденсованій фазі, здатне до мимовільного поширення у вигляді хвилі горіння [43].

Процес виникає при локальній взаємодії на систему коротким імпульсом і надалі протікає у вигляді хвилі горіння без підведення енергії ззовні за рахунок тепловиділення. Швидкості поширення хвилі зазвичай становлять 0,5-15 см/с.

Сутність СВС-процесу зводиться до наступного. В системі, що складається із суміші порошків хімічних елементів, локально ініціюється екзотермічна реакція синтезу. Тепло, що виділилося в результаті реакцій, завдяки теплопередачі, нагріває сусідні холодні шари речовини, збуджуючи в них реакцію, і призводить до виникнення процесу, що саморозповсюджується. У такому процесі хімічна реакція протікає у вузькій зоні, мимовільно, переміщаючись речовиною з певною лінійною швидкістю,

а висока температура, необхідна для швидкого протікання реакції, створюється в результаті звільнення хімічної енергії, запасеної у вихідній системі. Протікання реакції супроводжується яскравим свіченням. Такий процес є різновидом горіння та розглядається на основі математичної теорії горіння.

Тверде полум'я у чистому вигляді – рідкісне явище, воно може відбуватися лише в системах з дуже розвиненою поверхнею контакту реагентів. Низькі значення констант масопереносу у твердій фазі можуть компенсуватися великою поверхнею контакту. Висока температура є фактором, що інтенсифікує. Режим чистого твердого полум'я може бути реалізований у граничному випадку, при якому всі речовини (не тільки початкові та кінцеві, а й проміжні) знаходяться у твердому стані.

Близькі з погляду реалізації дифузії процеси можуть протікати в системах, в яких один реагент є порошком, а інший газ. Тут також поверхня контакту реагентів має бути високою. Найбільш складна картина в порошкових сумішах, що складаються з часток різного ґатунку. Мала поверхню контакту частинок не здатна забезпечити суто твердофазний режим горіння, і поширення хвилі горіння можливе лише за наявності додаткових, інтенсифікуючих факторів, таких як дія газових молекул-переносників, що регенеруються.

На рис. 1.4 наведена типова термограма СВС-процесу. На рисунку крапками показана характерні значення температур:  $T_r$  – температура горіння,  $T_{eff}$  – ефективна температура,  $T_m$  – температура хвилі горіння;

Температура, що спостерігається, має вигляд:

$$U^2 = \exp(-E/RT)$$

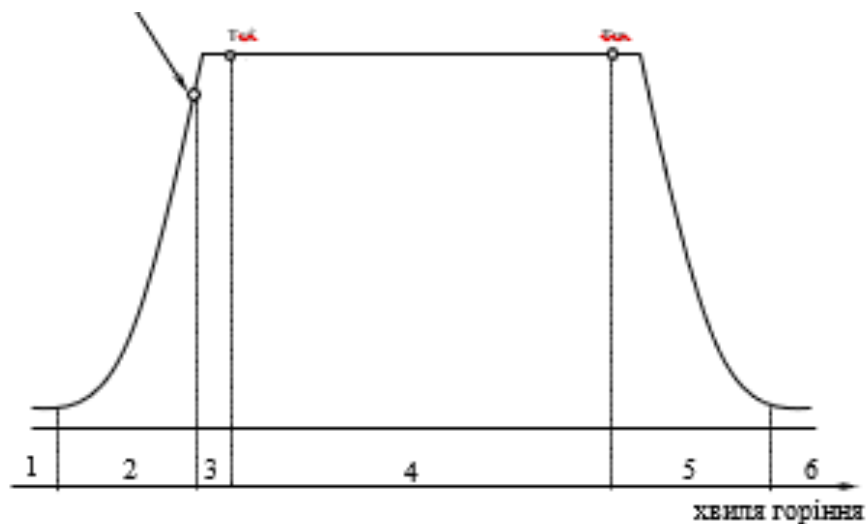
де  $U$  – швидкість поширення хвилі;

$E$  - енергія активації реакції горіння.

Типові значення параметрів, характеризуючи СВС, перебувають у межах:

- розмір частинок реагентів, мкм - 0,1-100;

- відносна щільність шихти – насипна 0,6
- тиск навколишнього газу, атм - 1-100;
- температура ініціації, К - 900-1500;
- тривалість ініціації, с - 0,5-3;
- швидкість поширення фронту, м / с - 0,1-10;
- температура горіння, К - 1500-3500;
- швидкість нагрівання речовини у хвили, К/с – 103-106;



1 – початкові реагенти; 2 – зона інтенсивних теплообмінів; 3 – зона перебігу основних реакцій; 4 – зона побічних хімічних реакцій та структурних перетворень; 5 – зона охолодження; 6 – зона СВС-продуктів

Рисунок 1.4. Типова термограма СВС-процесу

Хімізм процесу може бути представлений таким виразом:

$$\sum_{i=1}^m a_i x_i + \sum_{j=1}^n b_j y_j = Z + Q$$

де  $Q$  – тепловий ефект;

$x$ - Ti, Zr, Hf, V, Nb, Ta, Mo, W та ін.

$y$ - B, C, N, Si, Se, S, Al та ін.

Елементи  $x$  являють собою порошки металів(пальне),  $y$  – використовуються в порошкоподібному, рідкому або газоподібному

станах(окислювачі), продукт  $Z$  є тугоплавким продуктом і при температурі горіння знаходиться зазвичай у твердому стані. Хімічна взаємодія елементів в основному в конденсованій фазі, навіть у випадку, коли один із реагентів використовується в газоподібному стані.

Вивчення СВС ведеться на стику хімічної фізики і матеріалознавства: вивчення теорії процесів СВС відбувається з урахуванням науки про горінні, а вивчення продуктів СВС – з допомогою методів і уявлень, що розвиваються у матеріалознавстві тугоплавких сполук.

Аналіз температурних залежностей зміни ізобарних потенціалів реакцій утворення оксидів (елементів найчастіше застосовуваних при хіміко-термічній обробці) при  $1173 - 1673^\circ \text{K}$  показав, що елементи, що мають у зазначеному інтервалі температур менше, ніж алюміній, абсолютне значення ізобарного потенціалу утворення оксиду, їх міцності у такому порядку: Ti, Si, V, Cr, Nb, Mn, W, Mo та Ni.

Чим більша різниця у величинах ізобарних потенціалів утворення оксидів, що відновлює та відновлюється елементів, тим повніше та енергійніше протікає реакція відновлення.

Початок ініціювання термічних реакцій для більшості оксидів –  $900-1200^\circ \text{C}$ , наприклад, для  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  та  $\text{SiO}_2$  реакції починається при  $890$  та  $1199^\circ \text{C}$  відповідно.

Вводяться у суміші для дифузійного насичення активізатори за відсутності «баластної» добавки сприяють різкому (на  $300-400^\circ \text{C}$ ) зниження температури ініціювання реакцій відновлення. Термодинамічний аналіз можливих реакцій показав, що продукти розкладання активізаторів ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ,  $\text{NH}_4\text{F}$ ,  $\text{AlF}_3$ ,  $\text{NaF}$  та інших) реагують з окисною плівкою на алюмінії (до початку реакції відновлення) з утворенням газоподібних сполук  $\text{AlClO}$ ,  $\text{AlCl}_3$ ,  $\text{AlCl}_2$ ,  $\text{AlFO}$  та  $\text{AlF}_2$ , що сприяє її розпушування та отримання каталітично активної поверхні на відновлення.

При введенні «баластної» добавки необхідно враховувати не тільки абсорбційну здатність окису алюмінію, але і ймовірність її взаємодії з



активаторами, що вводяться, що зменшує концентрацію активної частини його, віднесеної до поверхні відновника, і підвищує температуру ініціювання реакції.

У роботі [92] наведено результати дослідження впливу «баласної» добавки на температуру початку та закінчення реакції в суміші для хромування, що складається з 80% вага.%  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  і 20 вага.%  $\text{Al}$ , при постійному вмісті  $\text{AlF}_3$ , а в роботі [59] - для хромосиліцування, що складається з 68% вага.%  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , 12 вага.%  $\text{SiO}_2$  і 20 вага.%  $\text{Al}$ , при постійному вмісті  $\text{NH}_4\text{Cl}$ . Зі збільшенням кількості «баласної» добавки температура початку ініціювання реакції підвищується, а температура закінчення реакції знижується за лінійним законом.

Введення в суміші хлористого амонію, фтористих амонію, алюмінію та натрію супроводжується утворенням хлоридів та фторидів, субхлоридів, субфторидів та субокисів, оксихлоридів та оксифторидів. В результаті проходження реакцій дисоціації, відновлення, окислення та диспропорціонування утворюються активні атоми насичувальних елементів.

Відновником служив алюмінієвий порошок з крупністю фракції мм. Для відновлення окису алюмінію у суміші для алітування використовували порошок кальцій-алюмінієвої лігатури, виконаної під аргоном у лабораторних умовах [98].

Аналіз реакції, що відбуваються при горінні СВС-суміші, а також результатів експериментів та металографічних досліджень дозволили отримати схему утворення дифузійного шару у режимі горіння [51]. Цей процес умовно можна поділити на три стадії.

Стадія проходження хвилі горіння (стадія I) характеризується первинним прогріванням зразка та формування газової фази, збагаченої наприклад бором, при цьому покриття на поверхні зразка не утворюється.

На стадії прогріву зразка (стадія II) активні атоми починають дифундувати в його поверхневий шар за рахунок високого потенціалу, що визначається градієнтом концентрації. Спостерігається формування

дифузійного шару.

При охолодженні реактора (стадія III) знижується активність формування покриття через зменшення коефіцієнта дифузії компонента, що насичує, при зниженні температури. Як показали результати металографічного аналізу, товщина шару становить 7–10 мкм.

Процес формування дифузійного покриття як теплового самозаймання умовно можна розділити п'ять стадій.

На початковій стадії (стадія I) відбувається інертне прогрівання суміші. При використанні як постачальника основного дифузного елемента – технічного бору – спостерігається формування борованого шару; при використанні оксиду бору має місце лише прогрівання зразка та реакційної шихти до температури самозаймання.

Теплове самозаймання реакційної суміші (стадія II) характеризується підвищенням її температури зі швидкістю 200-400° C/c до максимального значення. На цій стадії поряд з утворенням активних атомів бору відбувається виділення елементарного хрому та його сполуки з носіями (фтором або йодом).

На третій стадії (прогрівання виробів) відбувається вирівнювання температури за обсягом реактора. Температура процесу знижується до значення, що відповідає розрахунковій температурі насичення.

У четвертій стадії (ізотермічної витримки) відбувається дифузійне зростання покриття. При цьому температура у реакторі не змінюється. Протікають процеси, аналогічні дифузійного насичення в стаціонарних умовах. Слід зазначити, що при СВС-процесі насичення відбувається в порошковому середовищі щойно відновленого активного металу. У зв'язку з цим на четвертій стадії процеси дифузійного насичення протікають активніше.

Зарубіжні вчені високо оцінюють перспективність СВС-технології, її простоту та економічність, можливість широкого застосування [39]. В роботі [40] вказується, що СВС є економічним методом виробництва різних

керамічних матеріалів. СВС показала свій потенціал для виробництва тугоплавких сполук у промисловому масштабі. У монографіях [27,28], присвячених методу СВС, активно обговорюються перспективи його розвитку та практичного використання. В даний час роботи за кордоном охоплюють різні напрями теорії та практики СВС: теорія та механізм процесу; пряме отримання матеріалів та виробів шляхом суміщення СВС з пресуванням, прокаткою, відцентрове СВС-лиття для отримання багатошарових труб, нанесення покриттів, СВС-зварювання та ін.

Активна робота ведеться як у науково-дослідному, так і в конструкторсько-технологічному плані. Слід зазначити, що всі роботи проводяться з використанням найсучасніших методів дослідження та із застосуванням найефективніших апаратів та технологічного обладнання. Серед синтезованих сполук – карбіди: титану, цирконію, бору, кремнію; бориди: титану та цирконію; силіциди; інтерметаліди; нітриди; оксикарбідні та інші композиції [41-43].

У ряді робіт наведено дані про вплив на швидкість горіння складу газового середовища [44], конденсованих добавок [45], ультразвукових впливів [46]. У гібридних системах метал-азот вперше в практиці горіння спостерігали цікаві явища: виникнення через деякий час після початку горіння другого фронту, що рухається за першим, зіткнення двох фронтів, що рухаються, після чого процес продовжує поширення фронтально в обидві сторони [47,48]. При горінні порошкоподібного танталу в азоті в трубках з відкритими кінцями було виявлено розщеплення фронту: через деякий час від початку процесу від фронтів горіння відривався, рухався з прискоренням новий фронт, а старий поступово гас.

У разі зміни умов основний стаціонарний режим горіння може порушуватися. Порушення призводять або до нестійкого поширення фронту, або погасання. При вивченні СВС в області горіння [49] було виявлено два режими: автоколивальний та спіновий. При автоколивальному режимі зовні процес виглядає як чергування спалахів та депресій. При спіновому режимі

горіння протікає в осередку, що розповсюджується по спіралі на бічній поверхні зразка.

До особливостей СВС-процесу можна віднести ряд якостей, серед яких висока температура горіння реагентів (800-4000 К), відсутність побічних продуктів, повне перетворення взаємодіючих речовин. Зазначені особливості процесу сприяють одержанню цільових тугоплавких продуктів високої якості.

Нині з урахуванням СВС розвиваються безліч комбінованих процесів. Один з них, що широко розвиваються зараз, являє собою поєднання саморозповсюджувального високотемпературного синтезу і металотермії [90, 91]. Сутність цього комбінованого процесу полягає в тому, що метал, що є одним із реагентів СВС-процесу, утворюється в результаті металотермічної реакції, яка передує СВС-процесу. Елементи відновники та елементи окислювачі можуть бути як однаковими, так і різними. Комбінований процес дешевше, ніж саморозповсюджувальний високотемпературний синтез, з чистих елементів, але містить у продуктах оксид металу відновника.

Сьогодні метод СВС отримав широке застосування для виробництва порошків тугоплавких сполук, хоча можливі інші його застосування. З погляду хіміко-термічної обробки найбільший інтерес серед нових застосувань даного методу представляє нанесення покриттів.

Ця технологія дозволяє наносити тонкі покриття (5–150 мкм) на поверхню міді та її сплавів. Основу одержуваного покриття становить порошкова суміш, яка наноситься на поверхню мідного виробу і містить у собі такі компоненти: титан, кремній, алюміній, оксиди хрому та алюмінію, хлорид амонію та йод. Після нанесення порошкової суміші проводиться високотемпературна термічна обробка при температурі 800 – 1000°C. Під час обробки нанесений порошок починає горіти і частина продуктів горіння утворює на мідній поверхні тонке покриття. Керувати структурою та властивостями таких покриттів можна шляхом зміни швидкості охолодження СВС-продуктів, а також за допомогою зміни концентрацій реагентів у

порошкових сумішах [39]. Отримане цим методом покриття має суцільну рівну поверхню світло-сірого кольору. Фазовий склад зони насиченої титаном може бути різним, оскільки він безпосередньо залежить від складу порошкової суміші та умов термічної обробки.

Застосування способу саморозповсюджувального високотемпературного синтезу дозволяє підвищити зносостійкість виробу в 2,5-3 рази порівняно з зносостійкістю виробу без покриття. Спільне використання Ti, Al і Si при CVC методі дозволяє отримувати покриття, жаростійкість при температурі 800 - 900°C яких у 1,8 - 2,5 рази вище, ніж жаростійкість матеріалу підкладки [20]. Як недоліки CVC методу можна назвати невелику товщину покриття, що наноситься (максимум 150 мкм); при горінні на повітрі можливе збільшення ваги через окиснення; хімічна реакція компонентів має відбуватися із виділенням великої кількості тепла підтримки реакції синтезу продуктів горіння; висока ймовірність утворення пір при нанесенні покриття.

## 1.6 Формування дифузійних шарів

У процесі насичення виробів між атомами впроваджуваного елемента та атомами основного металу можливе утворення як різних твердих розчинів (впровадження та заміщення) з кристалічною решіткою оброблюваного металу (прикордонні розчини), так і проміжних фаз та твердих розчинів на їх основі.

Розрізняють два види дифузії: атомну та реакційну.

При атомній дифузії не відбувається утворення нових фаз у процесі самої дифузії. Переміщення атомів дифузного елемента в даному випадку відбувається в одній і тій же фазі, яка являє собою твердий розчин елемента, що впроваджується в решітці металу-розчинника. Тому максимальна концентрація елемента, що впроваджується, обмежена його граничною розчинністю в твердому розчині при температурі дифузії і плавно знижується

в міру видалення від поверхні вглиб деталей. Подібна дифузія характерна, наприклад, цементації.

Однак дифузія елемента насичення можлива і до концентрації твердих граничних розчинів. У цьому випадку на поверхні виробів виникає одна або кілька нових фаз, відмінних по своїй кристалічній будові від твердого розчину, утвореного на базі металу-розчинника. Дифузія розвивається всередині різних фаз і називається реакційною. Прикладом реакційної дифузії є утворення різних фаз при азотуванні заліза.

Дифузійна зона при реакційній дифузії характеризується наявністю стрибків концентрацій, що спостерігаються у місцях переходу від однієї фази до іншої і відповідають меж двофазної області цих фаз при даній температурі на діаграмі стану «метал – елемент, що впроваджується».

На даний момент у фізичному металознавстві існують і конкурують дві гіпотези початку утворення покриттів при ХТО.

Перша з них ґрунтується на припущенні про те, що спочатку відбувається накопичення дифузного елемента до меж розчинності його у твердому розчині, а потім утворюються сполуки (фази), тобто процес утворення фаз відбувається послідовно, за деякий кінцевий час. Відповідно до іншої гіпотези у початковий момент лежить на поверхні розділу «насичувальне середовище – оброблюваний матеріал» протікають хімічні реакції утворення сполук, т. е. всі фази, що у покритті, виникають у ньому практично миттєво, але мають нескінченно малу («нульову») товщину.

Подальше формування дифузійних шарів з обох гіпотез визначається дифузійним масопереносом елементів.

В даний час прийнято вважати експериментально встановленим, що у разі доставки насичуючим середовищем достатньої кількості дифузного елемента в активному стані на поверхню виробу, що обробляється, при досить тривалому насиченні, в дифузійній зоні утворюються однофазні шари, що відповідають ізотермічному розрізу бінарної діаграми стану за температури хімікотермічної обробки. Причому послідовність утворення фаз при

дифузійній зміні складу відповідає послідовності їхнього розташування на діаграмі стану.

Відхилення від цієї закономірності дуже рідкісні. Відсутність двофазних зон при дифузійній взаємодії у двокомпонентній системі, незважаючи на те, що на відповідних діаграмах стану є двофазні області, що являють собою суміші фаз граничних концентрацій, пояснюється тим, що рушійною силою дифузійних процесів є перепад концентрацій чи хімічних потенціалів.

Відсутність двофазних ділянок у дифузійній зоні можна пояснити також за допомогою правила фаз. У двофазних областях бінарної системи число фаз  $\Phi = 2$  та число компонентів  $K = 2$ .

Підставляючи ці значення рівняння правила фаз, отримаємо, що число ступенів свободи  $C = K - \Phi + 2 = 2$ . Це означає, що «вільними» є лише температура та тиск і при фіксації останніх ніякої зміни складу бути не може, тобто дифузійний процес у двокомпонентній системі з утворенням двофазної області неможливий. На підставі вищевикладених фактів у більшості робіт з моделювання кінетики формування дифузійних багатофазних покриттів зазвичай приймаються такі припущення:

1) у покритті утворюються всі фази, що є на діаграмі стану відповідної системи, причому в послідовності, також визначається діаграмою;

2) концентрації на міжфазних межах відповідають граничним розчинностям дифундують елементів у фазах при даній температурі процесу;

3) час утворення всіх фаз у покритті з граничними концентраціями, що відповідають діаграмі стану (час встановлення локальної термодинамічної рівноваги), мало, тобто багаторазово менше часу всього процесу ХТО.

Слід зазначити, що останнє припущення дозволяє у ряді випадків пояснити факт «відсутності» одного або кількох шарів у дифузійній зоні в покритті, незважаючи на наявність відповідних фаз на діаграмі стану. Подібна ситуація реалізується, якщо «зникаюча» фаза має вузьку область

гомогенності чи коефіцієнти дифузії у ній набагато менше коефіцієнтів дифузії елементів у сусідніх із нею фазах. Наслідком цього є її уповільнене зростання та незначна протяжність, порівнянна з розміром плоских дефектів, що призводить до неможливості виявлення даної фази не лише металографічним аналізом, і навіть рентгеноструктурними методами дослідження.



## 2 МАТЕРІАЛИ, ОБЛАДНАННЯ ТА МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

### 2.1. Матеріали та обладнання

Істотний вплив на властивості титанових сплавів надає їхній хімічний склад. Зокрема, такі хімічні елементи, як алюміній і кисень, сприяють підвищенню температури поліморфного перетворення на сплавах, цирконій – надає нейтральний вплив, проте інші, з представлених у таблиці 2.2., знижують температуру поліморфного перетворення (таблиця 2.1).

Промислові титанові сплави містять велику кількість легуючих елементів.

Залежно від величини коефіцієнта  $\beta$ -стабілізації титанові сплави прийнято розділяти на ряд груп:  $\alpha$ -сплави (не містять  $\beta$ -стабілізаторів), псевдо- $\alpha$ -сплави ( $K_{\beta\text{-стаб}} = 0,3-0,9$ ), двофазні сплави ( $K_{\beta\text{-стаб}} = 1,4-2,4$ ) та  $\beta$ -сплави ( $K_{\beta\text{-стаб}} = 2,5$ ).

Виходячи з представленої класифікації титанових сплавів та з метою з'ясування впливу легуючих елементів у сплаві на структуру та властивості зміцнених шарів, дослідження за нестационарних температурних умов проводили на сплавах, що належать до різних груп. Зокрема, зміцненню піддавали зразки з технічно чистого титану ВТ1-0 ( $\alpha$ -сплав), титанового сплаву ВТ-20 (псевдо- $\alpha$ -сплав) та титанового сплаву ВТ3-1 ( $\alpha+\beta$  сплав мартенситного типу).

Істотний вплив на властивості титанових сплавів надає їхній хімічний склад (табл.2.1.). Зокрема, такі хімічні елементи, як алюміній і кисень, сприяють підвищенню температури поліморфного перетворення на сплавах, цирконій – надає нейтральне вплив, проте інші, з представлених у таблиці 2.1., знижують температуру поліморфного перетворення.

Таблиця 2. 1.Хімічний склад зміцнюваних титанових сплавів

Матеріал / Елемент	Технічно чистий титан VT1-0	Псевдо- $\alpha$ -титановий сплав VT-20	( $\alpha+\beta$ )-титановий сплав мартенситного типу VT3-1
Ti	Основа	Основа	Основа
Al	0,7	6,0	6,0
Mo	-	1,0	2,5
Zr	-	2,0	-
V	-	1,0	-
Cr	-	-	2,0
Fe	0,3	0,3	0,5
Si	0,1	0,15	0,3
O	0,2	0,15	0,12

У аналізованих титанових сплавах кількість хімічних елементів, що підвищують температуру поліморфного перетворення, переважає над іншими елементами і тому ця температура з сплаву трохи вище, ніж у чистому титані (табл.2.1).

Усі хімічні елементи в аналізованих титанових сплавах, крім молібдену і кисню, призводять до зниження температури плавлення титанових сплавів [43].

Таблиця 2.2. Температури поліморфного перетворення в титанових сплавах, що розглядаються.

Сплав	VT1-0	VT-20	VT3-1
Температура поліморфного перетворення, °C	880-890	980-1020	960-1000

При проведенні зміцнення титанових сплавів у режимі теплового самозаймання важливим є склад порошкової суміші.

При боруванні або алітуванні в режимі теплового самозаймання порошкова суміш складалася за допомогою змішування в певній пропорції порошоків алюмінію (Al) або магнію полібориду ( $MgB_{12}$ ), окису алюмінію ( $Al_2O_3$ ) і фтористого алюмінію ( $AlF_3$ ).

Ця суміш є основною реакційною складовою, що забезпечує самозаймання порошкової ялиці. Окис алюмінію є інертною складовою порошкової суміші. Зміною кількості інертної складової здійснюється варіювання в широкому діапазоні температури обробки титанових сплавів. Фтористий алюміній грає роль активатора процесу насичення, що дозволяє за рахунок газового транспорту титану і полібориду магнію, значно підвищити швидкість зміцнення титанових зразків, що обробляються.

## **2.2 Методика проведення експерименту та статистична обробка отриманих результатів**

У загальному випадку експеримент, у якому реалізується всі можливі поєднання рівнів чинників, називають повним факторним. Якщо кількість рівнів кожного фактора дорівнює двом, то кількість дослідів повного факторного експерименту  $N$  становить  $N = 2^k$  ( $k$  – число факторів, 2 – число рівнів).

Існує кілька способів побудови матриць повного факторного експерименту [56]. Один з найпростіших полягає в наступному: за будь-якого  $k$  необхідно повторити двічі матрицю планування для випадку  $k-1$  спочатку при значенні  $k$ -го фактора на верхньому рівні, а потім на нижньому. Послідовне добування матриць повного факторного експерименту зі збільшенням  $k$  від 2 до 5 показано у табл. 2.3 [46].

Після вибору плану переходять безпосередньо до експерименту. Щоб унеможливити вплив систематичних помилок, викликаних зовнішніми умовами (наприклад, неточним контролем температури), рекомендується дослідити, задані планом експерименту, проводити рандимізовано у часі, тобто у випадковій послідовності. Порядок проведення дослідів можна обирати, наприклад, за таблицею випадкових чисел.

При організації експерименту слід враховувати необхідність оцінки дисперсії досвіду  $S_y^2$ . Ця дисперсія може бути відома і до початку дослідів, наприклад, з аналогічних раніше проведених робіт, але зазвичай її оцінюють

у процесі експерименту. Єдина можливість це зробити – повторювати (дублювати) досліди.

Залежно від характеру дублювання можливо кілька способів оцінки дисперсії.

Таблиця 2.3 Матриці повного факторного експерименту від  $2^2$  до  $2^5$

План				№ досвіду	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>
2 <sup>5</sup>	2 <sup>4</sup>	2 <sup>2</sup>	1	+	-	+	+	+	
			2	-	+	+	+	+	
			3	-	-	+	+	+	
			4	+	+	+	+	+	
		2 <sup>3</sup>	5	+	-	-	+	+	
			6	-	+	-	+	+	
			7	-	-	-	+	+	
			8	+	+	-	+	+	
	2 <sup>5</sup>		9	+	-	+	-	+	
			10	-	+	+	-	+	
			11	-	-	+	-	+	
			12	+	+	+	-	+	
			13	+	-	-	-	+	
			14	-	+	-	-	+	
			15	-	-	-	-	+	
			16	+	+	-	-	+	
			17	+	-	+	+	-	
			18	-	+	+	+	-	
			19	-	-	+	+	-	
			20	+	+	+	+	-	
			21	+	-	-	+	-	
			22	-	+	-	+	-	
			23	-	-	-	+	-	
			24	+	+	-	+	-	
	25	+	-	+	-	-			
	26	-	+	+	-	-			
	27	-	-	+	-	-			
	28	+	+	+	-	-			
	29	+	-	-	-	-			
	30	-	+	-	-	-			
	31	-	-	-	-	-			
	32	+	+	-	-	-			

Якщо всі досліди, задані планом, виконують по одному разу, а один із них (частіше в центрі плану) дублюють кілька разів, то дисперсію досліду розраховують за формулою:

$$S_{y'}^2 = \frac{\sum_{g=1}^{n_0} (y_{0_g} - \bar{y}_0)^2}{f_1}, \quad (2.1)$$

$y_{0_g}$  – результат  $g$ -го дубля (повтору) досвіду у центрі плану;

$\bar{y}_0$  - Середнє арифметичне значення всіх  $n_0$  дублів центрального досвіду;

$f_1$  – число ступенів свободи.

Інші способи передбачають дублювання всіх чи деяких дослідів плану. При цьому кількість повторень може бути неоднаковою (нерівномірне дублювання) або однаковою (рівномірне дублювання).

Розглянемо спочатку випадок нерівномірного дублювання. Насамперед підраховують рядкові дисперсії (дисперсії для кожного досвіду):

$$S_{y_u}^2 = \frac{\sum_{g=1}^{n_u} (y_{u_g} - \bar{y}_u)^2}{f_u}, \quad (2.2)$$

де  $y_{u_g}$  – Результат  $g$ -го повторення  $u$ -го досвіду;

$\bar{y}_u$  - Середнє арифметичне значення всіх  $n_u$  дублів  $u$ -го досвіду;

$f_u$  – число ступенів свободи щодо  $u$ -ї рядкової дисперсії. Зауважимо, що перед обчисленням  $\bar{y}_u$  має сенс виключити можливі промахи (грубі результати у серіях повторних дослідів).

Потім визначають середню дисперсію досвіду з виразу

$$S_y^2 = \frac{\sum_{u=1}^N f_u S_{y_u}^2}{\sum_{u=1}^N f_u}. \quad (2.3)$$

Проте, як користуватися дисперсією, розрахованої за формулою (3), необхідно перевірити однорідність низки дисперсій, тобто з'ясувати, чи визначаються різні значення відгуку з однаковою точністю (ряд дисперсій однорідний) або з різною (ряд неоднорідний).

При нерівномірному дублювання однорідність низки дисперсій перевіряють за критерієм Бартлетта. І тут обчислюють величину:

$$B = 2,3026 \left( \lg S_y^2 \sum_{u=1}^N f_u - \sum_{u=1}^N f_u \lg S_{y_u}^2 \right), \quad (2.4)$$

де  $S_y^2$ - дисперсія, розрахована за формулою (3);

$S_{y_u}^2$  - порядкова дисперсія для  $u$ -го досвіду, визначена з числом ступенів свободи  $f_u$ .

Знайдену за формулою (2.4) величину  $B$  зіставляють із критерієм  $\chi^2$ , який беруть із таблиць у роботі [84] залежно від рівня значимості  $\alpha$  та числа ступенів свободи  $f = N' - 1$  ( $N'$ - Число дубльованих дослідів). Ряд дисперсій вважається однорідним у разі, якщо

$$B \leq \chi_{\alpha; N'-1}^2. \quad (2.5)$$

Значення  $B$ , Обчислене за (4), завжди досить сильно завищено. Якщо воно порівняно або трохи перевищує  $\chi_{\alpha; N'-1}^2$ , то  $B$  уточнюють:

$$B * \frac{B}{c}, \quad (2.6)$$

$$c = \frac{\left(\sum_{u=1}^N 1/f_u\right) - 1 / \sum_{u=1}^N f_u}{3(N-1)} + 1 \quad (2.7)$$

і знову порівнюють з  $\chi_{\alpha; N-1}^2$ .

Розглянемо тепер випадок рівномірного дублювання дослідів. Тут кількість повторень кожного досвіду однакова:  $n_u = n$  тому формула (2.3) після перетворення

$$S_y^2 = \frac{(n-1) \sum_{u=1}^N S_{y_u}^2}{N(n-1)}$$

набуває вигляду

$$S_y^2 = \frac{\sum_{u=1}^N S_{y_u}^2}{N}. \quad (2.8)$$

Перш ніж користуватися формулою (2.8), знову необхідно перевірити однорідність низки дисперсій. При однорідному дублюванні цю перевірку проводять за критерієм Кохрена. Для цього визначають величину:

$$G_{расч} = \frac{S_{y_u \max}^2}{\sum_{u=1}^N S_{y_u}^2}, \quad (2.9)$$

де  $S_{y_u \max}^2$  - найбільша у ряді дисперсія, яку порівнюють зі значенням G-критерію, взятим з таблиць [106] залежно від рівня значущості  $\alpha$ , числа ступенів свободи  $f$  та числа дослідів  $N$ .

Ряд дисперсій вважається однорідним, якщо

$$G_{расч} < G_{табл}. \quad (2.10)$$

Закінчивши експеримент, розраховують коефіцієнти регресії за формулою:

$$b_j = \sum_{j=1}^n \frac{X_{jn} \cdot Y_n}{N}, \quad (2.11)$$

де  $b_j$  - значення  $j$ -го коефіцієнта регресії;

$X_{jn}$ - Значення  $j$ -го фактора в  $n$ -му досвіді в кодованому вигляді;

$Y_n$ - значення параметра оптимізації в  $n$ -му досвіді;

$N$ - Число дослідів у матриці планування.

В результаті отримують модель, яка має такий вигляд:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + \dots + b_jX_j. \quad (2.12)$$

Після розрахунку коефіцієнтів перевіряють гіпотезу про їхню статистичну значущість.

Слід сказати, що процедура перевірки статистичних гіпотез у загальному випадку формально передбачає порівняння деякого критерію, розрахованого за експериментальними даними, з його табличним значенням при обраному заздалегідь рівні значущості  $\alpha$  або, що те саме, довірчої ймовірності  $1 - \alpha$ . Рівень значущості  $\alpha$  насправді визначає максимальну можливість відкинути правильну гіпотезу, тобто найбільшу ймовірність припущення, що експериментальний результат помилковий. Наприклад, якщо рівень значущості вибирають рівним 0,05 (що дуже часто робиться в технічних завданнях), то це означає, що допускається 5% вірогідність невірної рішення і довірка 95% вірогідність вірного.

Для перевірки гіпотези про статичну значущість коефіцієнтів регресії насамперед розраховують дисперсію оцінок коефіцієнтів. Роблять це в загальному випадку за формулою:



$$S_{b_i}^2 = c_{ii} S_y^2. \quad (2.13)$$

При ортогональному плануванні значущість коефіцієнтів можна перевіряти двома рівноцінними методами. В одному випадку можна порівнювати абсолютну величину коефіцієнта з його довірчим інтервалом, розраховуємо за формулою:

$$\Delta_{b_i} = t_{\alpha; f_1} \cdot S_{b_i}, \quad (2.14)$$

де  $t$  – критерій Стюдента, береться з таблиць [46] залежно від рівня значимості  $\alpha$  і числа ступенів свободи  $f_1$  щодо дисперсії досвіду  $S_y^2$ ;

$S_{b_i}$  - Середньоквадратична помилка у визначенні коефіцієнта регресії.

Коефіцієнт вважається статистично значимим, що його абсолютна величина більше довірчого інтервалу чи дорівнює йому, тобто

$$|b_i| \geq \Delta b_i. \quad (2.15)$$

В іншому випадку, значимість коефіцієнтів можна перевірити за  $t$ -критерію, розраховуючи за формулою:

$$t_{расч} = \frac{|b_i|}{S_{b_i}}. \quad (2.16)$$

Коефіцієнт значущий, якщо  $t_{расч}$  більше або дорівнює  $t_{\alpha; f_1}^{табл}$ , тобто

$$t_{расч} \geq t_{\alpha; f_1}^{табл}. \quad (2.17)$$

Статистична незначимість коефіцієнта інтерпретується як відсутність впливу відповідного ефекту. Якщо модель лінійна і відповідно незначний лінійний ефект, можна вважати, що даний фактор у вивчених інтервалах його зміни на відгук не впливає. При ортогональному плануванні статистично незначущі коефіцієнти моделі можуть бути виключені, при цьому перерахунок інших коефіцієнтів не потрібен.

Наступним етапом обробки даних є перевірка гіпотези про адекватність моделі. Гіпотезу про адекватність найчастіше перевіряють за допомогою  $F$ -критерія (критерія Фішера). Його розрахункове значення визначають за такою формулою:

$$F_{f_2; f_1}^{расч} = \frac{S_{неад}^2}{S_y^2}. \quad (2.18)$$

У знаменнику цього виразу – дисперсія досвіду  $S_y^2$ , визначена з  $f_1$  – числом ступенів свободи, у чисельнику – так звана дисперсія неадекватності  $S_{неад}^2$ , яку вважають за формулою:

$$S_{неад}^2 = \frac{\sum_{u=1}^N (y_{u_{расч}} - y_{u_{експ}})^2}{f_2} = \frac{SS_{неад}}{f_2}, \quad (2.19)$$

де  $y_{u_{расч}}$  та  $y_{u_{експ}}$  – значення відгуку в  $u$ -му досвіді, відповідно розраховані за рівнянням регресії та визначені експериментально;

$f_2 = N - k'$  – число ступенів свободи [ $k'$  – число залишених коефіцієнтів рівняння (включаючи  $b_0$ ),  $N$  – число дослідів плану].

Гіпотезу про адекватність рівняння приймають у тому випадку, коли розраховане значення  $F$ -критерію вбирається у табличного [64] для обраного рівня значимості, тобто коли

$$F^{расч} \leq F^{табл}. \quad (2.20)$$

Слід зазначити, що формула (2.19) справедлива лише за відсутності дублювання дослідів у матриці планування.

При цьому для розрахунку  $F$ -критерію використовують дисперсію  $S_y^2$ , визначену за дослідями, які не входять до плану, наприклад, дублюючи досліді в центрі плану.

Якщо для визначення  $S_y^2$  повторюють досліді плану, то чисельник формули (2.19), назвемо його  $SS_{неод}$  розраховують по-різному, залежно від способу дублювання.

При нерівномірному дублюванні

$$SS_{неод} = \sum_{u=1}^N n_u (y_{u_{расч}} - \bar{y}_{u_{эсп}})^2. \quad (2.21)$$

При рівномірному дублюванні

$$SS_{неод} = n \sum_{u=1}^N (y_{u_{расч}} - \bar{y}_{u_{эсп}})^2. \quad (2.22)$$

Якщо ж дублюється лише один досвід, наприклад, перший, то

$$SS_{неод} = n_1 (y_{1_{расч}} - \bar{y}_{1_{эсп}})^2 + \sum_{u=2}^N (y_{u_{расч}} - \bar{y}_{u_{эсп}})^2 \quad (2.23)$$

Надійність отриманих функціональних залежностей додатково перевіряють за допомогою коефіцієнта множинної кореляції, розрахованого за формулою:

$$r = \sqrt{\frac{n \sum_{i=1}^n b_i^2}{\sum_{u=1}^n y_u^2 - n \cdot \bar{y}^2}} \quad (2.24)$$

де  $n$  - кількість дослідів, що не включає дослідів на нульовому рівні;  
 $\bar{y}$  - середнє арифметичне значення функції відгуку.

### 3. РОЗРОБКА ОПТИМАЛЬНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ І СКЛАДІВ ДЛЯ ОТРИМАННЯ БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ ЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ

Завданням математичного планування експерименту полягало у дослідженні впливу технологічного режиму обробки та складів СВС-сумішей на показники зносостійкості та жаростійкості захисних покриттів з метою оптимізації режиму теплового самозаймання та вибору оптимальних СВС-складів. Випробування на жаростійкість проводили в електричній печі при температурі 1400° С протягом 20 годин. Характеристикою зносу служила зміна маси зразка в результаті випробувань при температурі 950° С, час витримки становило 60 хв.

Параметри оптимізації:

$Y_1$  – показники жаростійкості для алітування;

$Y_2$  – показники зносостійкості для борування;

В якості незалежних змінних були обрані: температура витримки, час витримки, вміст у СВС-суміші алюмінію або бору, вміст суміші хромистої складової. Як вихідний матеріал був обраний титан марки ВТ-20. Активатором процесу був  $AlF_3$  для процесів алітування та борування. Дисперсність порошків становила 250–350 мкм.

Матриця планування експериментів представлена таблицях 3.1-3.2. Розрахункові рівні інтервалів варіювання, характер їх змін та схеми кодування представлені в таблицях 3.1 і 3.2 Вибір основного рівня та інтервалів варіювання проводився виходячи з того, що введення ХС менше 15% мас. призводить до зриву хвилі горіння теплового самозаймання. Для повного відновлення окису хрому відповідно до реакції  $Cr_2O_3 + Al = Al_2O_3 + Cr$  потрібно 26,2% алюмінію. Отже, мінімальна кількість суміші, що містить хром, повинна становити 20% по масі. Збільшення вмісту хромовмісної суміші більше 25% повинен призводити до процесу хромоалітування. В даному випадку це небажано, так як зі збільшенням загальної глибини

дифузійного шару зменшується глибина карбідної зони, а отже, знижується фізико-механічні властивості матеріалу. Введення в суміш більше 5% газотранспортного агента призводить до сильного розтравлення поверхні зразка, менше 1% не активізує перебіг всіх газотранспортних реакцій.

Для отримання стовідсоткового складу порошкових СВС-сумішей як кінцевий продукт використовувався  $Al_2O_3$ .

Таблиця 3.1 Досліджувані чинники процесу алітування.

Характеристика	Чинники		
	Температура витримки, °С	Час витримки, хв	В складі $Al\%$ , мас.
Код	$X_1$	$X_2$	$X_3$
Основний рівень	1000	75	15
Інтервал варіювання	200	45	10
нижній рівень	800	30	5
Верхній рівень	1200	120	25

Таблиця 3.2 Досліджувані чинники процесу борирування.

Характеристика	Чинники		
	В складі $Al\%$ , мас.	В складі $B\%$ , мас.	$XC$ , % мас.
Код	$X_1$	$X_2$	$X_3$
Основний рівень	15	12,5	20
Інтервал варіювання	105	2,5	5
нижній рівень	5	10	15
Верхній рівень	25	15	25

Чисельні значення коефіцієнтів регресії та їх значимість, визначені з урахуванням відмінності дисперсій кожної функції відгуку, і навіть перевірка значимості за критерієм Стюдента і оцінка адекватності моделі за критерієм Фішера представлені у таблиці 3.3.

В результаті регресивного аналізу були отримані ряд рівнянь, що показують залежність зносостійкості та жаростійкості захисних покриттів від режиму теплового самозаймання та вмісту легуючих елементів.

У результаті розрахунків було отримано такі рівняння:

$$Y_1 = 16,96 - 3,8 X_1 - 2,9 X_2 - 3,6 X_3 + 4,56 X_1^2 - 1,94 X_2^2 + 2,55 X_3^2 - 2,12 X_1 X_3 \quad (3.1)$$

$$Y_2 = 24,6 - 7,4 X_1 - 1,5 X_2 + 4,7 X_3 + 10,5 X_2^2 - 3,5 X_3^2 + 1,00 X_1 X_2 + 0,75 X_1 X_3 \quad (3.2)$$

Таблиця 3.3. Результати регресивного аналізу експериментальних даних

Параметр	Функції відгуку	
	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>
b <sub>0</sub>	16,96	24,6
b <sub>1</sub>	-3,8	-7,4
b <sub>2</sub>	-2,9	-1,5
b <sub>3</sub>	-3,6	4,7
b <sub>4</sub>	4,5	0
b <sub>5</sub>	-1,94	10,5
b <sub>6</sub>	2,55	-3,5
b <sub>7</sub>	0	1
b <sub>8</sub>	-2,12	0,75
b <sub>9</sub>	0	0
Δb	1,78	0,506
t-критерій	2,78	2,78
F-критерій	0,017 < 6,04	4,3 < 6,04

Перевірка адекватності моделей показує, що їх можна використовувати для прогнозування значень функцій відгуку при будь-яких значеннях факторів між верхнім і нижнім рівнями. Для цього доцільно перейти до натуральних змінних, використовуючи формули перекладу, подану у такому вигляді:

$$X_{ij}^k = \frac{X_{ij}^n - X_{ij}^0}{\Delta_i} \quad (3.3)$$

де  $X_{ij}^k$  – кодоване значення досліджуваного і-го фактора в j-му рівнянні;

$X_{ij}^n$  – натуральне значення досліджуваного і-го фактора в j-му рівнянні;

$x_j^0$ - Значення досліджуваного і-го фактора в j-му рівнянні на основному рівні;

$\Delta_i$ - Значення інтервалу варіювання досліджуваного і-го фактора.

Шляхом заміни в рівняння (3.1-3.2) змінних  $X_i$  на праву частину рівняння (3.3) і наступним приведенням подібних отримуємо натуральні рівняння, що описують вплив режиму теплового самозаймання та вмісту легуючих елементів на жаростійкість захисних покриттів:

$$\Delta G = 16,96 - 3,8T - 2,9\tau - 3,6Al + 4,56T^2 - 1,94\tau^2 + 2,55Al^2 - 2,12TAl \quad (3.4)$$

Для оцінки адекватності рівнянь було проведено розрахунок за отриманими рівняннями регресії оптимального режиму теплового самозаймання. Результати розрахунків було зіставлено з експериментальними дослідженнями. Як видно з таблиці 3.4 похибка між розрахунковими та експериментальними значеннями функції відгуку не перевищує 1,5.

Таблиця 3.4 Відношення розрахункових та експериментальних даних

Показник	Розрахункове значення	Експериментальне	Похибка, %
$\Delta G$	9,71	11	1,29

З метою визначення режиму та СВС-складів, що забезпечують отримання оптимальних показників зносо- та жаростійкості покриттів будували тривимірні графічні залежності (рис. 3.1-3.6).

З аналізу рис.3.1-3.6 видно, що найбільш сильно показники зносостійкості та жаростійкості залежать від температури та часу витримки. Помітно впливає на жаростійкість та зносостійкість вміст алюмінію, хромистої складової та бору. Оптимальним є вміст алюмінію 22% мас.,(при алітуванні) і 15 (при боруванні), вміст бору 12,5%, хромистої складової



досить 20-22% мас., при якому реалізується режим виродженого теплового вибуху і температура досягає максимального значення

При дослідженні на жаростійкість встановлено, що зі збільшенням вмісту алюмінію, величина зменшення ваги зменшується. Оптимальним вмістом алюмінію є 22% мас. При дослідженні на зносостійкість встановлено, що зі збільшенням вмісту алюмінію та бору величина зменшення ваги зменшується. Оптимальним вмістом алюмінію є 15% мас., бору 12,5% та хромистої складової 22%. При дослідженні впливу режиму проведення теплового самозаймання встановлено, що температура процесу знаходиться у точці 1025° С, час витримки при цій температурі – 120 хв.

Оптимальним режимом протікання процесу самозаймання є температура витримки – 1025° С, час витримки - 120 хв, максимальна температура розігріву 1200° С.

В результаті математичного планування були отримані рівняння регресії, що описують вплив кожного фактора на параметр оптимізації та поверхні відгуку. Оптимальні жаростійкості – 11-14 мг/м<sup>2</sup>. Похибка рівнянь регресії становила не більше 1%.

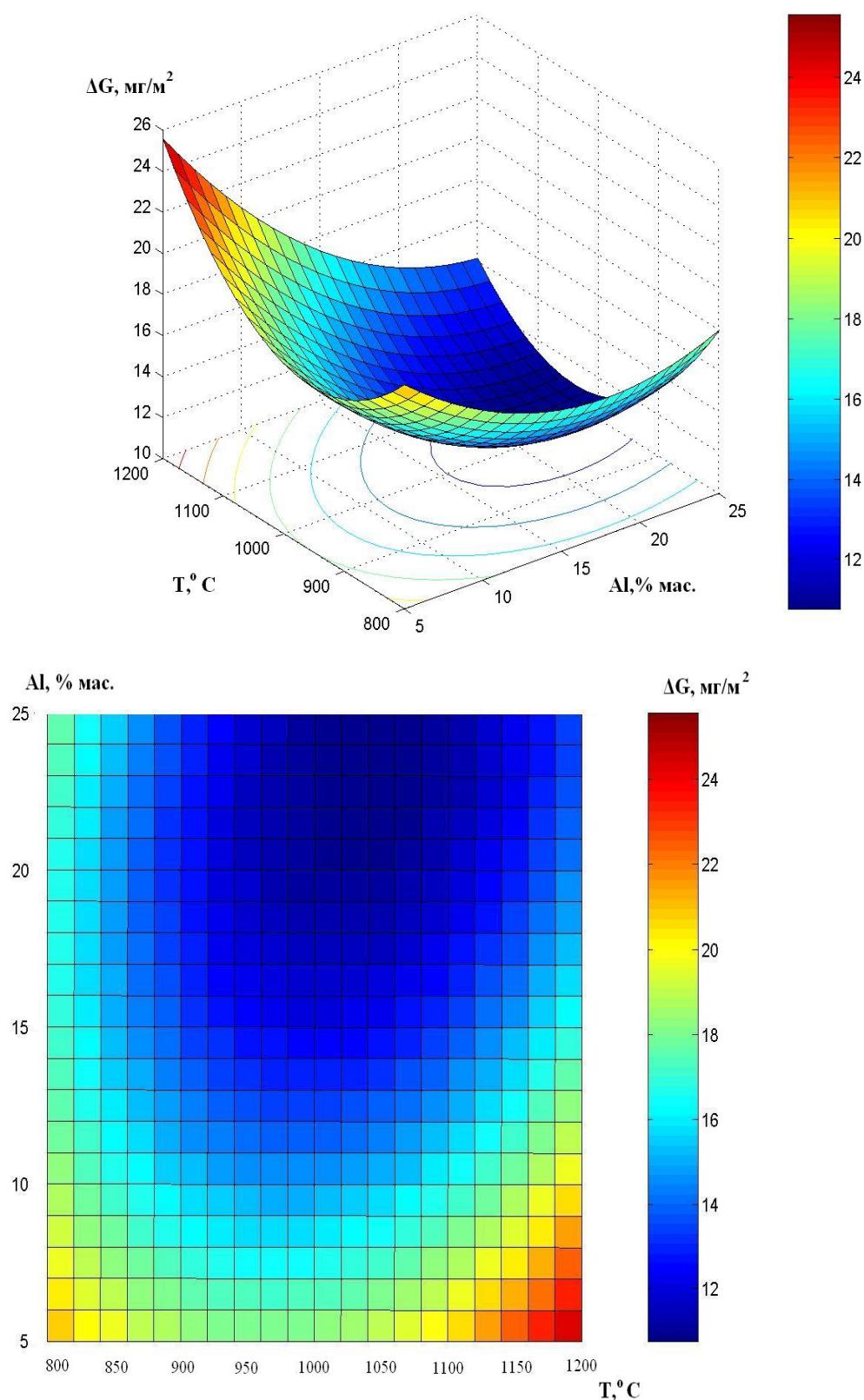


Рисунок 3.1. Оптимізація жаростійкості поверхневого шару легованого алюмінієм: вплив температури процесу та вміст алюмінію на жаростійкість. (Оптимум  $T = 1025$  °C,  $Al = 22$  %)

$$\Delta G = 16,96 - 3,8T - 2,9\tau - 3,6Al + 4,56T^2 - 1,94\tau^2 + 2,55Al^2 - 2,12TAl$$

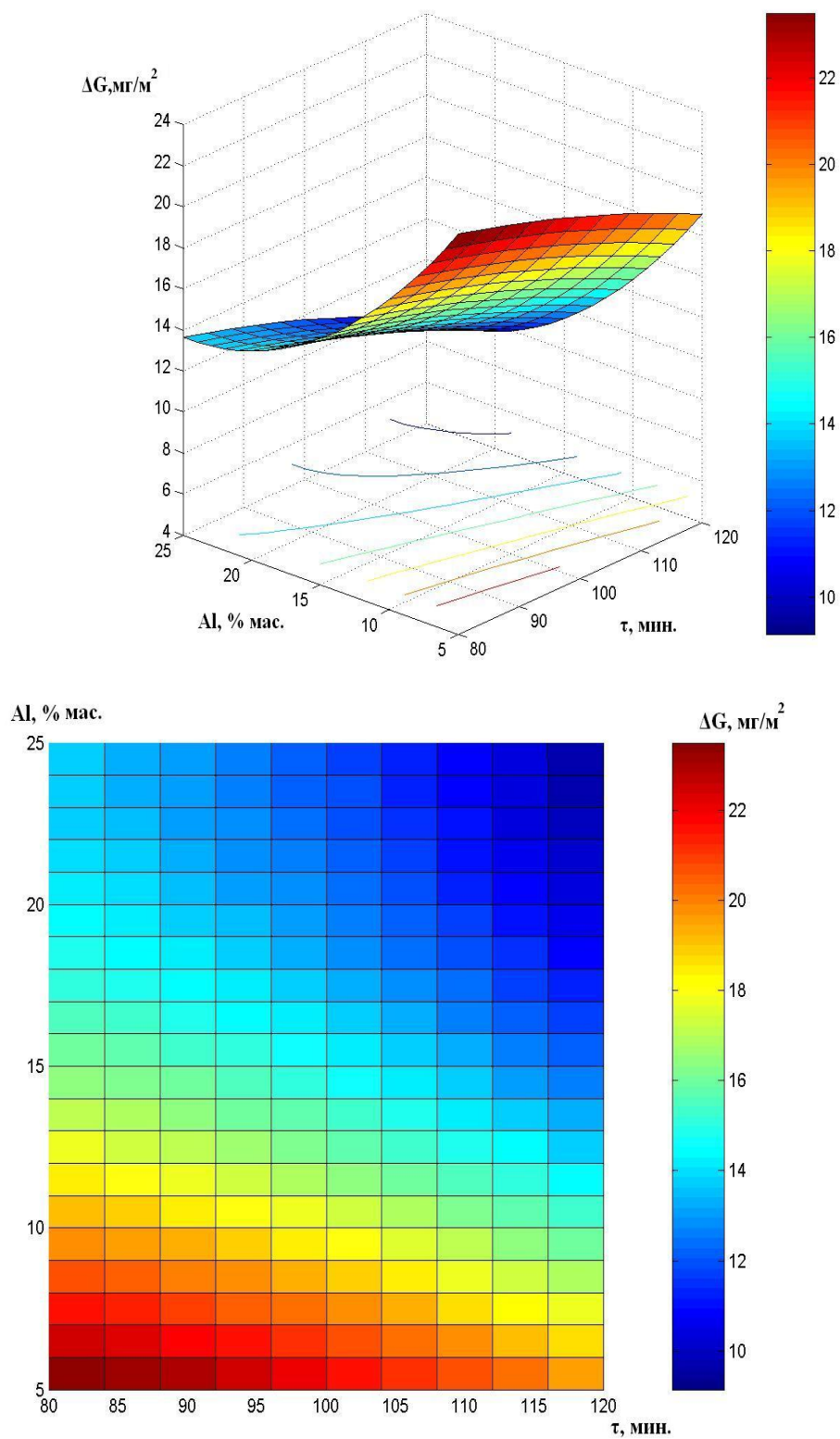


Рисунок 3.2. Оптимізація жаростійкості поверхневого шару легованого алюмінієм: вплив часу витримки у процесі та вміст алюмінію на жаростійкість. (оптимум  $\tau = 120$  мин.,  $\text{Al} = 22\%$ )

$$\Delta G = 16,96 - 3,8T - 2,9\tau - 3,6\text{Al} + 4,56T^2 - 1,94\tau^2 + 2,55\text{Al}^2 - 2,12T\text{Al}$$

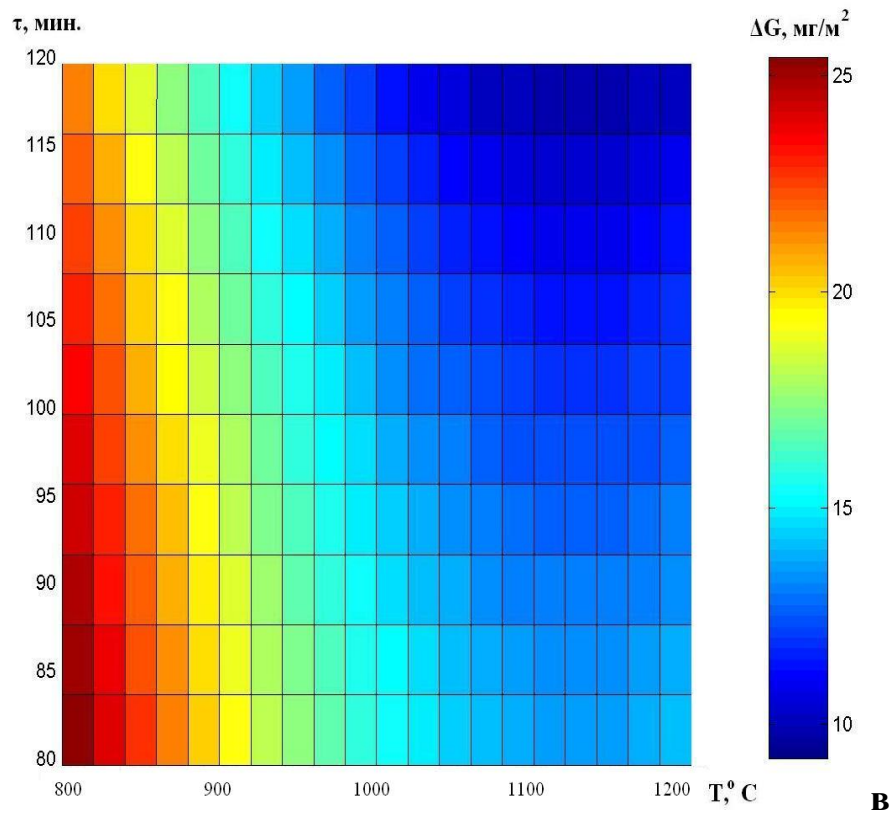
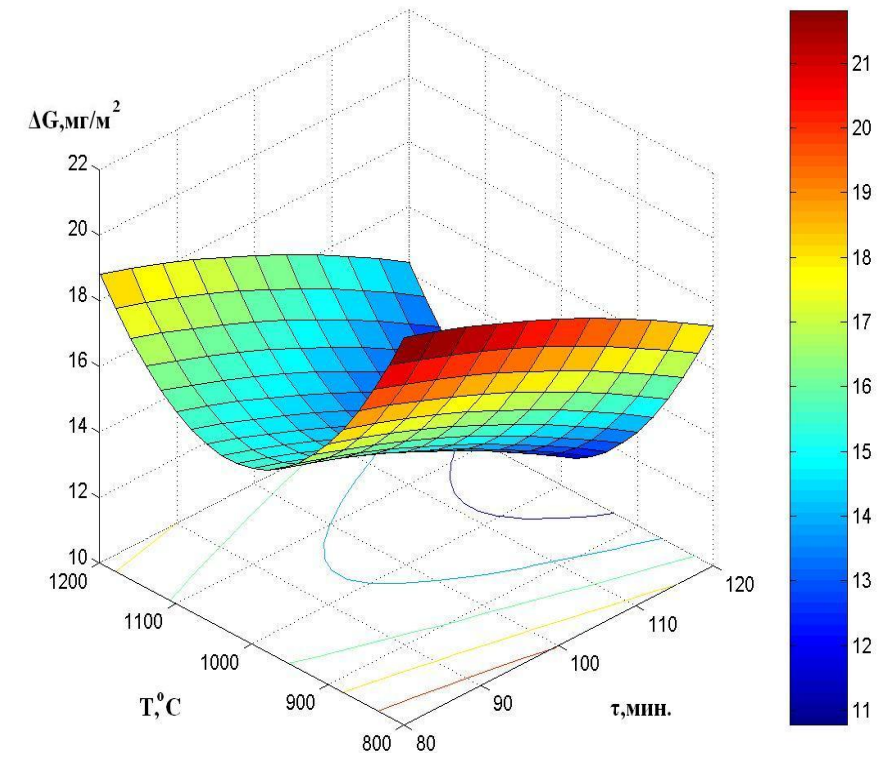


Рисунок 3.3. Оптимізація жаростійкості алітованого поверхневого шару:

вплив температури процесу часу витримки на жаростійкість.(оптимум

$$T = 1100^{\circ} \text{C}, \tau = 120 \text{ мин.})$$

$$\Delta G = 16,96 - 3,8T - 2,9\tau - 3,6Al + 4,56T^2 - 1,94\tau^2 + 2,55Al^2 - 2,12TAl$$

### 3.1 Мікротвердість

Мікротвердість зміцнених шарів є важливою механічною характеристикою металу, оскільки значною мірою зумовлює його опір зношування[104].

Основною причиною підвищення твердості титанових сплавів при боруванні в режимі теплового самозаймання є утворення у зміцненій зоні борідної фази, а при алітуванні утворення фази  $TiAl_3$ . Максимальна мікротвердість спостерігається у приповерхневих ділянках зміцненого шару. З віддаленням від поверхні твердість плавно знижується і на межі між шаром і підкладкою приймає значення, що дорівнює твердості титанового сплаву, що обробляється. Цей характер розподілу мікротвердості пояснюється фазовим складом зміцнених зон. У приповерхневих ділянках основною фазою, що зміцнює, є моноборид титану і фаза  $TiAl_3$ . На решті зміцненого шару кількість  $TiB$  знижується, а вміст такої фази, як твердий розчин бору і магнію в  $\alpha$ -титані, а для легованих сплавів включення  $Al_2Mg_3$  і  $TiAl_3$  збільшується.

Істотний вплив на мікротвердість зміцнених шарів відмовляє склад титанового сплаву, що обробляється. Аналіз експериментальних результатів показав, що найбільшу твердість мають шари, отримані на технічно чистому титані VT1-0. При переході від чистого титану до титанових сплавів VT-20 та VT3-1 твердість зміцнених шарів знижується. Це можна пояснити тим, що основним легуючим елементом даних титанових сплавів є алюміній (до 6%), який має пластифікуючу дію на зміцнені зони.

На твердість зміцнених шарів, незалежно від складу титанового сплаву, впливає також склад реакційної шихти, зокрема кількість активної складової. Зі збільшенням активної складової розповідається температура обробки та збільшується концентрація бору в реакційній суміші. Все це сприяє підвищенню твердості зміцнених зон, внаслідок більшої кількості борідної або  $TiAl_3$ -фази у шарах.

Наявність плавного переходу від максимальної твердості на поверхні до мінімальної межі між шаром і підкладкою, запобігає продавлюванню шару при експлуатації зміцнених титанових деталей.

### **3.2. Зносостійкість зміцнених зразків**

Особливістю титану і його сплавів є висока схильність до контактного схоплювання при терті, що може призвести до заклинювання деталей у вузлах машин і механізмів, що труться. Середнє значення статичного коефіцієнта сухого тертя для пари титан - титан дорівнює 0,61, а динамічного 0,47-0,49 (при швидкості 1 м.с<sup>-1</sup>). навантажень у точках контакту. На локальних ділянках контакту відбувається схоплювання завдяки вищій пластичності титану, ніж його окисної плівки. Руйнування зв'язків, що утворилися, через зміцнення поверхневого шару (газонасичення, наклеп) відбувається зазвичай в глибині основного металу зі значним наволакиванням і виривами металу. Легування титану та термообробка мало підвищують антифрикційні властивості.

Внаслідок схильності до схоплювання та налипання при терті титан має низьку зносостійкість. Висока хімічна спорідненість до кисню сприяє тому, що у звичайній атмосфері він завжди покритий тонкою та гладкою окисною плівкою. Мінеральні олії погано змочують цю плівку. Ця обставина є причиною високого коефіцієнта тертя при ковзанні титану та його сплавів.

Ефективним способом підвищення зносостійкості титанових деталей є створення поверхні металу борированного шару. Висока твердість цього шару та здатність утримувати на поверхні мінеральні олії сприяє збільшенню стійкості титану до зношування.

Основним завданням дослідження зносостійкості є визначення найвигідніших умов експлуатації деталей, зміцнених за пропонованими способами.

Досліджувані зразки з сплаву титанового ВТ-20 зміцнювали в режимі теплового самозаймання. У режимі теплового самозаймання обробку здійснювали за температури 950° С, час витримки становило 60 хв. (Табл.3.5).

Таблиця 3.5 Результати випробувань борваного сплаву ВТ20 на знос

Шлях тертя, м	Зміна ваги, г	Коефіцієнт тертя
200	0,0016	0,276
1200	0,0045	0,216
2200	0,0009	0,171

За перші 200 м шляху тертя на зразках спостерігається деяке збільшення маси. Збільшення маси зразків, що випробовуються, досягло максимального значення після 1200-метрового шляху тертя. При подальшому збільшенні шляху тертя до 2200 м зміна маси зразків була незначною. Коефіцієнт тертя в процесі випробувань зменшився від 0,228 до 0,171. Слідів схоплювання в парах, що контактують, не спостерігалось.

### 3.3. Залишкові напруження

Експлуатаційні характеристики зміцнених шарів багато в чому залежать від величини та знаку залишкової напруги [44].

З'являються залишкові напруги при охолодженні в результаті пружної взаємодії зміцненого шару та підкладки, що мають різні питомі обсяги та коефіцієнти термічного розширення.

Проведення дослідження показали, що обробка титанових сплавів у режимі теплового самозаймання сприяє утворенню в зміцненому шарі залишкових напруг стиснення. Рівень залишкової напруги суттєво залежить від максимальної температури проведення процесу. Так, при обробці титанових сплавів при температурі 900° С в зміцненому шарі виникають залишкові напруги стиснення, 130 МПа. Зі збільшенням температури обробки залишкові напруги зростають (при  $T_{\tau} = 900^{\circ} \text{C}$   $\sigma = 140 \text{ МПа}$ , при  $T_{\tau} = 1000^{\circ} \text{C}$

$\sigma = 160$  МПа). Ймовірно, цей результат пояснюється зміною фазового складу зміцнених шарів із підвищенням температури обробки.

На величину і характер розподілу залишкових напруг надає склад титанового сплаву, що обробляється. На зразках з технічно чистого титану VT1-0 залишкові напруги досягають 160-200 МПа, а на зразках з титанових сплавів VT3-1 і VT-20  $\sigma = 130 - 170$  МПа. Це можна пояснити різницею коефіцієнтів термічного розширення титанових сплавів, що розглядаються (для титану VT1-0  $\alpha = 8,3 \times 10^{-8}$  1/К, для ТВ3-1  $\alpha = 8,1 \times 10^{-8}$  1/К, для VT-20  $\alpha = 8,0 \times 10^{-8}$  1/К).

Зі збільшенням товщини шару рівень залишкових напруг дещо знижується.

### **3.4. Жаростійкість поверхонь**

На повітрі при температурі до 500° С титан мало окислюється. Вище цієї температури він починає активно взаємодіяти з атмосферними газами й у першу чергу із киснем повітря [3]. Окисна плівка до температури 700° С ще міцно зчеплена з металом, а при подальшому підвищенні температури вона стає пухкою і легко відшаровується від поверхні титану при охолодженні [5]. Одним із способів підвищення окалиностійкості титанових сплавів є алітування [62].

Випробуванням на жаростійкість піддані зразки з технічно чистого титану VT1-0, зміцнені в режимі самозаймання. В результаті проведених досліджень було з'ясовано, що після 10-годинної витримки при температурі 600° С питомий приріст маси, титанових зразків, зміцнених в режимі теплового самозаймання становив  $1,5 \times 10^{-3}$ ,  $0,8 \times 10^{-3}$  мг/см<sup>2</sup> і  $0,5 \times 10^{-3}$  мг/см<sup>2</sup>, а неупрочне -  $9,4 \times 10^{-3}$  мг/см<sup>2</sup>.

Зразки, оброблені в режимі теплового самозаймання, при температурі випробування 750° С починають сильно окислюватися і їх приріст ваги



становить  $18 \times 10^{-3}$  мг/см<sup>2</sup> (для неукріплених зразків приріст маси дорівнює  $27 \times 10^{-3}$  мг/см<sup>2</sup>).

Подальше підвищення температури до 900° С призводить до зниження окалиностійкості титанових зразків. Тут питоме зростання маси 0,67 мг/см<sup>2</sup>. Приріст маси не зміцнених зразків становить -0,75 мг/см<sup>2</sup>.

Таким чином, проведені випробування показують, що зміцнення в режимі теплового самозаймання дозволяє підвищити окалиностійкість титанових зразків до 750 ° С

### **3.5. Дослідження характеристик міцності титанових сплавів**

Основною метою проведення випробувань на розтягнення є оцінка надійності роботи титанових зразків, що зміцнюються, при статичних навантаженнях. Випробування на ударну в'язкість проводили з метою оцінки поведінки титанових зразків за умов підвищеної швидкості деформування.

Випробування здійснювали на зразках титанових сплавів ВТ-20 і ВТЗ-1, зміцнених в режимі теплового самозаймання.

Результати дослідження характеристик міцності титанових сплавів представлені в таблиці 3.6.

Видно, що при малому впливі на межу міцності, суттєво впливають на характеристики пластичності та в'язкості, знижуючи їх.

У разі випробування на розтягування титанових зразків не схильних до зміцнення поверхня руйнування є прикладом в'язкого зламу. На цій поверхні є дві зони: у центрі зламу волокниста зона, а по краю зразка зона зрізу. Волокниста зона складається з області випадково розташованих волокон, що утворюють рівновісні ямки.

Таблиця 3.6 Результати випробування титанових зразків на розтягування та ударну в'язкість

№	Марка титанового сплаву	Вид обробки	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	$\Psi$ , %	KCV, Дж/см <sup>2</sup>
1	BT-20	Без обробки	1070	14,0	46,0	54,0
2	BT-20	Режим теплового самозаймання $T = 950^\circ$ C, $\tau = 60$ хв	1010	11,9	39,6	47,0
3	BT-20	Режим теплового самозаймання $T=1050^\circ$ C, $\tau=60$ хв	1020	5,6	19,3	22,0
4	BT3-1	Без обробки	990	18,8	50,0	52,0
5	BT3-1	Режим теплового самозаймання $T = 950^\circ$ C, $\tau = 60$ хв	940	16,0	42,0	43,9
6	BT3-1	Режим теплового самозаймання $T=1050^\circ$ C, $\tau=60$ хв	1010	7,7	22,5	23,5

При випробуванні на розтягування зразків, зміцнених у режимі теплового самозаймання  $\alpha + \beta$ -області ( $950^\circ \text{C}$ ) поверхня руйнування також складається із зони зрізу та волокнистої зони. Проте, волокниста зона у разі складається з нерівновісних ямок, що свідчить про зниження пластичності випробуваного матеріалу. Про зменшення пластичності говорить і зниження частки зони зрізу у всьому зламі, порівняно з неукріпленими зразками.

Обробка при температурі  $1050^\circ \text{C}$  сприяє сильному крихтенню титанових зразків. Це пов'язано з великим зерном, що отримується при зміцненні зразків у  $\beta$ -області. Зростання зерна призводить також до суттєвого зниження в'язкості титанових зразків.

Таким чином, проведені дослідження характеристик міцності зміцнених титанових сплавів показали, що межа міцності мало змінюється від виду та умов обробки. Характеристики пластичності та в'язкості при обробці в режимі теплового самозаймання сильно залежать від температури обробки. У всіх випадках величини  $\delta, \Psi$  KCV знижуються, проте при обробці

в  $\alpha + \beta$  області вони зменшуються на 10-15%, а при зміцненні в  $\beta$ -області на 30-60%

### 3.6. Дослідження корозійної стійкості

Титан і його сплави мають високу корозійну стійкість у багатьох агресивних середовищах, зокрема, він стійкий до середовищ, що мають окислювальні властивості (азотна кислота, хромово кислота та ін). Титан корозійностійкий у "царській горілці", у багатьох органічних кислотах (оцтова, молочна та ін), у вологому хлорі, у газоподібних сполуках сірки [104].

Висока корозійна стійкість титану пов'язана з утворенням на поверхні пасивних плівок [105]. При досягненні потенціалу іонної пасивації утворюється окисна плівка рутила ( $\text{TiO}_2$ ); яка повністю захищає метал від розчинення. У розчинах мінеральних кислот захисні властивості титану можуть бути підвищеними за рахунок утворення тонкого гідридного шару [5].

Вибір корозійних середовищ здійснювали виходячи з передбачуваних областей експлуатації титанових деталей, що зміцнюються (хімічна промисловість, об'єкти спеціальної техніки).

Випробування на загальну корозію в середовищі 3% щавлевої кислоти проводили для зразків, зміцнених в режимі теплового самозаймання.

Аналіз результатів показав, що покриття, отримані в режимі теплового самозаймання, не сприяють підвищенню стійкості корозійної титану в щавлевій кислоті, а навпаки, збільшують швидкість корозії (табл.4.5). Швидкість корозії зміцненого технічно чистого титану VT1-0 підвищується у 6,3 рази порівняно з вихідним титаном. Швидкість корозії зміцнених титанових сплавів VT-20 та VT3-1 збільшується у 2 рази.

Причиною низької корозійної стійкості титану в даному середовищі, очевидно, є хімічна неоднорідність сплаву, оскільки поява неоднорідності призводить до виникнення різниці потенціалів, утворення мікрогальванічних пар та розвитку корозії. Про такий характер розвитку корозії свідчить зміна морфології поверхні у процесі випробування. Поверхня титанових зразків як з покриттям, так і без покриття внаслідок дії щавлевої кислоти набуває нерівного характеру, що нагадує вид лусочок. При цьому поверхня зміцнених зразків має лусочки з більш розвиненими пелюстками, що свідчить про інтенсивний процес корозії.

Таблиця 3.7. Дослідження корозійної стійкості титанових сплавів у 3%-й щавлевій кислоті

Марка титану	Вигляд зміцнення	Швидкість корозії, мг/м <sup>2</sup> ч
BT1-0	Без обробки	126
BT1-0	Режим теплового самозаймання	804
BT-20	Без обробки	234
BT-20	Режим теплового самозаймання	550
BT3-1	Без обробки	321
BT3-1	Режим теплового самозаймання	610

Корозійним випробуванням в 40% сірчаної кислоті піддавали зразки, зміцнені в режимі теплового самозаймання.

В результаті випробувань було з'ясовано, що в середовищі 40%-го розчину сірчаної кислоти зразки з технічно чистого титану BT1-0 мають меншу корозійну стійкість, порівняно з не зміцненими зразками. Так борування у режимі теплового самозаймання знижує корозійну стійкість титану приблизно 2 рази. Зміцнення в режимі теплового самозаймання зразків з титанових сплавів BT-20 і BT3-1 також призводить до зниження корозійної стійкості в 40% сірчаної кислоти. Тут, порівняно з вихідними металами, швидкість корозії підвищується в 2,5-2,8 рази.

Електрохімічну поведінку титанових сплавів досліджували у 3%-му розчині  $\text{NaCl}$ . В результаті дослідження встановлено, що титанові зразки у вихідному стані пасивні у всій галузі досліджених потенціалів (від -600 до 1200 мВ). При цьому значення струму в області анодної потенціалів досягають приблизно  $0,07 \text{ mA/cm}^2$ .

Титанові зразки, зміцнені в режимі теплового самозаймання практично не відрізняються в електрохімічному відношенні від вихідних майже у всій області потенціалів. Лише при великих потенціалах (приблизно 800 мВ) спостерігається збільшення струму (для зразків після борування в режимі теплового самозаймання - на два порядки). Очевидно, відбувається або піттингоутворення, або анодне розчинення з подальшим зниженням значень щільності струму. Процес анодного розчинення може бути пов'язаний із анодним процесом на покриттях.

Проведені корозійні випробування дозволяють визначитися з областями експлуатації пропонованих способів зміцнення титанових сплавів. Можна використовувати обидва види зміцнення для деталей, що працюють у водному розчині натрію хлористого, так як в цьому середовищі корозійна стійкість зміцнених титанових сплавів практично не відрізняється від стійкості вихідного металу.

### 3.7. Дослідження шорсткості поверхні

Важливою механічною характеристикою зміцнених титанових зразків є шорсткість поверхні. Дослідження цієї характеристики дозволяє для зразків, зміцнених у режимі теплового самозаймання, визначити зміни чистоти поверхні.

Проведені дослідження показали, що в режимі теплового самозаймання, незалежно від температури обробки, часу ізотермічної витримки та складу титанового сплаву, шорсткість поверхні завжди залишається постійною. При цьому спостерігається зменшення чистоти поверхні на 2-3 класи.

## 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

### 4.1 Загальні вимоги охорони праці

Сучасне металургійне підприємство є комплексом складних цехів, що характеризуються великою енергонасиченістю, електрифікацією та автоматизацією виробничих процесів. На заводах здійснюються складні транспортні перевезення великих мас шихти та шлаку, сталі та чавуну, а також інших різних вантажів. Металургійний завод це виробництво з підвищеною небезпекою. Працівники, які не знають правил охорони праці та техніки безпеки до роботи на підприємстві, не допускаються. Усі працівники зобов'язані знати загальні та спеціальні, призначені для кожної ділянки, правила охорони праці та техніки безпеки.

Охорона праці - система збереження життя і здоров'я працівників у процесі трудової діяльності, що включає правові, соціально-економічні, організаційно-технічні, санітарно-гігієнічні, лікувально-профілактичні, реабілітаційні та інші заходи, спрямовані на забезпечення безпечних для життя та здоров'я людини умов праці.

На металургійних заводах проводять вступний інструктаж, первинний на робочому місці, повторний, позаплановий та поточний інструктаж з охорони праці. Робочі згідно з правилами охорони праці забезпечуються спеціальним одягом, рукавицями, взуттям та іншими захисними пристроями (текстолітові або фіброві каски, підшоломники, щитки та маски з оргскла, окуляри-світлофільтри тощо). Відповідно до вимог охорони праці необхідно проводити профілактичні медичні огляди.

Техніка безпеки - система організаційних, технічних заходів та засобів, спрямованих на запобігання впливу небезпечних виробничих факторів на робітників [8]. До організаційних заходів належать: інструктаж та навчання вступників на роботу та працюючих безпечним

та нешкідливим прийомів роботи; навчання навичок користування захисними засобами; розробка та впровадження регламенту праці та відпочинку. До технічних заходів належать: розрахунок, проектування, виготовлення та розміщення обладнання, що забезпечують сприятливі та безпечні умови праці; організація захисту, запобіжних пристроїв та огорож; створення системи сигналізації, систем запобіжних знаків; створення індивідуальних засобів захисту [].

#### **4.2 Аналіз небезпечних виробничих факторів**

Небезпечний виробничий фактор — виробничий фактор, вплив якого на працівника може призвести до його травми (висота, вогонь, електричний струм, предмети, що рухаються, вибух). До небезпечних фізичних виробничих факторів відносяться: - Машини, що рухаються, і механізми; - різні підйомно-транспортні пристрої та вантажі, що переміщуються; - незахищені рухливі елементи виробничого обладнання (привідні та передавальні механізми, ріжучі інструменти, пристосування, що обертаються і переміщуються та ін.); - відлітають частинки оброблюваного матеріалу та інструменту; - електричний струм; - Підвищена температура поверхонь обладнання та оброблюваних матеріалів та ін. При експлуатації електродугової печі до небезпечних факторів можна віднести такі: а) постійно діючі небезпечні фактори: - Електричний струм високої напруги; - виплески рідкого металу або шлаку в період завантаження шихти, заміни електродів, перемішування рідкого металу в печі б) фактори періодичної дії: - вибухи при попаданні води, у ванну печі; - прорив рідкого металу під час перегріву кладки. До засобів колективного захисту належать:

– засоби захисту від ураження електричним струмом (огорожі, ізолюючі пристрої, покриття, запобіжні пристрої, попереджувальні знаки, світлова та звукова сигналізація); – засоби захисту від впливу механічних факторів (запобіжні, сигнальні та гальмівні пристрої); –

засоби захисту від попадання в рухомі та обертові частини обладнання (захисні кожухи та огороження). До засобів індивідуального захисту належать: – спецодяг (суконні штани, куртка, рукавиці, каска та ін.); - Засоби захисту очей (захисні окуляри з металевою сіткою); – засоби захисту органів дихання (марлеві пов'язки, респіратори та ін.).

### **4.3 Аналіз шкідливих виробничих факторів**

Шкідливий виробничий фактор - виробничий фактор, вплив якого на працівника може призвести до погіршення самопочуття або його захворювання (несприятливий мікроклімат, підвищений рівень шуму, вібрації, погане освітлення, несприятливий аероіонний склад повітря). Шкідливими фізичними виробничими факторами є: - Підвищена або знижена температура повітря робочої зони; - високі вологість та швидкість руху повітря; - підвищені рівні шуму, вібрації, ультразвуку - різні випромінювання - теплові, іонізуючі, електромагнітні, інфрачервоні та ін. - Запиленість та загазованість повітря робочої зони; - недостатня освітленість робочих місць, проходів та проїздів; - підвищена яскравість світла та пульсація світлового потоку. До шкідливих виробничих факторів при експлуатації електродугової печі відносять: - підвищену запиленість та загазованість повітря; - підвищений рівень шуму та вібрації; - Підвищена температура повітря робочої зони; - Випромінювання електричної дуги; - фізичне та нервово-психічне навантаження.

До засобів колективного захисту належать: – засоби нормалізації повітряного середовища (системи газоочищення та аерації); - Засоби нормалізації освітлення; - Засоби захисту від тепловипромінювання (теплоізоляційні покриття ковшів, нагрівальних стендів); - Засоби захисту від впливу хімічних факторів (герметизуючі, вентилуючі, очисні пристрої); - Засоби захисту від шуму; – засоби захисту від вібрації (застосування віброгасних матеріалів); До засобів індивідуального



захисту належать: – спецодяг (суконні штани, куртка, рукавиці, каска, та ін); - засоби захисту очей (захисні окуляри з металевою сіткою); – засоби захисту органів дихання (марлев'язки, респіратори та ін.).

Вибухо- та пожежонебезпека під час роботи на металургійних підприємствах

Вибухонебезпечність — сукупність факторів, що зумовлюють можливість утворення вибухонебезпечного середовища в обсязі, що перевищує 5% вільного обсягу приміщення, та його займання. Такими факторами служать пальне, окислювач і джерело займання. Поняття вибухонебезпечності відноситься до об'єктів, в яких можливі утворення газо-, паро- або пилоповітряного вибухонебезпечного середовища та вибух, що призводять до їх руйнування. Пожежна безпека — можливість виникнення та розвитку пожежі, а також її наслідки, що визначаються небезпечними для людей факторами та завданими матеріальними збитками. Визначення пожежної безпеки виробництва включає такі етапи: визначення пожежної безпеки матеріалів; — дослідження безпеки виникнення пожежі; — дослідження безпеки поширення пожежі. Визначення категорії виробництва з вибухової та пожежної безпеки здійснюється залежно від вибухової та пожежної безпеки речовин та матеріалів, що зберігаються на складах, транспортуються та використовуються у цехах, на робочих місцях та в агрегатах. Усі виробництва діляться п'ять категорій: А, Б, У, Р, Д. Залежно від категорії виробництва пред'являються відповідні вимоги до вогнестійкості будинків та споруд. А також розміщення їх на території підприємства, наявності засобів пожежогасіння тощо до влаштування електрообладнання.

Відповідно до «Правил пристрою електроустановок» простір всього приміщення або частини приміщення, в якому можуть утворюватися вибухонебезпечні суміші або знаходяться в обігу горючі матеріали, називається відповідно вибухонебезпечною або пожежонебезпечною зоною. У приміщенні з виробництвами категорій А, Б електрообладнання

має відповідати вимогам, які пред'являються до електроустановок у вибухонебезпечних зонах.

Залежно від частоти та тривалості присутності вибухонебезпечної суміші вибухонебезпечні зони ділять на шість класів: В-I, В-Ia, В-Iб, В-Iг, В-II, В-II. Пожежонебезпечні зони поділяються на чотири класи; П-I, П-II, П-II, а, П-III. Правильне розподілення зон на класи є дуже важливим, тому що від цього залежить вибір загальнопромислового або вибухозахищеного електроустаткування. Пожежну та вибухонебезпечність становлять усі основні виробництва підприємств чорної металургії. Певну складність на об'єктах чорної металургії викликає категорювання відповідно до вимог НПБ 105-95 доменних, сталеплавильних, прокатних та інших цехів, які мають великі площі. У зазначених цехах пожежонебезпечні приміщення (кабельні підвали, маслопідвали, тунелі тощо), розташовані нижче нульової позначки, зазвичай займають понад 10% загальної площі будівлі і значно перевищує 3500 м<sup>2</sup>. У зв'язку з цим будівля з пожежної безпеки має бути віднесена до категорії В і виконана не нижче за II ступінь вогнестійкості.

Застосування залізобетонних колон виключається через наявність мостових кранів, що створюють значні навантаження, а нанесення на металеві колони вогнезахисних покриттів дорого і практично неможливо через великі площі цехів. Тому нормативними документами дозволено щодо категорій пожежної безпеки цехів чорної металургії не включати площі пожежонебезпечних підвальних приміщень до складу загальної площі цеху за умови виконання наступних заходів:

Перекриття над підвалом, включаючи його несучі конструкції, повинне мати межу вогнестійкості щонайменше 2,5 год;

- всі пожежонебезпечні приміщення у підвалі мають бути обладнані встановлення автоматичного гасіння пожеж;

- у підвалах та тунелях перед сходами, що ведуть у приміщення категорії Г та Д першого поверху, слід передбачати тамбур-

шлюзи;

- протидимна витяжна вентиляція із підвальних приміщень повинна мати викиди безпосередньо назовні або через окремі шахти, мають межу вогнестійкості не менше 1 год. При виконанні даних умов усі основні цехи (доменні, сталеплавильні, прокатні та ін.) відносяться до категорії Г. Однак за пожежонебезпечними властивостями речовин і матеріалів, що застосовуються в приміщеннях, деякі приміщення можуть мати і більш високу категорію. Пожежна небезпека сталеплавильного виробництва. Пожежна небезпека сталеплавильного виробництва характеризується наявністю великої кількості рідкого металу, а також наявністю горючих газів, що відходять, кабельних комунікацій, маслопідвалів і маслотунелів. У сталеплавильних цехах можуть відбуватися вибухи та викиди рідкого металу в результаті завантаження в сталеплавильні печі та конвертери вологого металобрухту та шихти. Завантаження металобрухту, наприклад, в конвертери здійснюється однією або двома порціями (совками) і відразу після цього проводиться заливка чавуну. Після заливання чавуну вся маса металобрухту виявляється під рідким чавуном, внаслідок чого відбувається інтенсивне випаровування вологи та викид розплавленого металу. Викиди рідкого металу можуть відбуватися також і в тому випадку, коли рідкий метал вводять вологі розкислювачі і легуючі матеріали. При прогарі футерування сталеплавильних агрегатів і фурменних апаратів також виникає ймовірність вибуху з викидом рідкого металу при контакті розплавленого металу з вологими матеріалами. При викиді розплавленого металу може бути джерелом займання горючих матеріалів і сприяє зниженню здатності конструкцій будівлі цеху. Значну пожежну небезпеку становлять масляні пічні трансформатори. Кабелі або гнучкі стрічки струмопроводів захищають від дії прямого теплового випромінювання за допомогою азбестових щитів, або навіть застосуванням водоохолоджуваних струмопроводів [9]. Для усунення причин пожеж та вибухів у чорній металургії проводяться технічні,

експлуатаційні, організаційні та режимні події. Технічні заходи: дотримання протипожежних правил та норм при проектуванні будівель, при влаштуванні електропроводів та обладнання, опалення, вентиляції, освітлення, правильне розміщення обладнання. Експлуатаційні заходи – своєчасна профілактика, огляди, ремонти та випробування технологічного обладнання. Організаційні заходи: передбачають правильну експлуатацію машин та внутрішньозаводського транспорту, правильний утримання будівель, території, протипожежний інструктаж тощо. Режимні заходи – заборона куріння у невстановлених місцях, заборона зварювальних та інших вогневих робіт у пожежонебезпечних приміщеннях тощо.

#### 4.4 Допустимі рівні шуму на робочих місцях

На заводі, а саме на ділянці «пічний проліт» рівень шуму згідно з посадою наступний:

Займана посада	ПДК	Фактичний показник	Перевищено на
Сталевар, підручний сталевара	85	97	12
Машиніст завалочних машин	85	100	15
Пультувальник Ел. Печі	85	82	- 3
Шихтувальник	85	85	0

при розробці проектувань процесів виготовленні та експлуатації машин, виробничих будівель та споруд, а також при організації робочого місця були вжиті всі необхідні заходи щодо зниження шуму, що впливає на людину на робочих місцях, до значень, що не перевищують допустимі, зазначені в таблиці [9]:

розробка шумобезпечної техніки;

- застосування засобів та методів колективного захисту
- застосування засобів індивідуального захисту

Зони з рівнем звуку або еквівалентним рівнем звуку вище 85 дБ

Позначені знаками безпеки. Тих, хто працює в цих зонах, забезпечили засобами індивідуального захисту. На підприємстві забезпечується контроль рівнів шуму на робочих місцях.

#### Індивідуальні засоби захисту

- Промислова захисна каска проти температурних впливів
- Матеріал > скловолокно - поліефірна смола (стійкість проти рідкого металу)
- Промислова захисна каска проти температурних впливів з захистом шиї
- Матеріал > скловолокно - поліефірна смола
- Стандартна промислова захисна каска

Робочі місця	Рівні звукового тиску, дБ, в октавних статях середньгеометричними частотами в Гц								Рівні звуку та еквівалентні рівні звуку, дБ А
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Підприємства, установи									
1 Приміщення конструкторських бюро, розрахунків, програмістів, лабораторій для теоретичних робіт та обробки експериментальних даних	71	61	54	49	45	42	40	38	50
2 Приміщення управління, робітники	79	70	68	63	55	52	50	49	60
3 Кабіни спостережень та дистанційного управління:									80
А) безмовного зв'язку	4	7	2	8	5	3	1	0	65
Б) з мовним зв'язком по телефону	3	4	8	3	0	7	5	4	

4 Приміщення лабораторій для проведення експериментальних робіт, приміщення для розміщення галасливих агрегатів обчислювальних машин	94	87	82	78	75	73	71	70	80
5 Постійні робітники місця та робочі зони у виробничих приміщеннях та на території підприємств, постійні робітники місця стаціонарних машин	99	92	86	83	80	78	76	74	85

- Захист для очей > інфрачервоний захисний фільтр 4-8.
- Матеріал > поліетилен
- Індивідуальний захист для очей із захисною сіткою
- Захисні окуляри із захистом брів (від пилу та уламків)
- Захисна маска для обличчя із золотим покриттям. Повинна підходити для закріплення на касці
- Захист для вух / капсульний захист для вух
- Захист для вух / захисні біруші
- Респіратор / фільтр від пилу (вибір залежно від виділеного) шкідливої речовини)
- Захисний одяг для робітників, які піддаються впливу спеки
- Захисний костюм
- Спеціальний плащ для ливарника
- Спеціальний фартух для ливарника
- захисні рукавички проти термічних впливів
- захисні рукавички проти термічних впливів

#### 4.5 Влаштування системи відведення та очищення газів

1. ДСП-100УМК обладнання газовідвідним трактом, що служить

для відведення, допалювання, охолодження та очищення газів;

2. Газовідвідний тракт складається з:

- Системи газовідсмоктування;
- Аспіраційної парасольки;
- Газоочисної установки;
- Димососні установки;
- Димовий труби.

3. Система газовідсмоктування забезпечує відведення газів від електропечі через вільний отвір і призначена для уловлювання газів, що відходять [50].

4. Аспіраційна парасолька розташовується над піччю і служить для уловлювання хлоранізованих викидів газів з печі.

5. Газоочисне встановлення складається з п'яти корпусів рукавних фільтрів ФРІ – 1900. Прибирання уловленого пилу - сухе. Технологічний пил з корпусів рукавних фільтрів через бункери, оснащені механізмами струшування системою гвинтових конвеєрів та ковшовий елеватор, подається до бункеру збору пилу. Далі на спеціальних машинах вивозиться на утилізацію.

6. Транспортування пічних газів газовідвідним трактом забезпечується двошвидкісним димососам ДН 26\*2 потужністю електродвигуна 1000кW.

7. Викидання очищених газів в атмосферу здійснюється через димову трубу заввишки 150 метрів.

	Температура град. С	Швидкість потoku газоході м/сек	Об`єм вгазу в г/г.м <sup>3</sup>	Валовий викид пилу в атмосферу
Повітропровід г/о №1	80	16,7	424440	2,49
Повітропровід г/о №2	75	15,9	404100	2,40
Повітропровід №1 після Фільтрів	65	11,64	414000	0,011

Повітропровід №2 після фільтрів	60	12,5	407400	0,010
---------------------------------------	----	------	--------	-------

#### 4.6 Пожежна безпека

Для запобігання розповсюдженню полум'я по виробничим пристроям застосовують різні запобіжні пристрої.

Вогнеперешкодники - захисні пристрої, що вільно пропускають паро-або газо-повітряну суміш, але не пропускають полум'я.

Вогнеперегородники являють собою металеві сітки, гофровані пластини, насадки з інертними наповнювачами гравію, мінеральної вати. В огнепреградителях вогненебезпечна суміш розбивається на струмені малого діаметра, у якому горіння поширюється неспроможна, оскільки тепловтрати виявляються більше тепловиділень.

У разі пожежі застосовуються різні тверді, рідкі та газоподібні речовини. Вони повинні мати високий ефект гасіння

- швидко припиняти горіння при відносно малій витраті, не завдавати шкоди організму при використанні та зберіганні, не шкідливо впливати на предмети та матеріали при гасінні пожеж, бути дешевим.

Для охолодження вогнищ горіння застосовують вогнегасні речовини з великою теплоємністю, питомою теплотою пароутворення або плавлення, здатні швидко поширюватися по поверхні палаючих речовин, вбиратися і проникати в їх глиб. Як вогнегасні речовини застосовують воду, інертні гази, хімічну і повітряно-механічну піну, тверду вуглекислоту, пісок, кошми.

Насправді найчастіше застосовують воду. При попаданні на палаючу речовину вода охолоджує її завдяки нижчій своїй температурі та утворенню пари, яка до того ж перешкоджає доступу повітря до зони горіння [51].



Противопожежне водопостачання – комплекс пристроїв для подачі води до місця пожежі.

Зазвичай протипожежний водопровід поєднується з господарським, виробничим водопроводом.

Протипожежний водопровід розраховують на подачу необхідної для гасіння пожежі кількості води під відповідним натиском протягом не менше трьох годин.

Для подачі води на водопровідній мережі встановлюють гідранти-крани, до яких приєднують гнучкі рукави з брандспойтами для отримання з водопровідної мережі досить сильних струменів води.

Для автоматичного гасіння пожеж використовують спринклерне обладнання, яке складається з мережі водопровідних труб, що монтується під перекриттям, з загвинченими в них спринклерними головками.

## ВИСНОВКИ

В результаті математичного планування були отримані поверхні відгуку 10 та рівняння регресії, що описують вплив кожного фактора на параметр оптимізації. Так Оптимальні показники жаростійкості зі збільшенням маси зразка показані синім кольором на поверхнях і становлять 9-15 г/м<sup>2</sup> при температурі насичення 950-1050° С часу витримки 75-90 хв і вмісту кремнію в суміші 12-20%.

При дослідженні на жаростійкість встановлено, що зі збільшенням вмісту алюмінію, величина зменшення ваги зменшується. Оптимальним вмістом алюмінію є 22% мас.

Оптимальним режимом протікання процесу самозаймання є температура витримки – 1025° С, час витримки - 120 хв, максимальна температура розігріву 1200° С.

Оптимальні показники жаростійкості – 11-14 мг/м<sup>2</sup>. Похибка рівнянь регресії становила не більше 1%.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Джур Є.О., Кучма Л.Д., Манько Т.А. та ін Полімерні та композиційні матеріали в ракетно-космічній техніці: Підручник. К.: Вища освіта, 2003. 399 с.
2. Алексєєв Ю.С., Джур О.Є., Кулик О.В. та ін Технологія виробництва ракетно-космічних літальних апаратів: навчальний посібник. Д.: АРТ-ПРЕС, 2007. 480 с.
3. Санін Ф.П., Кучма Л.Д, Джур Є.О., Санін А.Ф. Твердопаливні ракетні двигуни. Матеріали і технології. Д.: Вид-во ДДУ, 1999. 318с.
4. Гайдачук А.В. Состояние и перспективы применения композиционных материалов в газотурбинных двигателях летательных аппаратов. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2004. № 3. С. 11-20.
5. Санін Ф.П., Джур Є.О., Кучма Л.Д., Хуторний В.В. Розвиток ракетно-космічної техніки в Україні. Д.: АРТ-ПРЕС, 2002. 401 с.
6. Коган Я.Д., Середа Б.П., Шмессель Э.А. Высокотемпературный способ получения покрытий в условиях СВС. *Металловедение и термическая обработка металлов*.1991. № 6. С. 39-40.
7. Аношкин Н.Ф. Международная конференция Мировой бизнес и технические перспективы титана и титановых сплавов. Цветные металлы.1999. №5. С. 96-100.
8. Новости международных рынков металлов. Металл Бюллетень. Украина. 2002. №3(57). С. 51-58.
9. Ишунькина А.Н., Лебедева Е.С., Родионов В.Л. Состояние и перспективы производства в ВИЛСе полуфабрикатов высокопрочных титановых сплавов для авиации, химии и энергетики. *Технология легких сплавов*. 1997. №2. С. 7-11.

10. Климов В.Т., Садков В.В. Титановые сплавы в конструкциях пассажирских самолетов . *Титан*.1998. №1(10). С. 10-14.
11. Софьянов А.В., Хохло-Некрасов О.Г., Лапин Л.И. Производство труб из титановых сплавов для крупногабаритных облегченных емкостей. *Сталь*. 1992. №9. С. 59-63.
12. Ананьев СВ., Кочетков Ф.В., Вайсеров В.А. Использование титана для возведения новых дымовых труб ТЭС. *Теплоэнергетика*. 1998. №6. С. 59-60.
13. Шадский А.А., Тишаков В.А., Родионов В.Л. Кузнечно-прессовые заготовки из титановых сплавов для машиностроения. *Технология легких сплавов*. 1997. №2. С. 6а - 7а, 15 - 19, 91, 99.
14. Котко А.В., Моисеев В.Ф., Печковский Э.П., Моисеева И.В., Пищак В.К. Влияние  $\beta$ -фазы на прочность титановых сплавов при низких температурах. Актуальные проблемы прочности: Тезисы докл. *Институт проблем материаловедения им. И.Н. Франка НАН Украины* 2001. С. 14-15.
15. Шаповалова О.М., Ивченко Т.И. Микролегирование титановых сплавов системы Ti-Al-Mn для повышения их функциональных свойств. *Нові матеріали в металургії та машинобудуванні*. 2001. №1. С. 16-18.
16. Погрелюк І.М., Федірко В.М., Довгунік В.М. Вплив азотування та оксидування на зношування титанових сплавів. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2000. №3. С. 123-126.
17. Федірко В.М., Погрелюк І.М. Азотування титану та його сплавів. К.: *Наук. думка*, 1995. С. 104-146.
18. Душкин А.М., Прошин А.Б., Иванов Е.Г. Защитные покрытия для стальных лопаток компрессора ГТД. *Авиационная промышленность*. 1988. №7. С. 13–15.
19. Шербединская А. В., Минкевич А. Н. Диффузионное насыщение ниобия и титана углеродом. Известия высшей школы. Цветная металлургия. 1965. №4.
20. Минкевич А. Н., Шульга Ю. Н. Поверхностное упрочнение титана

обработкой в расплавленной буре. *Металловедения и термическая обработка металлов*. 1957. №12. С.53-61.

21. Иванов А. С., Потехин А. Р., Томсинский В. С. Износостойкие покрытия на титановых сплавах. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1990. №1. С. 30-31.

22. Shilin R. Materials for aerospace technique. *Aviation Materials on the border of XX and XXI centuries*. VIAM-1994.v. 2. P. 49-63.

23. Tems R.D. Selection and use of Large diameter titanium pipe in a condeerp offshore oil production platform. *Proc. of the int. conf. on titanium prod. and appl.* 1990.v. 1. P. 368-393.

24. Глухов В. П. Боридные покрытия на железе и сталях. К.: Наукова думка, 1970. 290 с.

25. Лабунец В. Ф., Ворошнин Л. Г., Киндрачук М. В. Износостойкие боридные покрытия. К.: Техника, 1989. 158 с.

26. Жунковский Г. Л., Самсонов Г. В. Физическая и химическая обработка материалов. 1968. №4. С. 132.

27. Momose Osamu Твердофазное борирование титана аморфным бором и  $\text{KBf}_4$ . *Surface Finish Soc. Jap.* 1989. №1. С. 120-121.

28. Борисова А.Л., Борисов Ю.С. Использование процессов самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. *Порошковая металлургия*. 2008. № 1/2. С. 105-125.

29. Середи Б.П., Калініной Н.Є., Кругляк І.В. Поверхнєве зміцнення матеріалів: Монографія. Запоріжжя: РВВ ЗДІА. 2004. 230 с.

30. Вольпе Б.М., Евстигнеев В.В., Милуков И.В. и др. СВС дисперсных алюминидов никеля и защитные покрытия на их основе. *Физика и химия обраб. материалов*. 1996. №1. С. 50-54.

31. Архипов В.Е., Куксенова Л.И., Москвитин Г.В. и др. Покрытия на основе хрома и бора полученные методом СВС. *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2008. №4. С. 25-30.

32. Серeda Б.П., Палехова И.В. Получение двухкомпонентных покрытий на основе титана методом СВС. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2003. № 11. С. 30-32.

33. Серeda Б.П., Калинина Н.Е., Кругляк И.В. и др. Нетрадиционные методы химико-термической обработки поверхности. Сборник докладов VI Международной конференции «Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов». Ч.1. Харьков, 2005. С. 219-240.

34. International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis// Allerton Press, Inc. 150, Fifth Avenue, New York, 10011, USA.

35. Sereda B.P. Research of Properties of Zinc Coverings Received in Self-Propagating High-Temperature Synthesis Conditions. *Materials Science and Technology 2007*. Detroit, 2007. P. 220-224.

36. Sereda B.P., Sheyko S.P. Retrieving of Boronizing Coverings on Steel Received in Self – Propagation High -Temperature Synthesis Conditions // *Materials Science and Technology 2007*. Detroit, 2007. P. 172-177.

37. Less J. Sprenger H. Diaternare Systeme (Titan, Zirconium, Hafnium)-Kupfer-Silizium// *Common Metals*.- 1974.-№1.- P. 39-71.

38. Nick J., Sprenger H. Uber neue Phasen im Ternaren System Titan-Kupfer-Silizium// *Metallkunde*.-1969.-№2.- P. 136-139.

39. Серeda Б.П., Белоконь Ю.А., Бондаренко Ю.В. Исследование кинетики формирования защитных покрытий на углеродных материалах в условиях СВС. Сб. науч. трудов “Строительство, материаловедение, машиностроение”. Вып. 45, ч.2, Стародубовские чтения 2008, Днепрпетровск. С. 31-36.

40. Серeda Б.П., Бондаренко Ю.В., Белоконь Ю.А. Получение износостойких и антикоррозионных покрытий для элементов муфтовых соединений труб с использованием СВС-технологий. *Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті*. Дніпропетровськ: «Системні технології», 2008. Т.11. С. 194-199.

41.Середа Б.П., Белоконь Ю.А, Бондаренко Ю.В. Получение защитных покрытий на титановых сплавах в условиях СВС. Строительство, материаловедение, машиностроение. Сб. научн. трудов. Вып. 45, ч. 3. Днепропетровск, ПГАСА, 2008. С. 19-23.

42.Середа Б.П., Бондаренко Ю.В., Жеребцов А. А. Получение алюминидов титана методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Титан-2008: производство и применение. Сб. тез. Докл. 1-й науч.-тех. Конф. Мол. Ученых и специалистов. Запорожье: ЗНТУ, 2008 С. 52-53.

43. Середа Б.П., Бондаренко Ю.В., Листопад Д.А. Термодинамическое определение оптимальных условий для управления СВС-процессами. Строительство, материаловедение, машиностроение. Сб. научн. трудов. Вып. 48, ч. 2. Дн-вск, ПГАСА, 2009. С. 100-104.

44.Середа Б.П., Червоный И.Ф., Иващенко В. И., Бондаренко Ю.В., Листопад Д.А. Нанесение многокомпонентных силицированных покрытий на титановые сплавы в условиях самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). Титан-2009 в СНГ. Сб. трудов. Киев: ИМФ им. Г.В. Курдюмова НАН Украины, 2009. С.285-287.

45.Пат. 44533 Україна, МПК С 23 С 14/00. Захисне покриття титанових сплавів. Б.П. Середа, Ю.В. Бондаренко, І.В. Кругляк, Ю.О. Белоконь; замовник ЗДІА. № и 2009 03317; заяв. 07.04.2009; опуб. 12.10.2009, Бюл. №19.

46.Середа Б.П., Бондаренко Ю.В., Пилипчук Я.Н. Определение оптимальных условий насыщения для формирования покрытий в условиях СВС. *Строительство, материаловедение, машиностроение*. Сб. научн. трудов. Вып. 55, ч. 2. Дн-вск, ПГАСА, 2010. С. 50-53.

47.Середа Б.П., Бондаренко Ю.В., Середа Д.Б., Пилипчук Я.Н. Получение многокомпонентных медных покрытий на титановых сплавах в условиях СВС. Титан-2010 в СНГ. Сб. трудов. Киев: ИМФ им. Г.В. Курдюмова НАН Украины, 2010. С.34-37

48.Середа Б.П., Бондаренко Ю.В., Кругляк Д.О., Середа Д.Б. Процессы формирования защитных покрытий на основе кремния и меди в условиях самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Теория и практика металлургии. Сб. трудов. НМАУ. Днепропетровск. 2010. С. 70-72.

49.Середа Б.П., Бондаренко Ю.В. Термодинамические характеристики СВС-процесса образования покрытий на титане и его сплавах. Всеукраїнська науково-технічна конференція студентів і молодих вчених «Молода академія 2011». Збірка тез. Т.1 Днепропетровск, 2011. С. 71.

50.Середа Б.П., Кругляк И.В., Кругляк Д.О., Бондаренко Ю.В. Исследование физико-механических свойств многокомпонентных защитных покрытий на медных сплавах. Металургія. Наукові праці. ЗДІА. Вип. №24. 2011. С. 97-101.

51.Середа Б.П., Бондаренко Ю.В. Поверхностное упрочнение лопаток ГТД в условиях самораспространяющегося высокотемпературного синтеза.. XIII Міжнародна молодіжна науково-практична конференція “Людина і космос” Збірник тез. Днепропетровск, 2011. С. 619.

52. Середа Б.П., Белоконь Ю.А., Бондаренко Ю.В., Жеребцов А.А., Белоконь К.В. Исследование влияния дисперсности исходного порошка на параметры процесса горения в условиях самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. Сб. научных трудов. Вып. №2 . Запорожье, ЗНТУ, 2011. С. 53-56.