

Міністерство освіти і науки України

Запорізький національний університет

(State Higher Education Scientific Institution "National University of Zaporizhzhia")

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

(name faculty)

Кафедра металургійних технологій, екології та техногенної безпеки

(name name кафедр)

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної магістерської роботи

рівень вищої освіти другий (магістерський)

(другий (магістерський) рівень)

на тему Поверхнєве зміцнення титанових
сплавів в умовах нестационарних процесів обробки

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1362-омт

Федько Максим Володимирович

(ПІБ)

(ім'я)

спеціальності

136 Металургія

(номер і назва)

спеціалізація

(номер і назва)

освітньо-професійна програма

обробка металів тиском

(номер і назва)

Керівник проф. Белоконь Ю.О.

(прізвище та ініціал)

(ім'я)

Рецензент Кругляк Д.О.

(прізвище та ініціал)

(ім'я)

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

Спеціальність 136 металургія

Освітньо-професійна програма обробка металів тиском

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МТЕТБ

Ю.О. Белоконь

" 07 " 05 2023 року

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

Федько Максим Володимирович

(Студент, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Поверхнєве змінення титанових сплавів в умовах нестационарних процесів обробки

керівник роботи (проекту) Белоконь Юрій Олександрович д.т.н. проф.

(Студент, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчений звання)

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

2. Строк подання студентом роботи (проекта) 01.12.2023

3. Вихідні дані до роботи (проекта) поверхнєве змінення титанових сплавів в умовах нестационарних процесів обробки

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Реферат. Вступ. Аналітично-пошукова частина, Матеріали, обладнання та методики проведення експериментів, Моделювання процесів формування змінення шарів, Охорона праці та техногенна безпека, Висновки, Перелік джерел посилань.

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

Креслення презентаційний матеріал 13 слайдах (на 13 сторінках)

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата
		завдання прийняв
<u>Розділ 1</u> <u>Дослідницько-</u> <u>розрахункова</u> <u>частина</u>	<u>Белоконь Ю.О., проф.</u>	
<u>Розділ 2</u> <u>Матеріали,</u> <u>обладнання та</u> <u>методики</u> <u>проведення</u> <u>експериментів</u>	<u>Белоконь Ю.О., проф.</u>	
<u>Розділ 3</u> <u>Моделювання</u> <u>процесів</u> <u>формування</u> <u>змінених шарів</u>	<u>Белоконь Ю.О., проф.</u>	
<u>Розділ 4</u> <u>Охорона</u> <u>праці та</u> <u>техногенна</u> <u>безпека</u>	<u>Белоконь Ю.О., проф.</u>	
<u>Нормоконтроль</u>	<u>Белоконь Ю.О., проф.</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 методики проведення експериментів</u>	<u>до 19.11.2023</u>	
5	<u>Моделювання процесів формування змінених шарів</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 _____ Федько М.В.
(Підпис) (Підписати та вказати дату)

Керівник проекту (роботи) _____ Ю.О. Белоконь
(Підпис) (Підписати та вказати дату)

Реферат

Кваліфікаційна робота магістра: 92 стр., 12 рис., 7 табл., 40 джерел
посилань

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

Об'єкт дослідження – шарові дифузійні покриття отриманих на
титанових сплавах

Мета роботи є поверхневе зміцнення титанових сплавів в умовах
нестаціонарних процесів обробки

Літературний огляд показав, що використання титанових сплавів в
умовах впливу високих температур та проблему захисту титанових сплавів
можна вирішити шляхом створення нестаціонарних умов. Однак всі відомі
методи нанесення захисних покриттів (порошковий, з паст, рідких та газових
середовищах) є енергоємними і характеризуються великою тривалістю
процесу. У цьому актуальною є розробка нової технології, яка забезпечує
отримання покриттів необхідних експлуатаційних характеристик за
мінімального часу формування. Така технологія може служити як способи
отримання покриттів на основі самрозповсюджувального
високотемпературного синтезу.

Як видно з проведеного аналізу, основи СВС-процесу, що
застосовуються у металургійній практиці, вже створено. Однак теорія цих
процесів, методи управління ними та шляхи широкого регулювання складів
та властивостей їх продуктів вивчені зовсім недостатньо.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 АНАЛІТИЧНО –ПОШУКОВА ЧАСТИНА.....	8
1.1 Стан проблеми.....	8
1.2 Застосування титану в авіакосмічній промисловості.....	10
1.3 Конструкція та технічні умови виготовлення лопаток компресора ГТД.....	15
1.4 Аналіз структури, властивостей та методів захисту поверхні титанових сплавів.....	28
1.5 Зміцнення титанових сплавів хіміко-термічними методами.....	30
1.6 Саморозповсюджувальний високотемпературний синтез і його застосування для отримання покриттів на титанових сплавах.....	37
1.7 Отримання покриттів у режимі теплового самоzapалювання.....	43
1.8 Узагальнення результатів літературного аналізу.....	46
2 МАТЕРІАЛИ, ОБЛАДНАННЯ ТА МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТІВ.....	48
2.1. Матеріали та обладнання.....	48
2.2 Схеми установки для проведення та дослідження СВС.....	49
3. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ФОРМУВАННЯ ЗМІЦНЕНИХ ШАРІВ.....	54
3.1 Термодинамічний аналіз реакцій теплового самоzapалювання.....	54
3.2 Модель теплового самоzapалювання реакційної суміші.....	58
3.3 Теплова картина самоzapалювання реакційної суміші.....	68
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА.....	75
4.1 Загальні вимоги охорони праці.....	75
4.2 Аналіз небезпечних виробничих факторів.....	76
4.3 Аналіз шкідливих виробничих факторів.....	77
4.4 Допустимі рівні шуму на робочих місцях.....	82

4.5 Влаштування системи відведення та очищення газів.....	84
4.6 Пожежна безпека.....	86
ВИСНОВКИ.....	88
СПИСОК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	89

ВСТУП

Титан та його сплави, володіючи необхідними для високотемпературних конструкційних матеріалів експлуатаційними характеристиками, дедалі більше привертають увагу розробників оборонної техніки у зв'язку з можливістю розширити сферу їхнього практичного використання. На сьогоднішній день титанові сплави застосовують у ракетно-космічній техніці, зокрема для виготовлення лопаток турбін ВМД та лопаток компресора газоперекачувальних апаратів. Їх високі жароміцні властивості широко використовують у техніці високих температур. Однак разом з високими фізико-механічними властивостями титанові сплави мають порівняльний низький опір гідроерозії та зношування, низьку зносостійкість і жаростійкість (вже при температурах вище 500°C), що обмежує широке використання таких матеріалів в окислювальних середовищах.

Тому виникає необхідність захисту титанових сплавів від високотемпературної газової корозії та підвищення показників зносу- та жаростійкості. Враховуючи вищевикладене та передбачуване використання титанових сплавів в умовах впливу високих температур, на наш погляд, проблему захисту титанових сплавів можна вирішити шляхом створення багатокомпонентних комплексних легованих покриттів. Проте всі відомі методи характеризуються ресурсо- та енергоємністю, а також тривалістю. У зв'язку з цим актуальними є розробка нових способів хіміко-термічної обробки, що дозволяють регулювати склад і структуру покриттів, забезпечувати необхідні експлуатаційні характеристики, при мінімальному часі їх формування. Такими технологіями і можуть бути способи, засновані на явищі саморозповсюдженого високотемпературного синтезу (СВС).

1 АНАЛІТИЧНО – ПОШУКОВА ЧАСТИНА

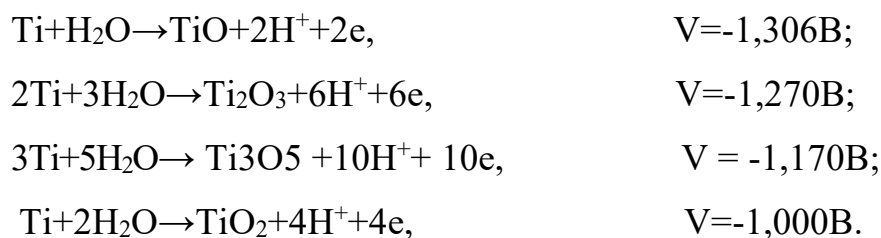
1.1 Стан проблеми

Титан займає четверте місце за поширеністю його сполук земної кори серед металів після заліза, алюмінію та магнію. Вміст титану в земній корі в середньому становить 0,57%, при цьому відомо 67 мінералів, що містять титан [1]. Титан відкритий у 1789 р. і належить до хімічних елементів IVA групи Періодичної системи елементів, розташовуючись поруч із цирконієм, гафнієм та торієм. Він має атомний номер 22, атомну масу 47,9 і відноситься до перехідних металів з недобудованою d-оболонкою. Електронна структура вільного атома титану $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^2 4s^2$. Температура плавлення титану дорівнює 1668 ± 5 °С, температура кипіння 3260 ± 5 °С, коефіцієнт лінійного розширення при 24° С дорівнює $8,15 \cdot 10^{-6}$ град¹, щільність 4500 кг/м³ [16-19].

Чистий титан зазнає алотропічного перетворення з гексагональної щільно упакованої кристалічної структури (α -фази) в кубічну об'ємно-центровану (β -фазу) зі зростанням температури вище 882,5°С [2]. Низькотемпературна модифікація титану має такі параметри ГПУ решітки: $a=0,29503 \pm 0,00004$ нм, $c=0,46831 \pm 0,00004$ нм. Слід зазначити, що відношення параметрів ГПУ решітки α -титану c/a становить 1,587, що нижче за аналогічне відношення для ідеальної ГПУ решітки, рівного 1,633. Цим фактом пояснюється вища пластичність α -титану в порівнянні з пластичністю магнію, цинку, кадмію, у яких це співвідношення більше 1,633. Для β -титану період ОЦК решітки при температурі 900° С становить $0,33065 \pm 0,00004$ нм [1,17,19]. Елементи, які розчиняючись у титані, призводять до підвищення температури перетворення (Al, N, O та ін), відомі як α -стабілізатори. Елементи, які сприяють зниженню температури фазового перетворення, називаються β -стабілізаторами (V, Nb, Mo та ін). Зрозуміло, у сплавах

однофазна α -область не межує безпосередньо з однофазною β -областю, як у чистому титані, тут вони розділені двофазною ($\alpha+\beta$)-областю, ширина якої зростає зі збільшенням концентрації легуючого елемента. Виходячи з цих міркувань класифікують як α , ($\alpha+\beta$) та β -титанові метали [3].

У електрохімічному ряду напруги титан займає положення між берилієм і магнієм. Нормальний потенціал реакції $Ti \rightarrow Ti^{2+} + 2e$, віднесений до нормального водневого електрода, дорівнює $-1,75$ В. . З негативних значень термодинамічних потенціалів іонізації атомів слід, що титан термодинамічно нестабільний, отже, повинен мати низьку корозійну стійкість. Однак Ti є корозійностійким елементом, що пояснюється утворенням на поверхні пасивної щільної плівки. Тип плівки та її пасивність залежать від середовища. Найбільше значення освіти захисної плівки мають оксиди титану. Залежно від температури, значень pH, концентрації та перемішування розчину утворюються оксиди з різними кристалічними ґратами, що мають різні електрохімічні потенціали, а отже, і різну пасивність. Найбільш стійким є діоксид титану TiO_2 , менш стійкі Ti_3O_5 , Ti_2O_3 та TiO . Утворення цих оксидів відбувається за такими реакціями [17,19]:



Захисна плівка може складатися з декількох оксидів, включаючи гідриди, при цьому на поверхні металу знаходяться стійкіші оксиди, а ближче до поверхні захисної плівки - менш стійкі. Крім того, титан має унікальну здатність самоорганізації порушеної суцільності захисної плівки.

Висока корозійна стійкість, ерозійно-кавітаційна стійкість, питома міцність, не холодноламкість та ряд інших унікальних фізико-механічних властивостей сприяють широкому застосуванню титанових сплавів у

сучасній техніці. Сьогодні використання титанових сплавів як конструкційні матеріали в авіакосмічній, суднобудівній, хімічній та інших галузях промисловості можна вважати традиційним.

В останні роки зростає попит на титан в інших галузях промисловості [4-5]: наприклад, з'явилася нова сфера застосування титану - виробництво військових броньованих машин. Збільшується також споживання продукції з титану у хімічній промисловості [4,7]. У нетрадиційних областях необхідність у титані (у європейських країнах) на 2001 р склала 5 тис.т на рік, з них автомобілебудування - 0,8 тис.т на рік, нафто-газопереробна промисловість - 0,5 тис.т на рік, виробництво спорттоварів – 0,4 тис. т на рік. Відзначено тенденцію збільшення використання титану в медицині [3].

1.2 Застосування титану в авіакосмічній промисловості

Основними споживачами титану є підприємства аерокосмічного комплексу. Так, наприклад, у військовій авіапромисловості використання титану зросло з 14% 2000р. до 25% у 2002 р. (від загального споживання сплавів титану у світі). Метал використовується у виробництві газових турбін для літакобудування, деталей двигунів (роторні лопатки, диски, кільця, корпуси тощо).

Не дивно, що першим споживачем титану була авіаційна промисловість. Створення літальних апаратів зі швидкостями, близькими до швидкості звуку та переважаючими її, визначило ряд технічних та економічних вимог до конструкційних матеріалів, що йдуть на виготовлення корпусу літака та його обшивки, а також двигунів.

Одним з перспективних матеріалів є так званий «Гама»-сплав, який може бути використаний не тільки в космічній техніці, а й в інших галузях енергетичного машинобудування (стаціонарні турбіни енергогенераторів, енергетичні установки), транспортному машинобудуванні (поршневі та

дизельні двигуни), газо- та нафтопереробні установки хімічної промисловості, атомному машинобудуванні, де вимоги до жароміцних матеріалів менш жорсткі.

Для виготовлення двигуна Аеробус А380 споживається близько 11 тон титану. Зокрема у розподіл титану в планері літаків становить А340 - 6 %, А380 - 9 %, В777 - 9 %, В786 - 17 % (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Використання титану у різних літаках

Тип літака	Споживання, кг	% титану від загальної ваги
Ту 154	490	2
ІЛ 62М	1664	4
ІЛ 86	7790	9
ТУ 334	1210	8,7
ТУ 204	2570	9
ІЛ 96	8295	9,5

Несумісність алюмінію з неметалевими композитами, що становлять 50% ваги моделі Боїнга-787, є основною причиною того, чому алюміній становить лише 25% ваги літака, а титан становить від 15 до 20% ваги корпусу літака. Таку версію Боїнга планується ввести в експлуатацію у 2011 році. Приблизно 58 т титану використовується у Боїнгу 777, 43 т – у Боїнгу 747, 18 т – у Боїнгу 737, у далеких Аеробусах А380 може використовуватися 77 т титану, включаючи близько 11 т у двигунах цього літака. У двигунах титан використовується для роторів, лопаток турбін, гідравлічних систем та компонентів.

Двигуни сучасних навчально-тренувальних та легких бойові літаки типу Як/АЕМ-130, L-159 та ін. забезпечують максимальну безпеку виконання польотів та високу бойову ефективність за тривалого терміну служби та низьких експлуатаційних витрат. Попит зростатиме, оскільки нові моделі літаків компаній Аеробус і Боїнг вимагають у два чи втричі більше титану, ніж багато сьогоденних моделей літаків. Це особливість пов'язана з вимогою економії палива на дедалі більшу ціну на нафту.

Збільшення споживання титанових сплавів підтверджується і зростаючим обсягом виробництва губчастого титану як основної сировини для виробництва цього конструкційного матеріалу [8].

В Україні є всі можливості для повного циклу виробництва титану та його сплавів. Насамперед, це сировинна база - наявність великих родовищ титановмісних руд (8,4 млн. т). На території України розташовані : велике розсипне Малишевське родовище, яке було основною сировинною базою колишнього СРСР, велике Стремегородське родовище апатит-ільменітових руд, кілька невеликих розсипних родовищ. На Запорізькому титано-магнієвому комбінаті налагоджено виробництво титанової губки з обсягом потужностей до 6 тис. тон на рік. Починаючи з 1995 р. налагоджено отримання титанових зливків за один переплав на заводі електронно-променевої металургії АТЗТ «ФІКО», м. Київ. Все це дозволить перетворити нашу країну з імпортера титанової продукції на її експортера.

У зв'язку з необхідністю суттєвої заміни літакового парку передбачається зростання споживання титану у період до 2017 р., рис. 1.1.

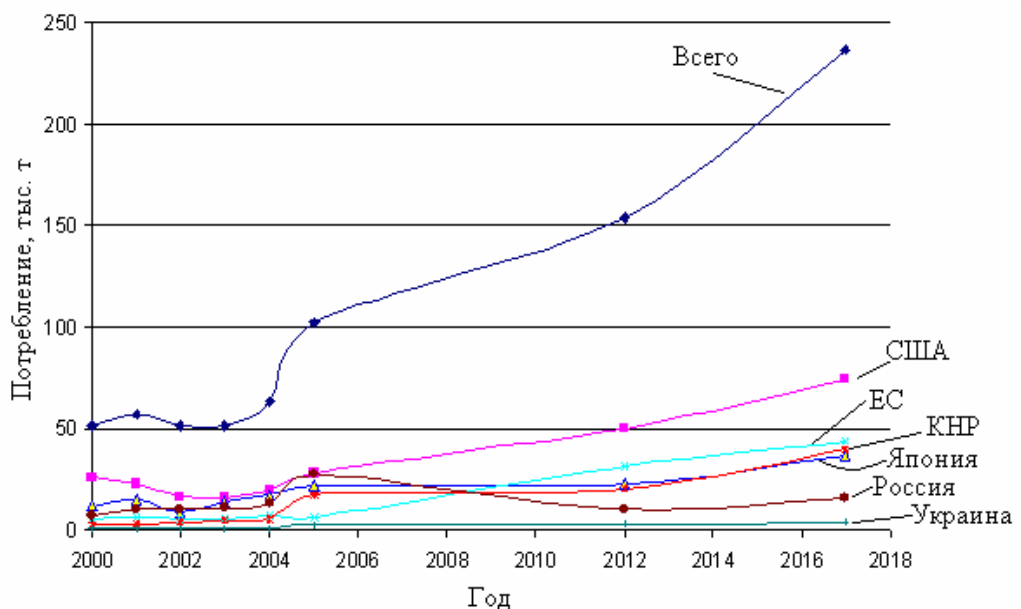


Рисунок 1.1 – Споживання титану у світі

Внутрішній ринок споживання титану в Україні пов'язаний із застосуванням титанових сплавів для заміни нержавіючих сталей, що містять нікель, молібден, які в Україні не виробляються.

Таблиця 1.2 – Динаміка споживання губчастого титану та злитків в Україні, т

Споживання	2002 р.	2003 р.	2004 р.	2005 р.	2006 р.
Загальний обсяг реалізації губчастого титану	6122,5	6975	7571	8223	9000
Споживання в Україні	575	827	1668	4111	5000
Обсяг випуску титанових зливків	525	664	1265	1300	1300

У найближчій перспективі збережеться позитивна динаміка зростання попиту титановий прокат. Це ґрунтується на тому, що за період із 2005 по 2011 роки. потрібна істотна заміна літакового парку і в тому числі найбільш титаноємні широкофюзеляжні машини. Починаючи з 2006 р. фірма Airbus розпочинала серійний випуск супераеробусів А380, а фірма Boeing планує великосерійне виробництво нового літака – В767 Dreamliner. У конструкції літака В767 широко використовуються композиційні матеріали: композити – 50%, алюміній – 20%, титан – 15%, сталь – 10%, інші матеріали – 5%. Мідного дроту – 108 км.

В даний час досягнуто значного прогресу в галузі створення конструкційних титанових сплавів за такими перспективними напрямками: багатошарові композиційні матеріали з внутрішнім та зовнішнім армуванням.

Титанові сплави, володіючи високими механічними властивостями, знайшли широке застосування при виготовленні відповідальних деталей газотурбінних двигунів, які в процесі роботи зазнають впливу великих статичних і змінних напруг при порівняно високій температурі. Наприклад, жароміцні сплави ВТ3-1, ВТ8 та ВТ9 використовують для виготовлення дисків, лопаток та кілець компресора. Основною областю застосування

листових сплавів типу ВІД-4, а також сплаву ВТ20 підвищеної міцності є пустотілі лопатки направляючих апаратів та корпусні деталі компресора. Висока чутливість титанових сплавів до концентрації напруги при змінних навантаженнях вимагає ретельного обліку умов роботи деталей, підбору режимів і способів їх обробки.

В даний час можна назвати наступний комплекс основних механічних властивостей, яким задовольняють титанові сплави, які застосовують для деталей авіаційних двигунів.

1. Високий опір втоми при кімнатній та підвищеній температурах. Ця характеристика особливо важлива для лопаток компресора, які під час роботи зазнають змінних навантажень. Межа витривалості гладких зразків при температурі 20°C повинен становити не менше 45% межі міцності, а при температурі до 400°C – не менше 50% межі міцності для відповідних температур.

2. Висока короткочасна та тривала міцність у всьому інтервалі робочих температур. Межа міцності при кімнатній температурі – 1000 – 1200 МПа; короткочасна та 100-годинна міцність при 400°C – 750 МПа, 100 – годинна міцність при 500°C - МПа.

3. Термічна стабільність. Сплав повинен зберігати свої пластичні властивості після тривалого впливу високих температур та напруг. Він не повинен охрущуватися не тільки після 100-годинного нагріву за будь-якої температури в інтервалі $20\text{-}500^{\circ}\text{C}$, але і після впливу температур і напруг у заданих умовах протягом часу, що відповідає максимальному заданому ресурсу роботи двигуна.

4. Задовільні пластичні властивості за кімнатної температури: відносне подовження 10%, поперечне звуження 30%, ударна в'язкість $0,3 \text{ МДж/м}^2$.

5. Високий опір повзучості. Ця характеристика особливо важлива для дисків компресора, що працюють під впливом значних напруг, що розтягують.

Залежно від умов роботи деталі, перевага надається тому чи іншому з перерахованих властивостей за збереження відповідних оптимальних значень інших.

1.3 Конструкція та технічні умови виготовлення лопаток компресора ГТД.

Лопатки компресора газотурбінних двигунів поділяють на робочі та напрямні. Залежно від призначення та умов роботи лопатки виготовляють гарячим штампуванням, пресуванням, прокаткою тощо.

Основними конструктивними елементами лопаток є перо та коренева частина – замок.

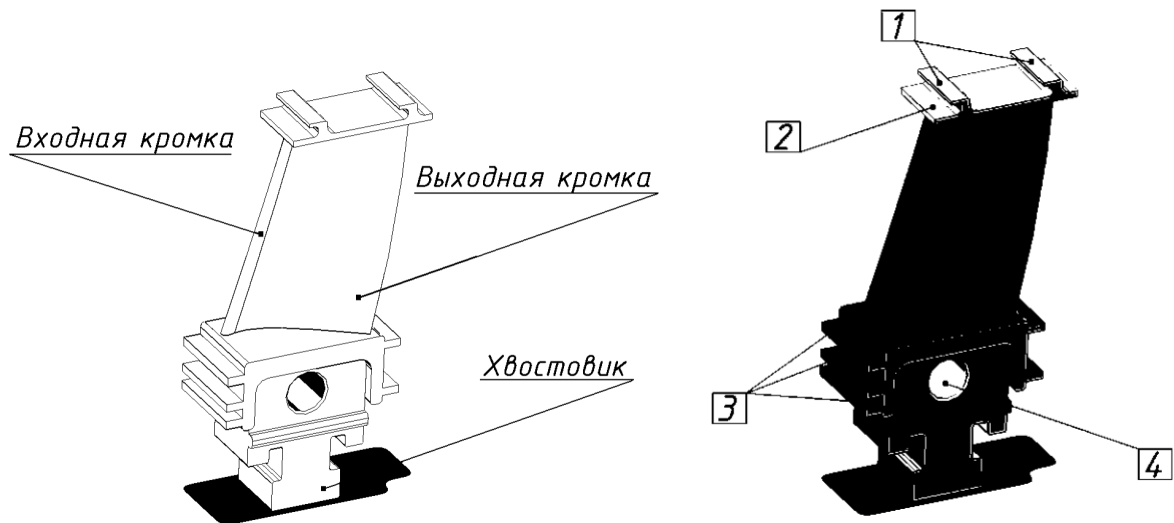
Перо лопатки має складну просторову форму із змінними профілями поперечних перерізів по довжині. Перерізи повернені відносно один одного, утворюючи закрутку пера.

Кріпильним елементом у лопатки є замкова частина, поверхні якої є конструкторськими базами, що визначають положення лопатки в складальній одиниці. Замок робочої лопатки компресора виконується, часто, трапецеїдальної форми (типу "ластівчиного хвоста").

Лопатка (лопась) - деталь лопаткових машин, призначена для зміни параметрів газу або рідини. Для кожної лопатки характерний власний аеродинамічний профіль. Зазвичай він нагадує крило літального апарату. Найбільша відмінність лопатки від крила полягає в тому, що лопатки працюють у потоці, параметри якого дуже сильно змінюються по її довжині [9].

По конструкції профільної частини лопатки поділяються на лопатки постійного та змінного перерізів. Лопатки постійного перерізу застосовуються для щаблів, у яких довжина лопатки не більше однієї десятої середнього діаметра щаблі. У турбінах великої потужності це, як правило,

лопатки перших щаблів високого тиску. Висота цих лопаток невелика і становить 20-100 мм.



1-гребінці лабіринтного ущільнення радіального зазору; 2-бандажна полиця; 3-гребінці торцевого лабіринтного ущільнення; 4-отвір для підведення охолоджуючого повітря у внутрішні канали лопатки, що охолоджується

Рисунок 1.2 Лопатка ГТД

Лопатки змінного перерізу мають змінний профіль на наступних щаблях, причому площа поперечних перерізів плавно зменшується від кореневого перерізу до вершини. У лопаток останніх щаблів це співвідношення може досягати 6-8. Лопатки змінного перерізу завжди мають початкову закрутку, тобто кути, утворені прямою, що з'єднує крайки перерізу (хордою), з віссю турбіни, званіми кутами установки перерізів. Ці кути, з міркувань аеродинаміки, заввишки задаються різними, з плавним збільшенням від кореня до вершини[10].

Для відносно коротких лопаток кути закрутки профілю (різниця між кутами установки периферійного та кореневого перерізів) становлять 10-30, а для лопаток останніх щаблів можуть досягати 65-70.

Взаємне розташування перерізів по висоті лопатки при утворенні профілю та положення цього профілю щодо диска є установкою лопатки на

диску і повинне задовольняти вимогам аеродинаміки, міцності та технологічності виготовлення.

Лопатки в основному виготовляються із заздалегідь відштампованих заготовок. Також застосовуються методи виготовлення лопаток точним литтям або точним штампуванням. Сучасні тенденції підвищення потужності турбін вимагають збільшення довжини лопаток останніх щаблів. Створення таких лопаток залежить від рівня наукових досягнень у галузі аеродинаміки потоку, статичної та динамічної міцності та наявності матеріалів з необхідними властивостями [11].

Сучасні титанові сплави дозволяють виготовити лопатки завдовжки до 1500 мм. Але в цьому випадку обмеженням є міцність ротора, діаметр якого доводиться підвищувати, але тоді необхідно зменшувати довжину лопатки для збереження співвідношення з міркувань аеродинаміки, інакше збільшення довжини лопатки неефективне. Тому існує обмеження довжини лопатки, більше за яку вона не може ефективно працювати. Принцип дії роботи лопаток ВМД представлений на рисунку 1.3.

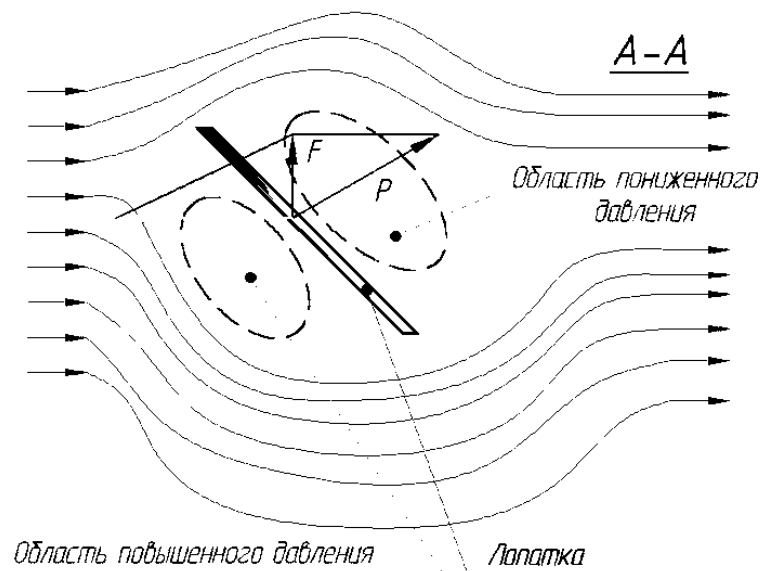


Рисунок 1.3. Принцип дії лопаток ГТД

Лопата стоїть на шляху руху повітря. Коли потік стикається з нею, він гальмується і змінює напрямок руху, обтікаючи її, як показано на рисунку

1.3. При цьому біля передньої поверхні лопаті виникає область з підвищеним тиском повітря, а біля задньої поверхні виникає область зі знизеним тиском. Величина різниці тисків Δp залежить від багатьох параметрів, наприклад, швидкості руху повітря, кута атаки, форми поверхні.

Через різницю тисків на поверхнях на лопатку починає діяти сила P , спрямована нормалі до її площині. Оскільки лопатка жорстко закріплена на роторі і не може здійснювати осьові переміщення, на неї діє сила реакції опори N , спрямована по осі ротора у бік протилежного руху потоку. Сумарною силою, при складанні цих двох сил є сила F , спрямована перпендикулярно осі ротора. Оскільки ця сила прикладена до лопаті, виникає крутний момент M , який змушує ротор обертатися. Пов'язаний із ротором механізм виконує корисну роботу.

Ресурс і надійність авіаційних двигунів в основному визначаються несучою здатністю лопаток компресора, що є найбільш відповідальними та високонавантаженими деталями, що зазнають у процесі експлуатації значних знакозмінних і циклічних навантажень, які впливають на них з великими частотами. Лопатки компресора наймасовіша, високонавантажена та відповідальна деталь авіаційного двигуна.

Особливістю лопаток компресора, що мають тонкі вхідні та вихідні кромки та виготовлених з титанових сплавів, дуже чутливих до концентрації напруг, є те, що вони першими зустрічаються з чужорідним тілом (птах, град та ін.), що потрапили в тракт двигуна.

Ризики, вибоїни, ерозійні ушкодження та ін. Дефекти значно збільшують рівень локальних вібронапружень, що різко знижує характеристики лопаток міцності [9,11]. Тому створення сприятливого поєднання властивостей поверхневого шару на фінішних оздоблювально-зміцнювальних операціях дуже впливає на підвищення несучої здатності лопаток ГТД.

В даний час при виготовленні лопаток компресора широкого застосування набули методи пластичного деформування та механічної

обробки, а також комплексні технології на фінішних операціях технологічного процесу [13].

Віброабразивна обробка на спеціальних установках знайшла широке застосування у виробництві лопаток компресора з титанових сплавів. Позитивний вплив на ефективність віброабразивної обробки застосовується разом з абразивом хімічно активних рідин.

Ультразвукова обробка кульками дозволяє формувати сприятливе поєднання характеристик поверхневого шару лопаток компресора, що мають малу жорсткість, високу точність виготовлення, складну конфігурацію і тонкі кромки.

Пневмодробеструйна обробка (ПДО) характерна ковзним зіткненням кульок з поверхнею пера лопатки, не допускаючи їх перенаклепу. Встановлено, що ПДО супроводжується зменшенням структурної неоднорідності і надає структурі, розподілу фаз і залишковим стискаючих напруг більш однорідний характер поверхневому шарі пера лопатки. Пропонований пневмодробеструйний метод оздоблювально-зміцнювальної обробки ефективно нейтралізує технологічні мікродефекти поверхневого шару, утворені на попередніх стадіях технологічного процесу, супроводжується значним збільшенням межі витривалості, зниженням розсіювання довговічності і не вимагає подальшого доведення тонких кромки.

Одним із перспективних методів обробно-зміцнювальної обробки є метод магнітно-абразивного полірування (МАП). Відмінна риса МАП полягає у можливості обробляти деталі з різною конфігурацією та поєднувати в одному процесі оздоблювальні та зміцнюючі операції.

Проблема ерозії лопаток газотурбінних двигунів є загальновизнаною. Інтенсивність та вид ерозії лопаток компресора залежать не тільки від умов зіткнення частинок з поверхнею пера, а й від поєднання характеристик поверхневого шару [12,14,15].

Для захисту робочих поверхонь деталей гарячого тракту від впливу високотемпературного газового потоку і високотемпературної газової корозії поверхні, що виникає в результаті, з подальшим розвитком процесів міжкристалічної корозії приймаються вітчизняними і зарубіжними виробниками наступні способи (таблиця 1.3):

Таблиця 1.3 - Деталі проточної частини ВМД, види їх зносу та методи захисту від впливу високих температур

№ п/п	Найменування деталі гарячого тракту	Робочі температури	Основні види захисту від впливу високих температур,
1	Лопатки ротора турбіни 1 та 2 ступенів, секції соплових апаратів.	Понад 1373 К	1.електронно-променево осадження. 2.метод плазмового напилення у вакуумі 3. Метод мікрохвильової плазми серед O ₂ . 4. газотермічний плазмовий метод.
2	Жарові труби камер згорання кільцевого типу, великогабаритні деталі проточної частини.	Понад 1473 К	1 конструкційні методи охолодження. 2 газотермічне плазмове напилення у поєднанні з вакуумною термообробкою.
3	Жарові труби камер згорання трубчастого типу	Понад 1473 К	3 Конструкційні методи охолодження.

на лопатках газової турбіни –широко використовується нанесення захисних покриттів різними методами, в основному методами електронно- променевого осадження, методом плазмового напилення у вакуумі, методом повітряно-плазмового напилення;

на камерах згорання- частіше за інших згадується використання конструкційних методів захисту з використанням різних систем охолодження, оскільки нанесення теплозахисних покриттів різними методами пов'язане з рядом труднощів, що викликаються, великими

габаритами деталей, розташуванням робочих поверхонь з внутрішньої сторони деталі та їх складністю їх форм;

на жарових трубах- В основному використовуються конструкційні методи охолодження робочих поверхонь, пов'язані з утворенням спеціальних отворів, проток, щілин та каналів для проходження охолоджуючого повітря. Для нанесення теплозахисних покриттів практично не використовуються методи електронно-променевого осадження та метод плазмового напилення у вакуумі, з наступних причин: конструкційні особливості жарової труби такі, що робоча поверхня, на яку необхідно нанести ТЗП (внутрішня) не має прямого доступу для парового, або плазмового потоку. Крім того, як буде показано нижче, методом вакуумного іонно-плазмового напилення неможливо отримати покриттів з оксидів внаслідок їх непровідності.

Матеріали, що свідчать про застосування повітряних плазмових технологій нанесення теплозахисних покриттів на жарові труби і патрубки, відтворюють. Ця обставина пояснюється тим, що нанесення теплозахисних покриттів на внутрішні робочі поверхні жарових труб пов'язано з низкою труднощів, основні з яких полягають у наступному:

- зменшення дистанції напилення та утруднене тепловідведення внаслідок конструктивних особливостей деталі може призвести до перегріву, пропалювання та оплавлення її поверхні та недоступної зміни структури матеріалу деталі. Обмеження дистанції напилення може призвести до проблеми неповного проплавлення частинок порошку матеріалу, що напилюється, внаслідок чого покриття виходить з низькими фізико-механічними властивостями;

- для нанесення теплозахисного газотермічного повітряно-плазмового покриття на внутрішню поверхню жарових труб необхідно забезпечити напилення малогабаритного джерела плазми, що має при малій довжині дуги достатню потужність для проплавлення тугоплавких оксидів;

- поверхня жарових труб має діаметр, що постійно змінюється, у зв'язку з чим дуже важко забезпечити рівномірну товщину покриття по всій

внутрішній поверхні. для забезпечення рівномірності товщини шарів, що наносяться і підтримки потрібного рівня теплонапруженості системи при напиленні необхідно мати автоматизовану систему управління режимами переміщення плазмотрона і обертання деталі;

- Необхідно розробити спеціальні технологічні прийоми та способи для забезпечення формування якісного покриття у зазначених складних умовах. Одним із прийомів нанесення покриттів на внутрішній поверхні є застосування похилого плазмового струменя, проте в літературі відсутні дані про результати впливу кута нахилу плазмового струменя до поверхні, що напливається на структуру і властивості теплозахисних плазмових покриттів.

Для підвищення зносостійкості лопаток все ширше застосування отримали різні види комплексних технологій - нанесення покриттів у поєднанні з різними оздоблювальними методами.

Розробка та впровадження у серійне виробництво двигунів в даний час супроводжується прогресивними конструкторсько-технологічними рішеннями, що виражаються у появі нових деталей, застосуванням принципово нових конструкційних матеріалів, а також удосконаленням технологій виробництва, збирання та випробування. Широко використовуються прогресивні технологічні процеси механічної обробки, що ґрунтуються на концепції високошвидкісного різання, удосконалюються методи оздоблювально-зміцнювальної та термічної обробки.

Тісний взаємозв'язок між конструкцією та технологією виробництва двигунів визначив низку актуальних на сьогоднішній день питань, пов'язаних з підвищенням несучої здатності складно-профільних деталей технологічними методами.

Відомо багато видів захисних покриттів лопаток компресора: гальванічне, лакофарбове, емальовання, конденсаційно-вакуумне.

Гальванічне покриття типу нікель-кадмієве використовується на лопатках компресора для захисту від корозії, але ерозійна стійкість та температура експлуатації (до 300°C) у нього дуже низька. При чому, під час

процесу зняття та нанесення покриття необхідно враховувати можливість наводження основного металу лопатки, що негативно позначається на її механічних властивостях.

Лакофарбове покриття на основі епоксидної емалі, нанесене в 5-7 шарів, також захищає лопатки від корозії, проте, як і нікель-кадмієве покриття, воно має низьку температуру експлуатації. Ерозійна стійкість внаслідок еластичності покриття трохи вища, ніж у нікель-кадмієвого, тому епоксидне покриття використовують на лопатках направляючого апарату компресора вертолітного двигуна.

Процес емалювання являє собою нанесення суспензії на основі глини та нікелевого порошку з наступним відпалом при температурі 1000°C. Емалювання лопаток вважається вигідним, якщо лопатки необхідно захистити від високотемпературної корозії. У цьому випадку температура експлуатації підвищується до 400°C. Однак така лопатка ще більшою мірою схильна до ерозійних пошкоджень, оскільки емальована поверхня схильна до крихкості у вищеописаних умовах експлуатації.

Одне з перспективних покриттів – конденсаційно-вакуумне покриття. Відомо, що покриття з нітриду титану має не тільки гарну корозійну стійкість (1 бал за п'ятибальною шкалою), але й підвищену стійкість до ерозії (0,019 – 0,028 г/хв). Температура експлуатації покриття з нітриду титану досягає 350°C. Таке покриття, що має товщину в кілька мікрон (від 2-3 мкм) дозволяє двигуну відпрацювати по 2-3 міжремонтні ресурси (тобто 1500-2100 годин). Однак, і при таких напрацюваннях йде суттєве зношування лопаток.

Необхідно відзначити також, що рівень змінної напруги в титанових лопатках нижче, ніж у сталевих. Широке використання титану в двигунах обмежене, також його особливістю спалахувати при високих температурах, що ставить обмеження за максимальними робочими температурами [9,11,13,15].

Враховуючи вищевикладене та передбачуване використання титанових сплавів за умов впливу високих температур, на наш погляд, проблему захисту титанових сплавів можна вирішити шляхом створення комплексних багатокомпонентних та багатошарових покриттів.

При розробці та виборі захисних покриттів потрібно виходити насамперед із призначення покриттів та конкретних умов роботи. Однак покриття повинні задовольняти певним загальним вимогам:

- 1) здатністю формуватися у вигляді тонких рівномірних шарів;
- 2) міцним зчепленням з основою, що зберігається в умовах тривалої експлуатації, зокрема при механічних та теплових ударах;
- 3) збереженням властивостей протягом тривалого часу при високих температурах у контакті з основою;
- 4) повною непроникністю для агресивних середовищ.

В даний час у нас [25-30] і за кордоном [31-36] розробляються для титанових сплавів високотемпературні покриття наступних типів: дифузійні, одержувані у вакуумі та в газовому середовищі, плазмові з газової фази, одержувані розкладанням галогенідів тугоплавких металів, одержувані конденсацією металів у вакуумі, нанесенням різних обмазок із подальшою термообробкою.

Наприклад, в даний час досліджено умови нанесення покриттів з карбідів титану, цирконію, ніобію та кремнію, боридів титану, цирконію, нітриду алюмінію, карбонітриду бору та диссилициду молібдену [1-59].

Існуючі сплави на основі титану багато в чому задовольняють широкому спектру вимог до сучасних конструкційних матеріалів. Велика різноманітність титанових сплавів обумовлена, насамперед, необхідністю відповідності матеріалу конкретним умовам експлуатації.

Згідно з даними [17-21], основна класифікація титанових сплавів здійснюється за структурним принципом, відповідно до якого вони поділяються на три основні типи α , $(\alpha+\beta)$, β - Сплави.

До α -сплавів відносяться сплави з кількістю α -твердого розчину до 95%. До даних сплавів належить і технічний титан [21, 22]. Для підвищення механічних і службових характеристик до складу цих сплавів вводять легуючі елементи, що підвищують температуру поліморфного перетворення розширюючи область існування α -твердого розчину (α -фази) та звані α -стабілізаторами (алюміній, азот, кисень, олово, індій та галій), а також елементи, що не впливають істотно на точку поліморфного перетворення - нейтральні зміцнювачі (цирконій, гафній та торій). Основою α -сплавів є α -фаза з ГПУ решіткою, що дає можливість отримати жароміцність на 20...50% і модуль пружності на 10...20% більше, порівняно зі сплавами на основі β -фази [21, 22, 30]. Сплави даного класу термічно стабільні, не вимагають додаткової термічної обробки після зварювання, для них характерна висока опірність газової корозії при незначному вмісті легованих елементів [9, 10, 22, 23].

В той же час α -сплави мають деформованість в холодному стані нижче, ніж у β -сплавів і технічного титану, що вимагає проведення деформації при температурах не нижче 600 ... 800° С [21, 22, 24]. Інша негативна сторона даних сплавів – відсутність можливості додаткового зміцнення за рахунок термічної обробки [17, 22]. Згідно з даними [16-19, 22], додаткове підвищення міцності α -сплавів досягають введенням невеликої кількості β -стабілізаторів (молібден, марганець, ванадій, хром та ін). Сплави із вмістом β -фази в кількості, що не перевищує 7%, називаються псевдо- α -сплавами і мають усі переваги α -сплавів, а наявність другої, більш пластичної β - фази навіть у малих кількостях, що дозволяє підвищити межу міцності на 20%, при високому рівні пластичності. Крім того, введення β -стабілізуючих елементів дозволяє знизити температуру деформації низьколегованих титанових сплавів до 400 ... 500°С [19, 20]. Як показано у роботі Б.Б. Чечуліна [22], підвищення пластичності псевдо- α - сплавів, пов'язане зі зміною розмірів структурних складових. У той же час зміна в невеликих кількостях концентрації таких β -

стабілізаторів, як молібден, ванадій, ніобій та ін., згідно з даними Ю.С. Рускола [27], О.М. Шаповалової із співавторами [28, 31] та Н.Д. Томашова [29], дозволяє підвищити корозійну стійкість титанових α -Сплавів.

До β -сплавам відносяться високолеговані сплави, до складу яких входять легуючі елементи (молібден, ванадій, ніобій, залізо, марганець, хром), що знижують точку поліморфного перетворення та розширюють сферу існування β -фази [16, 18]. Ці сплави можна піддавати зміцнювальній термообробці, що дозволяє підвищити межу міцності до 1700 МПа [22, 30]. Представники цієї групи металів відносяться і до висококорозійностійких металів. Однак, незважаючи на перелічені переваги, застосування цих сплавів обмежене внаслідок високого вмісту дорогих легуючих елементів, складності виробництва, нестабільності структури, механічних та експлуатаційних властивостей, підвищеної питомої ваги.

Двофазні ($\alpha+\beta$) сплави мають у своєму складі α - і β -тверді у різному співвідношенні, залежно від вмісту α - і β - Стабілізаторів [17, 22, 30]. Як показано у роботах [16, 18, 19, 32], залежно від кількісного співвідношення фаз, можна отримати великий спектр властивостей титанових сплавів. Сплави цієї групи піддаються зміцнюючій термічній обробці і мають гарне поєднання міцності ($\sigma_{\text{в}}=900\text{...}1000\text{МПа}$) та пластичності ($\delta=10\text{...}15\%$).

Однак, як і β -сплави вони, термічно нестабільні (розпад β -фази), складні у виготовленні та вимагають суворого дотримання технологічного процесу термічної обробки. У той же час, за даними [27, 29], корозійна стійкість цих сплавів у кислотах нижче, ніж у α і β -сплавів в середньому на 40...50%. Виняток становлять спеціальні корозійностійкі титанові сплави із вмістом-корозійностійких елементів (Mo, Ta, Nb) понад 10%. Основна причина низької корозійної стійкості даної групи сплавів – гетерогенність структури та концентраційні мікронеоднорідності. Тому вони не застосовуються для роботи в агресивних середовищах, що не дає можливості їх широкого

використання в таких галузях промисловості, як хімічна, харчова, металургійна та ін.

Згідно з даними С.Г.Глазунова та В.М.Моїсеєва [20], а також Б.Б. Чечуліна із співавторами [22], стосовно титанових сплавів часто застосовується класифікація за рівнем міцності: маломіцні, середньоміцні, високоміцні сплави. До маломіцних відносяться сплави з межею міцності, що не перевищує 700 МПа. Ці сплави (BT1-00, BT1-0, OT4-0 та ін) допускають значну деформацію при обробці, навіть у холодному стані, внаслідок високої пластичності, що досягає $\delta = 20 \dots 25\%$ [22, 24, 30].

Таблиця 1.4 Хімічний склад титанових сплавів

Клас титанових сплавів	Марка сплаву	Склад металу, % мас.
Нелегований титан	BT1-00	Ti-0,05C-0,04N-0,1O ₂ -0,15Fe-0,08Si
	BT1-0	Ti-0,3Al-0,07C-0,04N-0,2O ₂ -0,25Fe-0,1Si
α - та псевдо α -сплави	BT-5	Ti-5Al
	BT5-1	Ti-5Al-2,5Sn(0,2Fe-0,05C-0,12O ₂ -0,05N)
	ВІД4	Ti-4Al-1,5Mn
	ВІД4-1	Ti-2Al-1,5Mn
	BT-20	Ti-6,5Al-1Mo-1V-2Zr-0,15Si
$\alpha+\beta$ - сплави	BT8	Ti-6,5Al-3,3Mo-0,3Si
	BT6	Ti-6Al-4V
	BT14	Ti-5Al-3Mo-1V
	BT25	Ti-6,7Al-1,5Sn-2Mo-1W-4Zr-0,15Si
	BT3-1	Ti-6Al-2,5Mo-1,5Cr-0,5Fe-0,3Si
Псевдо- β -сплави	BT22	Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe
	BT19	Ti-5,5Al-3,5V-5,5Cr-3Al-1Zr
	BT32	Ti-3Al-8Mo-1,5Cr-1,5Fe-8V

Слід зазначити, що поряд з легуванням, не менш важливим напрямом підвищення довговічності та надійності титанових сплавів як при кімнатних, так і при підвищених температурах є поверхневе зміцнення. Так було в роботах В.М. Федірка із співавторами [32, 33] показано, що азотування та оксидування промислових α і ($\alpha+\beta$) -титанових сплавів призводить до значного підвищення їх триботехнічних та механічних властивостей.

Тому виникає необхідність захисту титанових сплавів від невисоких антифрикційних показників, сольової корозії та при оброблюваності різанням, від якої значною мірою залежать усі фізико-хімічні та механічні характеристики титанових сплавів. Вирішення цієї проблеми присвячено безліч робіт, отримані вагомі результати, однак і зараз вона залишається актуальною.

1.4 Аналіз структури, властивостей та методів захисту поверхні титанових сплавів.

В даний час ведуться дуже широкі дослідження поверхневої обробки титану. Ці дослідження мають два основних напрямки:

1) поліпшення антифрикційних властивостей титану для розширення можливостей його застосування в вузлах, що труться.

2) полегшення процесу холодного волочіння та зменшення браку при виробництві дроту, тягнутих труб, прутків та іншого профілю для виключення задир, наволакування та подряпин [24,42,49]. Актуальність обох напрямків цілком очевидна, якщо зважити на схильність титану до задирання, його високий коефіцієнт тертя при ковзанні і неефективність звичайних мастил. Проте розробка методів поверхневої обробки титану, переважно, ще перебуває у стадії лабораторного чи дослідно-виробничого вивчення.

Титан за високих температур є активним елементом і легко реагує з багатьма речовинами, утворюючи тверді розчини та хімічні сполуки, які, як правило, мають більшу твердість. Тому зміцнення поверхні титану, поліпшення показників жаро- та зносостійкості титану та його сплавів, може бути здійснено різними шляхами. Одним з цікавих і важливих є створення на робочих поверхнях виробів захисних покриттів, зокрема методом нагрівання

його в різних твердих і рідких наповнювачах, а особливо в газових середовищах.

Велика кількість робіт присвячена дослідженню процесів азотування, цементації, нітроцементації та алітування титану. Показано можливість підвищення терміну служби дифузійно-зміцнених деталей у 2-4 рази. Є також відомості про поліпшення експлуатаційних характеристик титану при насиченні його поверхні міддю, берилій, кобальтом та хромом, а також комплексами елементів Al-Cr-Si, Cu-Al, Zn-Si-Cu.

Дифузійне зміцнення поверхні титану та його сплавів не знайшло широкого застосування. Це зумовлено технологічними труднощами (складність обладнання та технології проведення), часто економічною недоцільністю, а також порівняно невеликою кількістю відомостей про закономірності формування, будови та властивості одержуваних покриттів.

У зв'язку з цим розширення дифузійного зміцнення поверхні титану та її сплавів потрібно вирішення кількох питань. До першого слід віднести розробку дешевого та простого методу дифузійного зміцнення. Далі необхідно створення рекомендацій щодо вибору елементів або їх поєднань, що дають найбільший ефект підвищення тієї чи іншої службової властивості. І, нарешті, необхідно розробити основні параметри технології нанесення покриттів залежно від марки титанового сплаву та вибраних елементів для насичення.

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.

З аналізу літературних даних [33-37] 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).

1.5 Зміцнення титанових сплавів хіміко-термічними методами

У промисловості зараз для зміцнення виробів з титану та його сплавів широке застосування знайшли такі методи хіміко-термічної обробки: азотування, цементация, окислення та борування [22,33].

Азотування титану здійснюють найчастіше в азоті [34]. Для цього застосовується технічний азот, очищений від кисню та вологи.осушка азоту проводиться шляхом пропускання його через судини з силікагелем, алюмогелем та ін. Для очищення від кисню азот пропускають через піч, наповнену дегазованою титановою стружкою або губкою, нагрітими до 850-900°C.

Азотування здійснюється за 900-950°C протягом 8-12 годин. При цьому утворюється дифузійний шар кілька сотих міліметра. Мікротвердість досягає 9-12 ГПа. Зниження температури обробки до 850°C сприяє суттєвому уповільненню дифузії азоту в титан і тому для отримання зміцнених шарів у кілька сотих міліметрів потрібно збільшувати витримку до 24-32 годин. При цьому мікротвердість становить лише 7-8 ГПа.

При температурі 1000-1050°C процес азотування протікає значно швидше, а мікротвердість підвищується до 12-135 ГПа. Однак при цьому, навіть у разі короткочасного азотування, помітно підвищується міцність і особливо пластичність зразків, що обробляються, внаслідок зростання зерна і збільшенні глибини проникнення азоту в титан.

Саме тому поширення знаходить азотування за 930-950°C коли не так сильно змінюються міцність і пластичність і процес зміцнення протікає порівняно невеликий час.

Внаслідок підвищення поверхневої твердості після азотування зносостійкість виробів із титану та його сплавів підвищується.

Азотування в аміаку за певних умов протікає дещо швидше, ніж в азоті, але через поглинання титаном водню крихкість виробу при цьому значно вища порівняно з обробкою в азоті. Аналогічна закономірність спостерігається і щодо ударної в'язкості, тоді як твердість в обох випадках залишається приблизно рівною [35].

Останнім часом набуло поширення азотування в тліючому розряді (іонне азотування), яке проводять у розрядженій атмосфері азоту, при підключенні деталей, що обробляються, до негативного електрода – катода. Анодом є контейнер установки. Між анодом і катодом збуджується розряд, що тліє, і іони газу, бомбардуючи поверхню катода, нагрівають її до температури насичення. Іонне азотування дещо скорочує температуру та тривалість процесу [36].

Розчинність вуглецю в титані невисока, тому поверхнєве зміцнення титанових сплавів вуглецем (цементация) здійснюється шляхом створення

шару титану карбіду. Залежно від складу цементуючого середовища та температури процесу на титані утворюється шар із різною мікротвердістю (11-22 ГПа) [14].

Найбільшого поширення у промисловості набула цементация у твердому карбюризаторі. У цьому випадку застосовують суміш порошків вугілля та графіту, а обробку проводять при температурі 950°C протягом 4 годин. При цьому утворюється карбідний шар товщиною 20 мкм із мікротвердістю 12-13 ГПа. Міцні властивості титанових виробів, цементованих у твердому карбюризаторі, приблизно такі ж, як у титану, азотованого в азоті, а пластичність і особливо ударна в'язкість значно нижче.

Цементация титану в газовому карбюризаторі, зокрема в аргоні з додаванням окису вуглецю, пропану та метану (температура обробки 950°C, витримка 8 годин) призводить до утворення шару карбіду товщиною всього лише 5-8 мкм. Крім того, дана обробка сприяє сильному водневому крихтенню сплаву, так як в газовому середовищі є водень.

Окислення титану здійснюють повітря при температурах 725-825°C та витримках, що зменшуються з 5 до 1 години з підвищенням температури [62]. Зміцнені шари, що утворюються після обробки за такими режимами, мають товщину 10-50 мкм. Мікротвердість у своїй досягає 6-7 ГПа. Збільшенням температури обробки можна досягти підвищення товщини зміцненого шару, але при цьому на поверхні зразків утворюється зона тендітних оксидів титану, яка при охолодженні сколюється.

Низька мікротвердість зміцненого шару, одержуваного на титані при окисленні, не призводить до суттєвого підвищення зносостійкості титанових виробів.

Залежно від агрегатного стану насичувального середовища при боруванні виділяють три основні методи: в рідких, газових та твердих середовищах [68].

Рідинне борування поділяється на борування в розчині електrolітів та борування в металевих та сольових розчинах.

При боруванні рідкофазним електролізним способом основного розплаву, як правило, служить бура. Іноді до неї додають присадки, що знижують температуру плавлення, що підвищують рідину і сприяють інтенсифікації процесу насичення. В якості таких добавок використовують борний ангідрид, хлористий натрій та ін. При цьому методом катодом є зразок, що борується, а анодом - або графітові електроди, або сам металевий тигель, в якому знаходиться боруючий розплав.

Застосування даного методу зміцнення титанових сплавів призводить до утворення поверхні зразків шарів з високою твердістю (до 25 ГПа) і товщиною до 30 мкм. Однак при цьому відбувається сильне розчинення титану та поверхня зразків виходить нерівною, а борідний шар – нерівномірний за товщиною [29,30].

При боруванні в рідких середовищах без електролізу як основа розплаву також часто використовують буру. До неї додають невеликі кількості речовин, здатних служити відновниками і утворювати внаслідок різниці електродних потенціалів з металом, що насичується гальванічний елемент: метал-електроліт-відновник. Відновником, що розкладає розплав оксидів з виділенням насичувального елемента в атомарному стані, може бути будь-яка електропровідна речовина, електродний потенціал якої в даному електроліті негативніший за потенціал насичуваного металу, а ступінь поляризованості досить мала [31].

Борування газофазним способом здійснюють осадженням бору на поверхні нагрітого виробу реакції відновлення зазвичай галоїдних сполук бору (BCl_3 , BBr_3 та ін) воднем з подальшою дифузією бору в метал та утворенням покриття [32].

Широке поширення в промисловості набуло твердофазного борування. Цей спосіб зміцнення титанових сплавів здійснюють як у вакуумі, так і при нормальному атмосферному тиску. При цьому у разі безвакуумної обробки можуть використовуватися контейнери як відкритого типу з продуванням інертним газом (наприклад, аргоном), так і закритого типу з затвором

плавким. Як джерело дифундують атомів бору застосовують аморфний бор, карбід бору, феробор та ін [33].

У разі вакуумного твердофазного борування насичення проводять при залишковому тиску $5 \times 10^{-3} - 1 \times 10^{-3}$ мм рт.ст. Засипкою служить аморфний бор із вмістом основного елемента 99%. Температура обробки складає 1100-1300°C, Тривалість 1-5 годин. Після обробки на поверхні титанових зразків утворюються щільні дифузійні покриття, настільки міцно пов'язані з основою, що не відколюються навіть при помітній деформації поверхні виробу, що зміцнюється. Отримані покриття мають твердість 24 ГПа та високу зносостійкість. До недоліків даного способу борування слід віднести крихтування сплаву титану внаслідок зростання зерна, що виникає через високу температуру обробки [34].

Безвакуумне борування здійснюють у порошковій суміші, що включає порошки бору, окису алюмінію та KB_4F_4 . Насичення титану здійснюють в атмосфері аргону при 1000°C протягом 20 годин. У результаті титанових зразках утворюється боридний шар з мікротвердістю до 17 ДПа і товщиною до 50 мкм [35, 36].

Застосування як засипка 84% B_4C та 16% бури та обробка при 1100-1400°C протягом 8 годин дозволяє отримувати на титані боридні покриття з твердістю до 30 ГПа і товщиною до 100 мкм [38]. Однак велика температура обробки призводить до крихкості титанових зразків.

Змінити властивості поверхневих шарів титану дозволяє насичення їх паралельно з бором інших елементів. У роботі [377] вивчено властивості бороалітованих шарів на титанових сплавах. Спільне насичення бором та алюмінієм проведено у порошковій суміші, що містить 25% алюмінію, 25% ангідриду бору та 50% окису алюмінію (температура обробки 950°C). Активний бір одержують внаслідок алюмотермічного відновлення ангідриду бору. У структурі шару лежить на поверхні присутній борид титану. Мікротвердість цієї зони становить 20-23 ГПа, а товщина 15-20 мкм. Основна

частина шару протяжністю 80-120 мкм має твердість 3-5 ГПа і являє собою твердий розчин алюмінію та бору α -титан з включенням алюмінію титану.

Авторами роботи [38,39] запропоновано спосіб бороалітування титанових сплавів з пасти, що містить порошок аморфного бору та алюмінію, пов'язаних силікатним клеєм. Обробка зразків проводиться у герметичних контейнерах. Утворений дифузійний шар характеризується високою твердістю поверхневої зони (10-12 ГПа). У ній присутній борид титану та тверді розчини на основі α і β -титану. Підвищення температури процесу від 950 до 1050°C призводить до зростання товщини шарів та твердості поверхневої зони. Зі зростанням вмісту алюмінію в пасті товщина шару збільшується, а твердість його знижується.

У роботі [40] визначалася можливість одержання борідних покриттів на титанових сплавах після гальванічного нікелювання з наступним високотемпературним боруванням. Борування здійснювали в контейнері з плавким затвором порошкової боровмісною суміші, що включає карбід бору, окис алюмінію і галогенід. Температура обробки складає 900°C, а час витримки – 0,5 години. В результаті на титанових сплавах формується зміцнений шар із мікротвердістю 11-11,5 ГПа.

Випробувано осадження на титан бору та карбиду бору з парової фази із застосуванням індукційного нагріву [81, 82]. Однак через високу температуру процесу (понад 1300°C) титан сильно охрущується.

Аналіз вищерозглянутих методів ХТО титану показує, що з цих методів є як загальні, і різні властивості.

До загальних слід віднести більшу тривалість процесів обробки. Ця обставина викликана обмеженою дифузією елементів, що насичуються в титані при температурах обробки і неможливістю отримання твердих покриттів на титані при низьких температурах (при боруванні і цементації).

Спільним є також сприяння зниженню пластичності титанових виробів. Природа зниження пластичності кожного методу ХТО різні. Так при азотуванні в азоті, цементації в твердому карбюризаторі та боруванні

зниження пластичності відбувається внаслідок високої температури обробки (через зростання зерна). У разі азотування в аміаку та при цементації в газовому карбюризаторі охрупчення настає внаслідок проникнення вглиб титану водню (водневе охрупчування). При окисленні втрата пластичності настає через проникнення в підкладку велику глибину кисню.

Як відмінні риси слід відзначити відмінність у твердості зміцнених шарів. Найбільшу твердість мають покриття, отримані при боруванні та цементації, а найменшою – при азотуванні та окисленні.

Відомо, що зносостійкість покриттів визначається не лише твердістю, а комплексом механічних властивостей зміцнених шарів і, найменшою мірою, умовами тертя. Тому для покриттів, отриманих розглянутими способами ХТО, є сфери застосування, де вони виявляють найкращі експлуатаційні якості.

Слід зазначити, що з розглянутих способів зміцнення титану в промисловості широкого поширення набуло борування як метод, що дозволяє отримувати покриття з широкою сферою застосування. Ці покриття добре зарекомендували себе при експлуатації як в умовах тертя без мастила, так і зі змащуванням, при абразивному зношуванні, мають високу окалиностійкість і корозійностійкість [38].

Борідні покриття мають і ряд недоліків, до яких можна віднести відносно високу крихкість. Крім того, сам процес борування здійснюють при досить високих температурах і занадто тривалий час, що призводить до зростання зерна в титанових зразках, що обробляються.

Останнім часом розглядаються альтернативні способи борування титанових сплавів, що дозволяють скоротити час обробки і якнайменше «зіпсувати» початкові фізико-механічні властивості титанових виробів.

Один з таких методів є борування в умовах саморозповсюджувального високотемпературного синтезу, зокрема, в режимі теплового самоzapалювання.

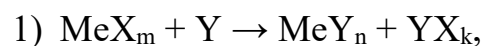
1.6 Саморозповсюджувальний високотемпературний синтез і його застосування для отримання покриттів на титанових сплавах

У загальному випадку покриття, одержувані в умовах СВС, складаються з плівки продукту, що наноситься (як результат газофазного осадження) і дифузійної (градієнтної зони). Вони характеризуються рівномірністю за товщиною та високою міцністю зчеплення з підкладкою. Завдяки введенню до складу реакційної суміші баластної добавки, що перешкоджають припіканню шихти, на поверхні покриття не утворюється шлам.

СВС є одним із найбільш високотемпературних процесів горіння ($t_r = 800-4000^\circ\text{C}$). Залежно від агрегатного стану елементів здійснюється три типи СВС-процесів:

- 1) Горіння сумішей порошків x і y у вакуумі або інертному газовому середовищі (наприклад, отримання карбідів, боридів, силіцидів);
- 2) Горіння порошків x в газоподібному окислювачі (наприклад, отримання нітридів при горінні металів в газоподібному азоті);
- 3) Горіння порошків x в рідкому окислювачі (наприклад, отримання нітридів при горінні металів в рідкому азоті) [85];

На основі СВС розвиваються зараз різні комбіновані процеси. Один з них є поєднанням СВС і металотермії. Можливі дві схеми процесу:



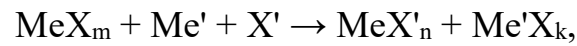
де MeX_m - з'єднання, що відновлюється;

Y – елемент відновник та окислювач;

MeY_n - цільовий продукт;

YX_k – побічний продукт.

Приклад: $\text{WO}_3 + 3\text{B} = \text{WB} + \text{B}_2\text{O}_3$



де MeX_m - з'єднання, що відновлюється;

Me' - елемент відновник;

X' - елемент окислювач;

MeX'_n – цільовий продукт;

$\text{Me}'\text{X}_k$ – побічний продукт.

Приклад: $\text{MoO}_3 + 2\text{Al} + 2\text{Si} = \text{MoSi}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$.

Сутність цього комбінованого процесу полягає в тому, що метал, що є одним із реагентів у СВС-процесі, утворюється в результаті металотермічної реакції, яка передує СВС-процесу. Елементи-відновники та окислювачі можуть бути як однаковими (варіант 1), так і різними (варіант 2).

В даний час реалізовані два способи нанесення покриття у режимі горіння: реакторний та відкритий. Кожен з них має свої переваги та сфери застосування .

У реакторному способі деталі укладаються в реактор, засипаються шихтою і підпалюється шихта. Після проходження фронту горіння та охолодження реактора покриті деталі виймаються. Реактор зазвичай являє собою вертикальну циліндричну трубу з отвором внизу для подачі інертного газу. Інертне середовище необхідне для запобігання окисленню нанесеного покриття [38-40].

У відкритому способі реактор не потрібен і може бути реалізований навіть у польових умовах. Існують такі системи, які можуть бути використані на повітрі без продування інертним середовищем. До них, насамперед, належать алюмо- та магнітотермічні системи .

Процес нанесення покриттів можна проводити у режимі горіння, а й у режимі самоzapalювання (теплового вибуху) [31]. Цей процес реалізується в реакторах, що продуваються інертним газом, нагріванням їх зовнішнім джерелом до температури самоzapalювання T_v . При досягненні цієї температури порошкова суміш саморозігрівається далі до необхідної

температури, відбувається прогрів деталей і нанесення покриття. Зазвичай температури samozапалювання всім сумішей укладаються в діапазон 300-700°C; максимальна температура деталей при цьому не перевищує 1100 °C.

Описаний вище газотранспортний СВС спосіб отримання покриттів на титанові деталі реалізується в режимі горіння.

Технологія отримання хромборидних покриттів базується на проведенні процесу в режимі теплового samozапалювання сумішей на основі оксиду хрому, оксиду бору та алюмінію.

Технологія отримання титанових покриттів заснована на використанні хімічної транспортної реакції в системі Ti-J₂:



Відповідно до цієї реакції, в області від 400 до 550°C утворюється нижчий іодид титану TiJ₂ у твердому стані, який при подальшому підвищенні температури сублімує в газову фазу, переноситься до поверхні, що покривається і диспропорціонує з виділенням активного атомарного титану і газоподібного вищого тетраіодиду TiJ₄.

Процес нанесення титанових покриттів організується в такий спосіб. Трубчастий вертикальний реактор заповнюється порошком титану і знизу продувається сумішшю аргону з йодом при зовнішньому нагріванні до заданої температури, при якій він витримується певний час.

Було проведено дослідження залежності товщини титанового покриття від температури нагрівання (500-800°C), часу, концентрації йоду та витрати газу та визначено оптимальні умови проведення процесу.

Залежно від витрати газу здійснювався або режим фільтрації газу через шар порошку (невеликі витрати), або режим псевдозрідження (шару, що кипить) при великих витратах. Залежність товщини покриття від часу показує, що в межах режиму фільтрації товщина покриття слабо зростає зі збільшенням витрати газу. При переході до псевдозрідження товщина

покриття різко зростає. Але за дуже великих витрат газу спостерігається падіння товщини.

Вплив концентрації йоду при подачі його у суміші з аргоном має максимум для всіх випадків при 2-3% мас.

Оптимальний режим для отримання покриттів товщиний більше 10 мкм відповідає режиму псевдозрідження з активованим порошком бору при нагріванні до температури 750°C.

Розроблено також технологію нанесення газотранспортних СВС-покриттів на основі нітриду титану в проточному порошковому реакторі при зовнішньому нагріванні. Процес у системі $Ti-N_2-TiN-J_2$ може проводитись як у режимі самозапалювання, так і в режимі фільтраційного горіння.

Порошкова суміш складу – титан, нітрид титану, кристалічний йод – продувається знизу азотом. У порошкову суміш занурюються деталі нанесення покриттів. При включенні зовнішнього нагріву відбувається випаровування йоду та взаємодія його з титаном: в області температури до 550°C – утворення летючого TiI_2 , перенесення його до поверхні деталей, осадження та надалі диспропорціонування з виділенням Ti та газоподібного TiI_4 . При подальшому нагріванні до температури займання T_b у системі починається інтенсивне тепловиділення внаслідок екзотермічної взаємодії титану з азотом, що супроводжується стрибком температури, тобто. відбувається самозапалювання чи тепловий вибух. Розмір стрибка, тобто. максимальна температура T_{max} визначається теплоємністю суміші, а також умовами тепловідведення. Після досягнення максимального значення температура в реакторі падає та охолодження проводиться в струмі азоту при відключеному нагріванні.

Цей режим протікання процесу – режим теплового самозапалювання при зовнішньому нагріванні. Його основні характеристики: температура займання T_b і максимальна температура T_{max} визначаються складом суміші, темпом нагрівання та умовами тепловідведення. При збільшенні вмісту титану суміші від 10 до 30% мас. збільшується і величина T_{max} від 980 до

1200°C. Оптимальним є вміст титану 10% травня, коли реалізується режим виродженого теплового вибуху і досягається $T_{\text{макс}} = 980 \text{ } ^\circ \text{C}$. Аналогічний вплив на теплову картину процесу має і кількість транспортного агента - йоду - у суміші від 1 до 15% мас щодо титану [35].

Процес може бути реалізований і в режимі горіння фільтрації. Спосіб його проведення полягає в тому, що початковий прогрів проводиться у струмі інертного газу – аргону. Потім за певної температури включається азот. Температура включення азоту повинна бути не нижче значення T_v при даному темпі нагрівання для режиму займання (оптимально включення азоту при $870 \text{ } ^\circ \text{C}$). При подачі азоту екзотермічна взаємодія титану з азотом починається знизу. Створюється фронт реакції, який повільно рухається реактором зі швидкістю, що визначається подачею азоту і поглинанням його порошком титану. Максимальна температура, що досягається у фронті, суттєво залежить від вмісту йоду. При вмісті йоду 5% мас. відбувається перехід від виродженого режиму горіння до нормального.

Основне застосування даної технології нанесення покриттів на основі нітриду титану полягає у підвищенні ріжучих властивостей твёрдосплавних і керамічних ріжучих пластин, котрі допускають нагрівання до температури не вище $1150 \text{ } ^\circ \text{C}$, що і визначає верхню межу температури для даного процесу (оптимально - не вище $1070 \text{ } ^\circ \text{C}$).

Насамкінець зазначимо, що швидкості утворення газотранспортних СВС-покриттів досить великі. Вони знаходяться на рівні хімічного осадження з газової фази і значно вищі за швидкість дифузійного та гальванічного способів (таблиця 1.5). У цьому немає нічого дивного, оскільки, незважаючи на наявність порошкової суміші, суть процесу – у хімічному осадженні з газової фази.

Ще сильніша перевага газотранспортної СВС-технології проявляється, якщо порівняти її технологічні показники з показниками дифузійного насичення (таблиця 1.6).

Таблиця 1.5 Зіставлення способів нанесення покриттів

№ п/п	Спосіб нанесення покриття	Середовище насичення	Температура, °С	Швидкість зростання покриття, мкм/хв.
1	Гальванічний	Іонний розчин	25-250	0,1-3
2	Фізичне осадження	Пара матеріалу у вакуумі	Випарник 25-2000	0,5-4
3	Дифузійне насичення	Порошкова	800-1500	0,02-0,2
4	Хімічне осадження газової фази з	Газ (галогеніди, карбоніли і т.п.)	150-2000 (підкладка)	10 ⁻³ -20
5	Газотранспортна СВС-технологія	Порошкова, що реагує	600-1600 (деталь)	0,1-30

Таблиця 1.6 Зіставлення способів нанесення покриттів [106]

№ п/п	Характеристики	ДН	СВС
1	Тривалість технологічного циклу, година	2-20	1,5-2
2	Вартість основного обладнання, відн. од.	1	0,3
3	Виробничі площі, зайняті обладнанням, відн. од.	1	0,2
4	Витрати електроенергії, відн. од.	20-25	1
5	Використання зворотного продукту у подальшому синтезі, %	80	80
6	Утилізація відходів	Ні	Так

Нанесення покриттів в умовах СВС можна проводити різними способами: у режимі горіння та у режимі теплового samozapalювання.

У режимі горіння в даний час реалізовано два способи нанесення покриттів.

У реакторному способі вироби укладаються в реактор і засипаються сумішшю, яку ініціюють локальним джерелом тепла. Після проходження фронту горіння та охолодження суміші покриті вироби витягуються з реактора. Реактор зазвичай являє собою вертикальну циліндричну трубу з

отвором для подачі інертного газу. Інертне середовище необхідне для запобігання окисленню нанесеного покриття.

У відкритому способі реактор не потрібен і може бути реалізований навіть у польових умовах. Існують такі вихідні порошкові системи, горіння яких не вимагає інертної атмосфери, і вони можуть бути використані на повітрі без продування інертним середовищем. До них насамперед належать алюмо- та магнієтермічні системи.

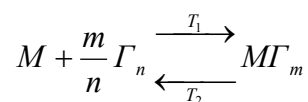
Покриття, нанесені на метали в режимі горіння, мають суттєві недоліки - низька адгезія з підкладкою та нерівномірність зміцненого шару на висоті.

Режим теплового самоzapалювання дозволяє усунути недоліки, властиві режиму горіння. Крім того, при проведенні цього процесу є широка можливість регулювання температурою обробки, що є дуже важливим при зміцненні металів.

1.7 Отримання покриттів у режимі теплового самоzapалювання

Основна ідея нанесення покриттів у порошкових екзотермічних сумішах полягає у поєднанні хімічних транспортних реакцій з такими процесами, як горіння та займання .

Як відомо, використання хімічних транспортних реакцій ґрунтується на реалізації оборотної реакції типу [35]



де М - наносний елемент, Г – галогенід, $M\Gamma_m$ - Летучий галогенід елемента. Для перенесення та осадження елемента М необхідний зсув рівноваги зазначеної реакції у відповідний бік. При цьому елемент та виріб повинні знаходитись при різних температурах.

Схема нанесення покриттів як горіння показано на рис.1.2. За рахунок основної твердофазної реакції (СВС-процес) між елементами А і В поширюється фронт горіння по порошковій суміші. При цьому в зоні прогріву можуть протікати реакції типу:



При низьких температурах утворюються газоподібні сполуки, за високих – розпадаються. Газоподібні з'єднання спочатку осідають на поверхні виробу, а утворення покриття A_xB_y відбувається при високих температурах. При цьому довжина дифузійної колії летючого галогеніду порядку ширини зони прогріву, яка зазвичай не перевищує часткою міліметра. Звідси малі часи транспорту та досить великі швидкості осадження. Більше того, змінюючи газотранспортний носій, або застосовуючи одночасно їх комбінацію, можна досягти відповідної послідовності осадження та необхідного хімічного складу покриттів.

Процес нанесення покриттів у режимі теплового займання реалізується в реакторах, що продуваються інертним газом та нагріванням до температури займання зовнішнім джерелом. При досягненні температури займання суміш саморозігрівається до максимальної температури, відбувається прогрівання виробів та нанесення покриття. Зазвичай температури займання більшості сумішей укладаються в діапазон $300-700^\circ \text{C}$, а максимальна температура вбирається у $1000-1300^\circ \text{C}$.

Товщина покриттів в залежності від складу насичувального середовища та технологічних параметрів обробки досягає 10-150 мкм.

Автори роботи [36] наносили хромові покриття різні сталі в режимі теплового самоzapалювання. Зазначається, що в залежності від температурно-часових параметрів процесу і складу металу, що зміцнюється,

формується покриття з різним фазовим складом і, як наслідок, різної твердості (6-17 ГПа).

Поряд із хромуванням автори здійснювали нанесення на сталі борідних покриттів [37]. Зміцнені шари, що виходять, характеризуються високою твердістю (до 20 ГПа) і мають досить велику товщину (до 100 мкм).

У процесах, що призводять до горіння або займання, можуть використовуватися не тільки тверді компоненти. Один із реагуючих компонентів може бути газоподібним. Прикладом покриттів, що використовують такий тип реакцій, можуть бути покриття з нітриду титану [102]. Основою даного способу є суттєво нестаціонарний процес займання порошкової суміші, що містить титан, нітрид титану (розріджувач) та деяку кількість йоду. Шихта з виробами, що покриваються, завантажується в реактор і продувається аргоном. У процесі зовнішнього нагрівання носій випаровується у газову фазу, реагує з титаном. За певної температури за рахунок диспропорціонування відбувається осадження титану на виріб. Потім реактор подається газоподібний азот, який викликає саморозігрів суміші і виробів, в результаті чого утворюється нітридне покриття.

У літературі відсутні дані отримання захисних покриттів на титані та її сплавах за умов СВС.

Процес нанесення покриттів, що використовує явища порошкових екзотермічних складів, не може бути зрозумілий до кінця без вивчення картини зміни температурного поля в реакторі в кожний момент часу технологічного циклу.

Найбільш повно роль теплових факторів при протіканні екзотермічних реакцій досліджено в теорії горіння, розвиненою у роботах радянських вчених [39-40].

Зміна у часі температурного поля обумовлена як нестаціонарністю теплообміну із зовнішнім джерелом нагріву, так і власним тепловиділенням хімічного процесу.

Як правило, реакцію екзотермічної взаємодії ініціюють поверхневим нагріванням речовини. У цьому випадку залежно від співвідношення між часом теплової релаксації системи t_{xp} можливі два граничні режими протікання процесу.

У разі якщо $t_{TP} \ll t_{XF}$ тепло, що підводиться з навколишнього середовища, встигає розподілитися по всьому об'єму системи і екзотермічна реакція ініціюється практично одночасно у всіх точках системи. Подібний режим називають режимом самозапалювання чи тепловим вибухом.

1.8 Узагальнення результатів літературного аналізу

Враховуючи вищевикладене та передбачуване використання титанових сплавів в умовах впливу високих температур, на наш погляд, проблему захисту титанових сплавів можна вирішити шляхом створення комплексних багатокомпонентних та багат шарових покриттів на основі алюмінію та бору. Однак всі відомі методи нанесення захисних покриттів (порошковий, з паст, рідких та газових середовищах) є енергоємними і характеризуються великою тривалістю процесу. У цьому актуальною є розробка нових технологій, які забезпечують отримання покриттів необхідних експлуатаційних характеристик за мінімального часу формування. Такими технологіями можуть служити способи отримання покриттів на основі самрозповсюджувального високотемпературного синтезу.

Отримання практично будь-якого складу покриття, висока стабільність властивостей, простота технології та технологічного обладнання, низька собівартість покриттів за рахунок дешевої сировини та малих енергетичних витрат на проведення СВС-процесу практично повна безвідходність привертають до цього способу все більшу увагу. На особливу увагу заслуговує отримання покриттів в режимі горіння СВС-систем, що дозволяють значно знизити час проведення процесу.

Як видно з проведеного аналізу, основи СВС-процесу, що застосовуються у металургійній практиці, вже створено. Однак теорія цих процесів, методи управління ними та шляхи широкого регулювання складів та властивостей їх продуктів вивчені зовсім недостатньо. Слабо досліджено питання кінетики та рівноваги в СВС-системах, а також умови, що підвищують рівень відновлення кисневих та інших сполук до металу.

До найважливіших проблем вивчення СВС-реакцій ставляться дослідження залежності швидкості цих реакцій від визначальних її чинників, віднайдення способів надійного її регулювання, і навіть шляхом радикальної інтенсифікації реакції взаємодії між металом і речовинами.

Необхідним засобом управління СВС-реакцій є, як відомо, регулювання крупності компонентів реакційної суміші, складу і щільності суміші, температури процесу та вміст суміші різного роду добавок, що прискорюють або стабілізують процес. Правильне використання кожного з цих засобів та обґрунтований вибір їх різних поєднань, природно, можливі лише за глибокого розуміння сутності їх дії. Однак механізм дії багатьох прискорювачів СВС-реакцій досі не з'ясований, не встановлено загальний критерій та єдина методика оцінки та зіставлення ефективної дії різних прискорювачів.

2 МАТЕРІАЛИ, ОБЛАДНАННЯ ТА МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

2.1. Матеріали та обладнання

Промислові титанові сплави містять велику кількість легуючих елементів. Залежно від величини коефіцієнта β -стабілізації титанові сплави прийнято розділяти на ряд груп: α -сплави (не містять β -стабілізаторів), псевдо- α -сплави (K_{β} -стаб = 0,3-0,9), двофазні сплави (K_{β} -стаб = 1,4-2,4) та β -сплави (K_{β} -стаб = 2,5). Виходячи з представленої класифікації титанових сплавів піддавали зміцненню зразки з технічно чистого титану ВТ1-0 (α -сплав), титанового сплаву ВТ-20 (псевдо- α -сплав) і титанового сплаву ВТ3-1 ($\alpha+\beta$) сплав мартенситного типу).

Як досліджувані матеріали були обрані титанові сплави марок ВТ1-0, ВТ-20, ВТ3-1.

Як реакційне насичувальне середовище використовувалися суміші порошків дисперсністю 250-400 мкм наступних матеріалів:

1. Cr_2O_3 – оксид хрому (III) (ТУ 6-09-4272-84) – джерело хрому у покриття;

2. Al_2O_3 – оксид алюмінію (III) (ТУ 6-09-426-75, ТУ 8136-85) – інертна добавка;

3. Al - алюміній марки АСД1 (ТУ 48-5-226-82) - відновник оксидів, джерело алюмінію покриття;

4. MgB_{12} - поліборид магнію (ТУ 6-08-374-77) - джерело бору в покриття;

5. AlF_3 – фтористий алюміній (ТУ 6-09-1122-78) – активатор процесу насичення;

Базове покриття наносили в порошковій СВС-суміші, %:

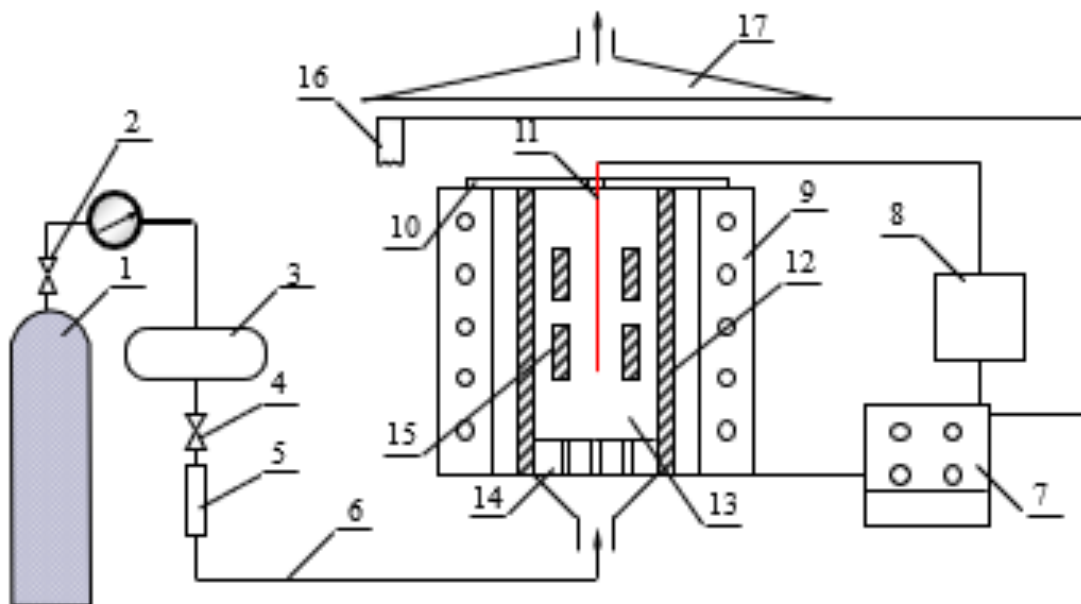
20-30ХС + 5-10Si + 20-25Al + 40-70 Al_2O_3 + 1-3 NH_4Cl ,

20-25ХС + 10-15В + 15-20Al + 30-60Al₂O₃ + 1-3NaF,

Для процесу хіміко-термічної обробки, які проводяться в умовах СВС, використовували реактиви класифікації «ч» та «чда».

2.2 Схема установки для проведення та дослідження СВС

Нанесення захисних покриттів в умовах СВС, на деталі та зразки, здійснювали на установці, принципову схему якої наведено на рис. 2.1. Установа складається з таких основних функціональних систем: реакційне обладнання, система газозабезпечення, система контролю та регулювання технологічними параметрами, системи утилізації газів.



1 – газовий балон; 2 – редуктор; 3 – ресивер; 4 – вентиль; 5 – витратомір; 6 – газова магістраль; 7 – блок живлення; 8 – регулятор температури «Мікроб00»; 9 – електропід; 10 – кришка реактора; 11 – термопара; 12 – реактор; 13 – реакційна суміш; 14 - пористі ґрати; 15 – деталі; 16 – електроспираль; 17 – система утилізації газів

Рисунок 2.1. Принципова схема установки для нанесення покриттів за умов СВС:

Обладнання складається з реактора 12, на дно якого встановлена ориста решітка 14, що стабілізує рівень реакційної суміші 13. Дно реактора являє собою кришку з вмонтованим по середині вхідним патрубком, що сполучається з газовою магістраллю 6. Для зменшення теплових втрат і з надійного фіксування азбестовою кришкою 10. Нагрів реактора здійснювався в печі шахтного типу 9. При реалізації процесу в режимі горіння установка забезпечена електроспіраллю підпалюючого пристрою 16.

Система газозабезпечення складається з балона 1 з інертним газом (аргон), який надходить у реактор 12 через редуктор 2, ресивер 3, вентилі 4, витратоміри 5 та газова магістраль 6. Ресивер 3 може забезпечувати сталість швидкості подачі газу при проведенні процесів на декількох реакторах.

Система контролю та регулювання технологічними параметрами: регулювання темпу нагріву реакційної суміші здійснюється через блок живлення 7, що контролює потужність печі 9, і вимірювання температури проводилося регулятором температури «Мікроб00» 8 з вольфрам-реневою термопарою (ВР-5) 11; вимірювання швидкості подачі інертного газу здійснювалося за допомогою вентиля 4, сполучених через газову магістраль з витратоміром 5. Процеси проводили з використанням витяжної місцевої вентиляції 17.

При складанні реакційної шихти дотримувалися наступного порядку змішування: оксид алюмінію (III) - оксид хрому (III) - оксид бору (кремнію) або бор (кремній) - титан (молібден, цирконій) - алюміній - фтористий натрій (алюміній фтористий, хлор) – йод.

Перед змішуванням суміші порошки просушували при температурі 60-100° С протягом 1-2 год. Ретельно перемішану реакційну суміш засипали в реактор на пористу решітку і продували потоком аргону для створення інертної атмосфери. Насипна густина суміші становить 1000-1200 кг/м³.

При проведенні процесу в режимі горіння ініціювання реакції здійснювали вольфрамовою спіраллю або екзотермічною таблеткою, виготовленою з порошку цирконію. При проведенні процесу в режимі

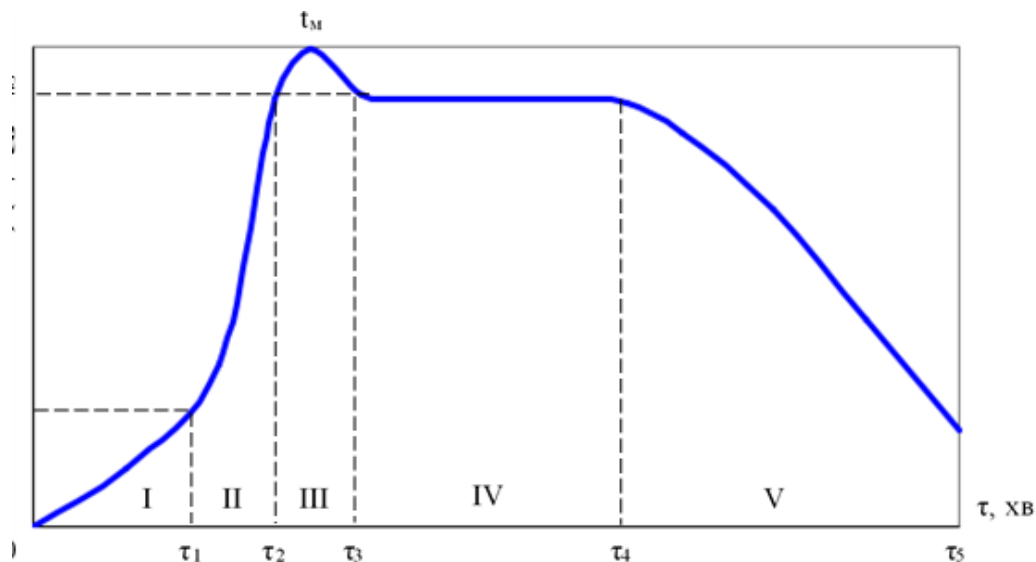
теплого самозапалювання ініціювання реакції здійснювали шляхом попереднього нагріву до температури початку самозапалювання (швидкість нагріву - $0,5^{\circ} \text{C/s}$). Температури СВС-суміші контролювали вольфраменією термопарою в захисному чохлі, введеної безпосередньо в об'єм шихти, і підключеної до регулятора температури "Мікроб00".

Аналіз реакцій, що протікають при СВС-процесі, а також результатів експериментів та металографічних досліджень дозволили отримати схему утворення захисних покриттів. Процес формування захисних покриттів як теплого самозапалювання умовно можна розділити п'ять стадій (рис.2.2) [93, 94].

На початковій стадії (стадія I) відбувається інертне прогрівання суміші. При використанні як постачальника дифузного елемента - бору або кремнію - спостерігається формування борированного або силіцированного шару. При використанні оксиду бору та кремнію має місце лише прогрівання зразка та реакційної шихти до температури самозапалювання.

На стадії II – стадії теплого самозапалювання відбувається підйом температури самозапалювання зі швидкістю $200-400^{\circ} \text{C/s}$ до максимального значення. На цій стадії поряд з утворенням активних атомів бору та кремнію відбувається перебіг реакцій утворення елементарного хрому та їх сполуки з носіями (фтором, хлором та йодом), з утворенням летких галогенідів. Якщо енергія активації взаємодії елементів шихти з носієм менше, ніж енергія активації основного відновного процесу, реакції утворення летких галогенідів будуть протікати квазістаціонарно в міру протікання основної реакції. Якщо температура самозапалювання нижче за температуру початку інтенсивного утворення летючого галогеніду, то для цього випадку утворення галогенідів відбувається лише на стадії нестационарного зростання температури. При досягненні максимальної температури, що перевищує температуру піролізу дийодиду хрому, кремнію, відбувається його швидкий розпад.

На III стадії – стадії прогріву виробів ($\tau_2 - \tau_3$), відбувається падіння температури до T_x за рахунок прийому тепла, що виділився виробами. Активні атоми хрому, титану, молібдену та цирконію починають дифундувати в підкладку і відбувається легування карбідних фаз бору та кремнію. Починають формуватися леговані боридні та силіцидні фази.



: I – стадія інертного прогріву ($0 - \tau_1$); II – стадія теплового самозапалювання; III - стадія прогріву ($\tau_2 - \tau_3$); IV - стадія ізотермічної витримки ($\tau_3 - \tau_4$); V – стадія охолодження ($\tau_4 - \tau_5$)

Рисунок 2.2. Характерний перебіг температурної кривої при утворенні захисних покриттів у режимі теплового самозапалювання

На IV стадії – стадії ізотермічної витримки ($\tau_3 - \tau_4$), відбувається формування постійного дифузійного потоку активних атомів кремнію і бору, що утворюються. Дифузійний шар збільшується і відбувається легування хромом, титаном, молібденом та цирконієм. Зі збільшенням ізотермічної витримки відбувається збільшення товщини шару. Зростання шару підпорядковується параболічному закону.

На V стадії – стадії охолодження ($\tau_4 - \tau_5$) відбувається формування дифузійного шару з меншою інтенсивністю за рахунок зменшення коефіцієнта дифузії кремнію і бору через падіння температури. Шар

складається з двох фаз: зовнішньої, що представляє собою бориди та силіциди хрому, титану, молібдену, цирконію, та внутрішньої – карбідної фази.

3. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ФОРМУВАННЯ ЗМІЦНЕНИХ ШАРІВ

3.1 Термодинамічний аналіз реакцій теплового самозапалювання

Зміцнення в режимі теплового самозапалювання відбувається за нестационарних температурних умов. Температура, що змінюється в часі спочатку за рахунок зовнішнього прогріву, а потім за рахунок займання веде до того, що ні теплова, ні хімічна рівновага до повного закінчення процесу і охолодження продуктів неможливо.

Швидкості протікання хімічних процесів визначаються кінетичними закономірностями, що залежать як від температури, і від дифузійних чинників. Однак, припускаючи принаймні на стадії прогріву, що гальмування дифузійних процесів у газовій фазі невеликі, а швидкість зміни температури мала в порівнянні зі швидкістю протікання газофазних хімічних реакцій, можна вважати, що кожному температурному значенню відповідає рівноважний склад продуктів. Тоді, простежити за хімічною картиною процесу можна, розрахувавши рівноважний склад продуктів реакції ряду конкретних температур з діапазону їх зміни.

Це правомірно, оскільки швидкості протікання хімічних процесів визначаються кінетичними закономірностями, що залежать як від температури, і від дифузійних чинників. Припускаючи, що гальмування дифузійних процесів у газовій фазі невелике, а швидкість зміни температури мала порівняно зі швидкістю протікання хімічних газофазних реакцій, можна вважати, що кожному температурному значенню відповідає рівноважний склад продуктів.

Розрахунок рівноважного складу продуктів проводили для вихідної екзотермічної суміші, що складається з речовин M , що містять l -хімічних елементів. При фіксованих значеннях об'єму V і температури з цих елементів

в результаті хімічних реакцій можуть утворюватися m_k речовини, присутніх в $k=0,1,\dots,q$ різних фазах. Набір речовин включає l атомарних та $(m - l)$ молекулярних компонентів, реакції утворення яких представлені у вигляді рівняння дисоціації:



де $i_k = 0,1,\dots, m_k$ – номер продукту, що належить k -й фазі; $j = 0, 1, \dots, l$ – номер хімічного елемента; a_{ikj} – Число атомів в j -го сорту в i_k -й речовині.

Математично формулювання завдання зводиться до мінімізації термодинамічного потенціалу

$$F(n_{ik}) = \sum_k \sum_{ik} n_{ik} \left(\ln \frac{n_{ik}}{N_k} + G_{ik} \right) = [F(n_{ik})]_{\min} \quad (3.2)$$

при обмеженнях на невідомі n_{ik} , що випливають із закону збереження речовини

$$\sum_k \sum_{ik} a_{ikj} \cdot n_{ik} = b_j \quad (3.3)$$

правила фаз Гіббса

$$f + q \leq l + 2 \quad (3.4)$$

а вимоги їх невід'ємності

$$n_{ik} \geq 0, \quad (3.5)$$

где $N_k = \sum_{ik} n_{ik}$; $N = \sum_k N_k$; $G_{ik} = \mu_{ik} / RT$.

При розрахунку горіння системи (3.2-3.5) доповнюється рівнянням збереження енергії

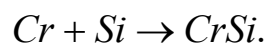
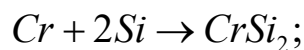
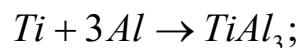
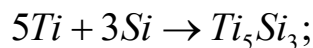
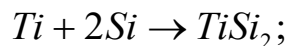
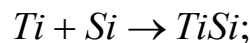
$$\sum_j b_j I_j(T_n) = \sum_k \sum_{ik} n_{ik} I_{ik}(T_e), \quad (3.6)$$

де $I(T) = \Delta H_{fT_0} + (H_T - H_0)$ - повна фізична ентальпія;

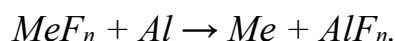
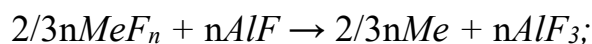
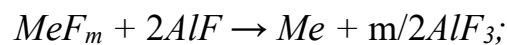
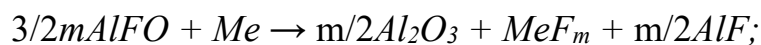
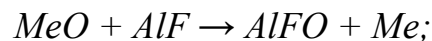
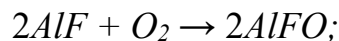
ΔH_{fT_0} - теплота утворення речовини з елементів у стандартному стані при $T_0=298,15$ К.

Розрахунки здійснювали на ЕОМ з термодинамічних програм АСТРА та ТЕРМО [90-92].

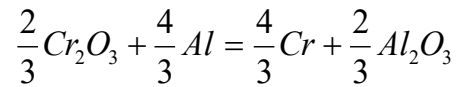
1. Реакції теплового samozапалювання:



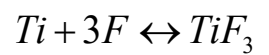
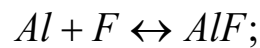
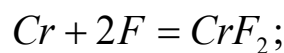
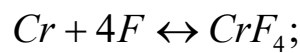
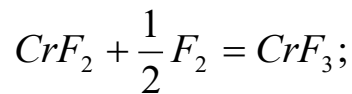
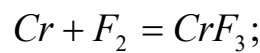
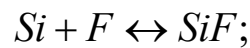
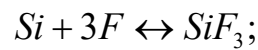
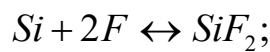
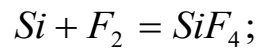
1. Реакции распада газотранспортного носителя:



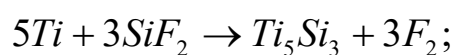
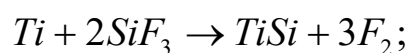
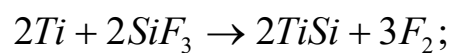
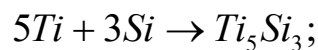
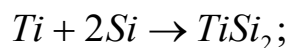
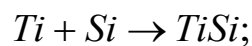
2. Реакція відновлення:

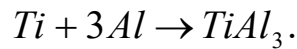


3. Хімічні транспортні реакції (диспропорціонування, терморозпаду):

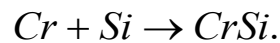
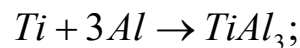
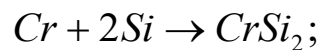
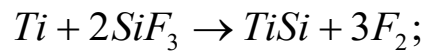
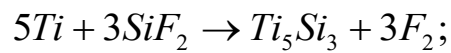
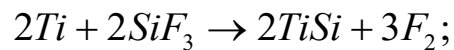
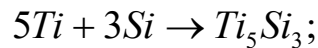
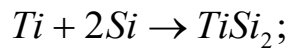
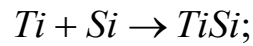


4. Реакції обміну з підкладкою:





6. Реакції з'єднання:



3.2 Модель теплового samozапалювання реакційної суміші

Основи теорії теплового вибуху розробили М.М. Семеновим, який розглянув рівняння теплового балансу реагуючої речовини у припущенні рівномірності розподілу температури за його обсягом.

Хімічна реакція приймається реакцією нульового порядку, коли швидкість реакції залежить від ступеня перетворення речовини, залежить тільки від температури (за законом Арреніуса). Тоді швидкість теплоприходу від хімічної реакції в речовині визначатиметься виразом:

$$Q_{хим.} = Q_p V k_0 e^{-E/RT} = Q_p V k_0 \exp(-E/RT), \quad (3.7)$$

де $Q_{хим}$ [Вт] – швидкість тепловиділення хімічної реакції;
 ρ [кг/м³] – щільність речовини;
 V [м³] – обсяг речовини;
 Q [Дж/кг] – тепловий ефект реакції
 k_0 [1/с] – передекспоненційний множник;
 E [Дж/моль] – енергія активації;
 $R = 8,3144$ Дж/(моль·К) – універсальна газова стала.

Швидкість тепловідведення з речовини в довкілля визначається законом Ньютона:

$$Q_{охл} = \alpha S (T - T_{cp}), \quad (3.8)$$

де $Q_{охл}$ [Вт] – швидкість тепловідведення з речовини в середу з температурою T_{cp} ;

α [Вт/(м²·К)] – коефіцієнт тепловіддачі

S [м²] – площа поверхні речовини.

Н.М. Семенов показав, що в тепловому відношенні можливі два режими протікання реакції: стаціонарний та тепловий вибух.

У стаціонарному режимі $Q_{хим} = Q_{охл}$ здійснюється теплове рівновага: скільки тепла виділяється в речовині, стільки його і відводиться в довкілля. Температури, що досягаються в цьому режимі, невисокі, близькі до температури середовища T_{cp} , і вони перебувають з рівняння рівноваги:

$$Q_p V k_0 \exp(-E/RT) = \alpha S (T - T_{cp}). \quad (3.9)$$

Стаціонарний режим встановлюється у разі невисоких значень температури середовища T_{cp} і досить сильного тепловідведення у середу.

У разі високих значень температури середовища та слабкого тепловідведення рівняння рівноваги вже не має рішення, тому що тут $Q_{хим.} > Q_{охл}$ при будь-якій температурі $T \geq T_{cp}$. Внаслідок експоненційної залежності швидкості тепловиділення від температури саморозігрів речовини відбувається з різким, прогресивним самоприскоренням, і при цьому досягаються дуже високі температури. Це явище називається тепловим вибухом.

Н.М. Семенов знайшов критичні умови, що розділяють область стаціонарних режимів від галузі теплового вибуху. Вони визначаються критичним значенням безрозмірного критерію Семенова:

$$Se = \frac{Q\rho V}{\alpha S} \frac{E}{RT_{cp}^2} k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right), \quad (3.10)$$

$$Se_{кр} = \frac{1}{e} = 0,368.$$

Знаючи кінетичні та теплофізичні властивості реагуючої речовини (Q , k_0 , E , c , p), його форму та габарити (V, S), а також умови, в яких воно знаходиться (α, T_{cp}), можна легко обчислити значення критерію Семенова Se . Якщо це значення $Se > Se_{кр}$, відбувається тепловий вибух.

Таким чином, для реалізації режиму теплового вибуху речовини необхідно створювати в печі такі умови (α, T_{cp}), у яких величина критерію Семенова для даної речовини буде більшою від критичного значення $Se_{кр}=0,368$. Як видно з формули для даного критерію, його значення тим більше, чим більше величини Q , ρ , V , k_0 , T_{cp} і менше величини α, S . Відношення величин V/S визначає характерний розмір або фактично радіус тіла з цієї речовини/наприклад, $V/S=r$ для необмеженої пластини товщиною $2r$, $V/S=r/2$ – для циліндра радіусом r , $V/S=r/3$ – для кулі радіусом r . Звідси

впливає, що чим характерніший розмір тіла (його радіус), тим більше значення критерію Семенова для нього.

Теоретично теплового самозапалювання (теплового вибуху) низки конкретних завдань є аналітичні і чисельні рішення, якими можна розрахувати параметри процесу [94-99]. Застосування такого розрахунку дозволяє прогнозувати не лише теплову картину при хіміко-термічній обробці матеріалів, але й цілеспрямовано за допомогою зміни зовнішніх параметрів впливати на неї.

Основні параметри теплового самозапалювання, які впливають на теплову картину процесу, містять хімічні константи основної екзотермічної реакції (E, k_0 , і Q). Тож розрахунку конкретного процесу необхідно знати чисельні значення цих констант.

Розрахунок кінетичних констант (E і k_0) проводився за інтегральним методом експоненційних множників (ІМЕМ) [100,101].

Відправною точкою для розрахунку кінетичних параметрів реакції взаємодії титану з кремнієм були термограми, зняті при проведенні процесу обробки на установці (див. рис. 2.1).

Розрахувавши кінетичні константи, можна переходити до визначення параметрів теплового самозапалювання.

Розподіл температури для тіла буде рівномірним лише у разі малого значення безрозмірного критерію Біо:

$$B_i = \frac{\alpha r}{\lambda} \quad , \quad (3.11)$$

де λ [Дж/м·К] коефіцієнт теплопровідності речовини.

Пояснюється це тим, що критерій Біо характеризує відношення швидкості надходження тепла через поверхню тіла із середовища до

швидкості розподілу тепла всередині речовини. За більших значень критерію Біо розподіл температури по тілу буде вже нерівномірним.

Критичні умови теплового вибуху за наявності градієнта температури в тілі ($Bi \gg 1$) визначаються значенням безрозмірного критерію Д.А. Франк-Каменецького [99]:

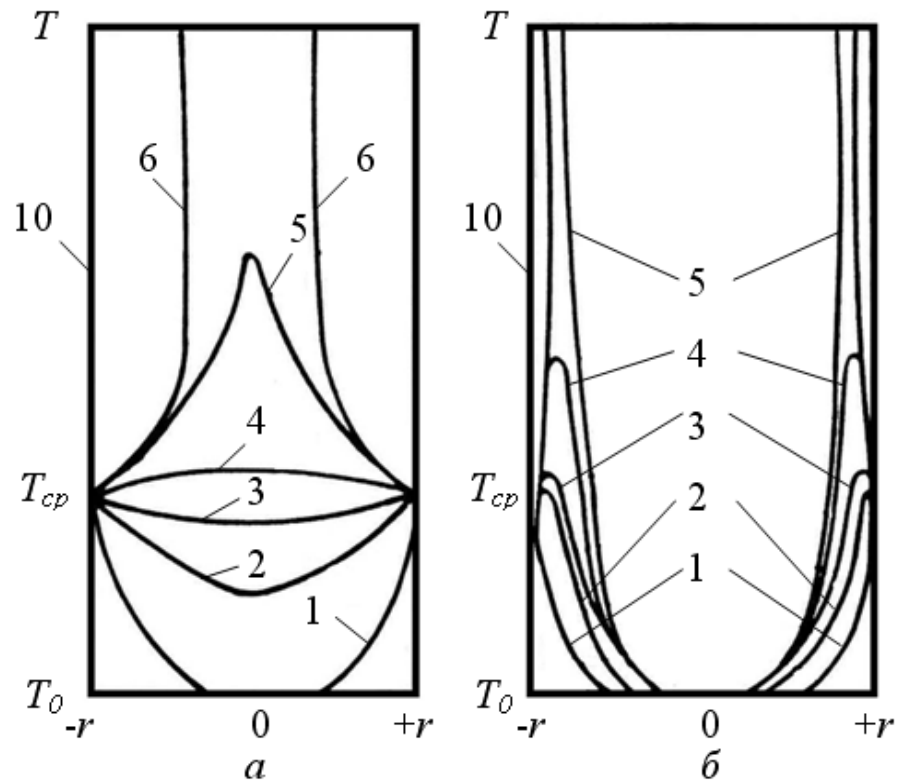
$$Fk = Qpr \frac{E}{RT_{ch}^2} k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_{cp}}\right), \quad (3.12)$$

$$Fk_{кр} = \begin{cases} 0,88 - \text{пластини;} \\ 2,00 - \text{циліндр;} \\ 3,22 - \text{шар.} \end{cases}$$

У граничному випадку $Bi \gg 1$ температура поверхні тіла буде дуже швидко набувати значення температури навколишнього середовища T_{cp} і залишатися рівною їй у процесі охолодження (або нагрівання), тоді як внутрішні шари тіла можуть мати зовсім іншу температуру.

У нашому випадку експерименти здійснювалися в реакторі циліндричної форми і тому $Fk_{кр} = 2,0$ ($\ln Fk_{кр} = 0,69$).

Але залежно від величини критерію Fk процес займання протікає по-різному. Якщо в якихось умовах (зазвичай це порівняно невисокі значення T_{cp}) величина критерію Франк-Каменецького ненабагато перевищує критичне значення $Fk_{кр}$, то в цих умовах вся маса речовини прогрівається до температури навколишнього середовища, після чого в точках, найвіддаленіших від поверхні, тобто. у центрі реагуючої речовини відбувається різке зростання температури з допомогою саморозігріву речовини (рисунок 3.1). Це режим теплового вибуху чи самозапалювання.



а- Режим теплового вибуху; б-режим запалювання

Рисунок 3.1 - Прогрів хімічно реагує речовини,
(цифри у кривих показують відносний час від початку прогріву)

В інших умовах (при високих значеннях T_{sp}) величина критерію F_k може набагато перевищувати критичне значення, тобто. $F_k \gg F_{k_{кр}}$. У цьому випадку тільки поверхневі шари речовини встигають прогрітися до температури навколишнього середовища, де відбувається різке зростання температури за рахунок тепловиділення хімічної реакції в поверхневому шарі, а основна маса речовини залишається холодною (рисунок 3.1 б). Це режим запалювання.

Ширина діапазону значень F_k , за яких здійснюється режим теплового вибуху, істотно залежить від величини критерію Біо.

При $B_i \gg 1$ цей діапазон вузький, а із зменшенням критерію Біо область теплового вибуху розширюється, оскільки зі зменшенням B_i прогрів речовини відбувається рівномірніше.

При малих B_i процес протікає лише у режимі теплового вибуху.

В результаті розрахунку було побудовано залежність параметра $Fk_{кр}$ від температури навколишнього середовища (T_0) (рисунок 3.2).

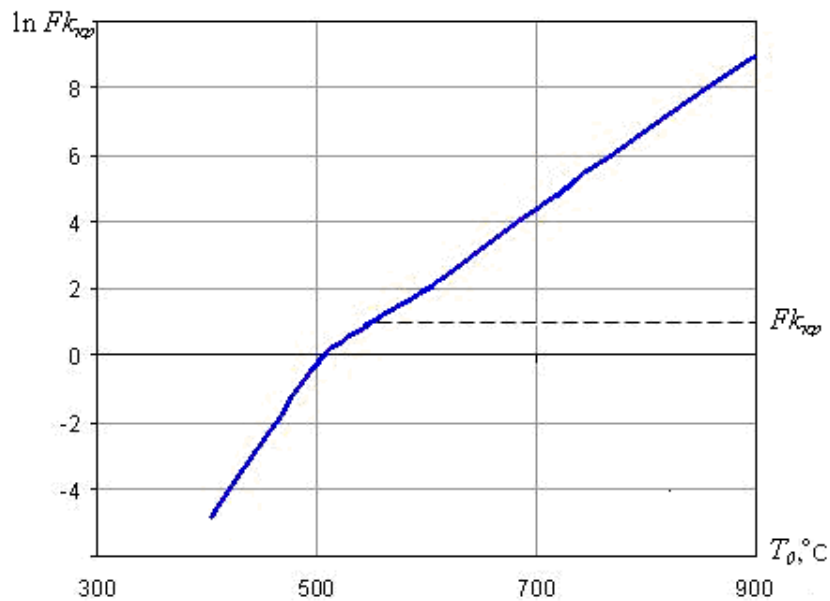
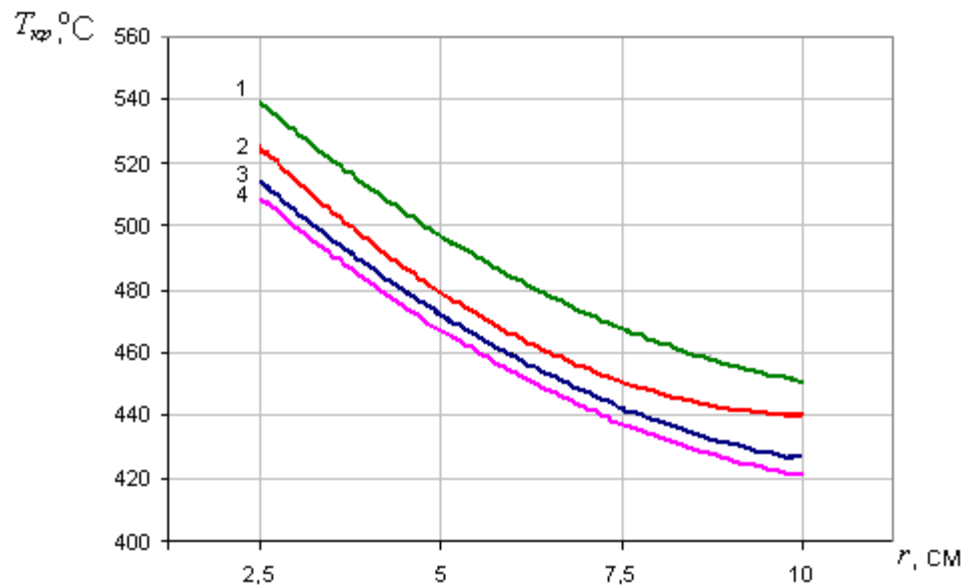


Рисунок 3.2 - Залежність $Fk_{кр}$ від температури навколишнього середовища T_0 , $Q=334,8$ кДж/см³ і $r=25$ мм

З залежності для $Fk_{кр}$, можна визначити критичну температуру займання $T_{кр}$ в циліндричних тілах різних розмірів сумішей із різним тепловим ефектом реакції.

Результат такого розрахунку представлений рисунку 3.3. Видно, що чим екзотермічніша суміш і чим більш характерний розмір реактора, тим меншу величину має критична температура займання.

У реальних умовах експеримент проводився за температур зовнішнього прогріву, що перевищують критичну температуру займання.



1 – 334,8 кДж/см³; 2 – 669,6 кДж/см³; 3 – 1004,4 кДж/см³; 4 – 1339,2 кДж/см³

Рисунок 3.3 - Вплив радіусу реактора на критичну температуру займання за різної теплоти реакції (Q)

Умови теплообміну були визначені із спеціальних дослідів щодо охолодження реактора в регулярному режимі. Теплофізичні дані середовища та матеріалу реактора обрані з довідкової та спеціальної літератури.

Описана вище картина ставилася до займання речовини за статичних умов, коли температура довкілля є постійною, тобто. $T_{cp} = \text{const}$. Розглянемо тепер картину займання в динамічних умовах, коли температура середовища змінюється в часі найчастіше за лінійним законом:

$$T_{cp} = T_0 + \omega t, \quad (3.13)$$

где T_0 [K] – Початкова температура речовини;

t [с] – час ;

ω [K/с] – темп нагріву.

І тут також займання речовини відбувається в режимі теплового вибуху, якщо весь об'єм речовини прогривається до температури

навколишнього середовища, наприклад, за малих значень критерію Біо. Якщо ж займання відбувається в прогрітому поверхневому шарі речовини при іншій ненагрітій частині речовини, то реалізується режим запалювання. Далі розглядаємо лише режим теплового вибуху динамічних умовах, тобто. динамічний тепловий вибух.

Відмінність між розвитком теплового вибуху в динамічних та статичних умовах дуже суттєва. У статичних умовах розмежування вибухового та невибухового режиму відбувається за рахунок співвідношення теплоприходу з тепловідведенням, а кінетичний фактор (вигорання речовини) є другорядним фактором, що вносить лише малу поправку в критичну умову. У динамічному режимі самоіснування критичних умов принципово пов'язане з вигоранням [35], а тепловідведення є другорядним фактором, що грає роль тільки в кінці процесу, оскільки значної частини часу тепловідведення з речовини взагалі відсутнє. У статичних умовах найважливішою характеристикою є критична температура навколишнього середовища, вище за яку процес завершується тепловим вибухом. Для динамічних умов аналогом критичної температури є критичний темп нагріву $\omega_{кр}$.

Розвиток процесу відбувається по-різному залежно від величини темпу нагрівання ω . При низьких швидкостях нагріву саморозігрів речовини невеликий, тобто. його температура близька до температури середовища, через малу швидкість тепловиділення хімічної реакції при невисоких температурах. Через велику тривалість процесу вигорання речовини стає значним вже при порівняно невисоких температурах, що викликає падіння швидкості реакції. Тут теплове прискорення реакції за рахунок повільного підвищення температури компенсується її кінетичним гальмуванням. При досягненні температури навколишнього середовища деякого значення, близького до величини критичної температури середовища в статичних умовах, розігрів речовини, залишаючись невеликим, проходить через максимум і при подальшому зростанні температури швидко зникає.

Зі збільшенням темпу нагріву досягається деяке її критичне значення $\omega_{кр}$. Починаючи з якої кінетичний фактор виявляється нездатним зірвати тепловий вибух і визначається виразом:

$$\omega_{кр} = 5,75 \frac{RT_{кр}}{E} k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_{кр}}\right), \quad (3.14)$$

де $\omega_{кр}$ - темп нагріву, що визначає перехід у статичних умовах;

$T_{кр}$ - Критична температура самозапалювання у статичних умовах.

За рахунок швидшого підйому температури досягаються вищі її значення при малому вигорянні речовини. Швидкість теплоприходу від хімічної реакції стає порівнянною зі швидкістю теплоприходу в речовину від зовнішнього джерела (печі), і за якогось значення температури ці швидкості теплоприходу порівнюються. Цю температуру можна назвати температурою початку теплового вибуху, оскільки при подальшому підвищенні температури швидкість внутрішнього теплоприходу від хімічної реакції через експоненційну залежність від температури стає трохи більшою за швидкість зовнішнього теплоприходу, і за рахунок такого саморозігріву відбувається дуже швидкий підйом температури до високих значень (тепловий вибух). Таким чином, процес нагрівання речовини у цих умовах можна розбити на дві стадії.

Перша, тривала стадія – інертного нагріву, коли швидкість теплоприходу від хімічної реакції набагато менша за швидкість теплоприходу від зовнішнього джерела. Друга, коротка стадія – теплового вибуху, коли, навпаки, швидкість внутрішнього теплоприходу стає набагато більшою за швидкість зовнішнього теплоприходу, і провідним стає процес саморозігріву.

Для конкретно обраної хімічної системи з урахуванням геометричних розмірів реактора (діаметр 50 мм) та умов теплообміну з навколишнім

середовищем можна оцінити значення темпу нагріву, відповідного області самозапалювання. Реалізація процесу у цій галузі зумовлює отримання зміцнених шарів з оптимальними фізико-механічними властивостями.

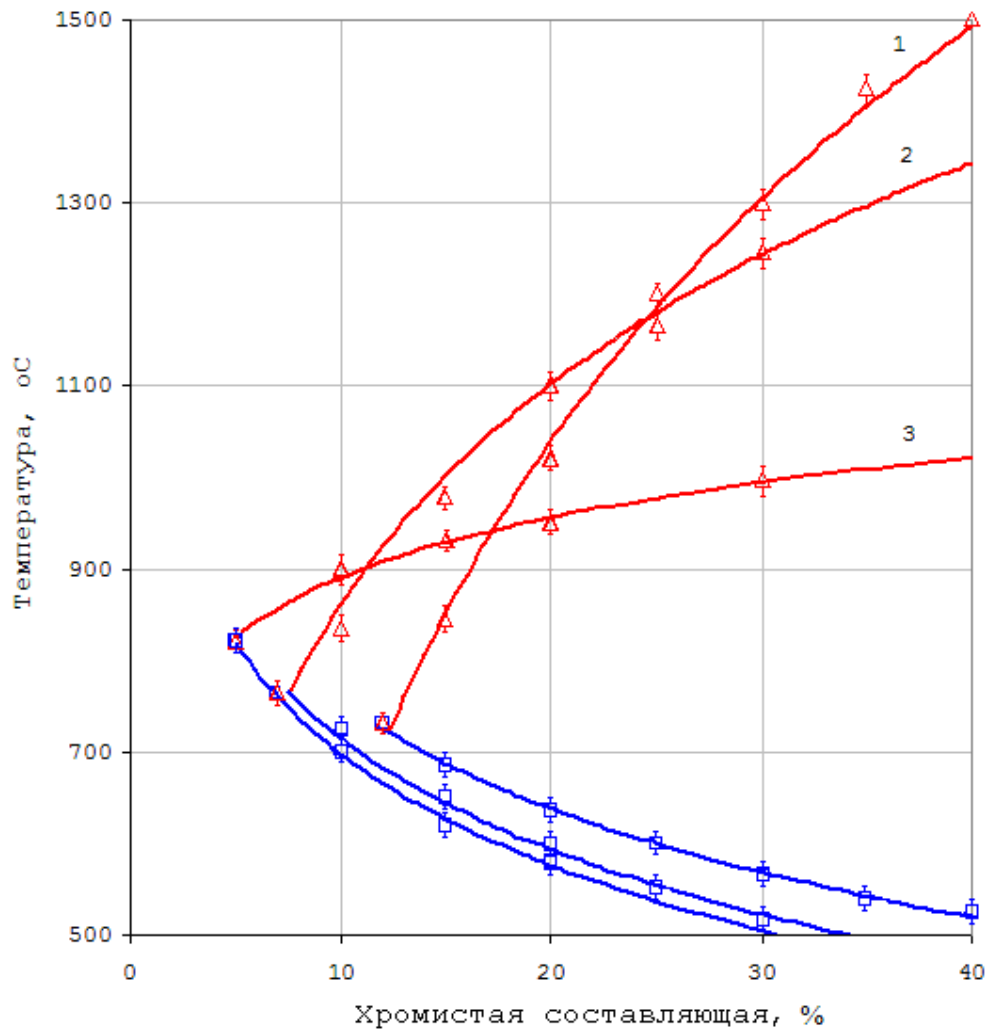
Отже, для реалізації режиму теплового вибуху в динамічних умовах необхідно, щоб темп нагріву перевищував деяке критичне значення $\omega_{кр}$, А нагрів речовини був рівномірним по всьому обсягу речовини [36].

3.3 Теплова картина самозапалювання реакційної суміші

Одним із факторів, що впливає на якість зміцнених шарів, є максимальна температура процесу. Серед параметрів, що впливають на цю величину, слід відзначити склад реакційної суміші, співвідношення мас суміші, що реагує, і оброблюваних деталей.

На рисунку 3.4 показано зміну максимальної температури розігріву реактора і температури займання суміші в залежності від вагового вмісту хромистої складової при різних співвідношеннях мас шихти, що реагує, і оброблюваних деталей. Видно, що із зменшенням у суміші хромистої складової система прагне виродження. Зменшення вагового вмісту інертної складової призводить до зниження температури займання та зростання максимальної температури розігріву.

Збільшення кількісного вмісту легуючих елементів (криві 1, 2, 3) призводить до підвищення температури займання. Підвищення температури займання має вплив легуючих елементів як інертних розріджувачів на стадії займання окису хрому з алюмінієм. Збільшення максимальної температури відбувається завдяки подальшій екзотермічній взаємодії легуючих елементів.



1 – 10% мас. вміст кремнію; 2 - 15% мас. вміст кремнію; 3 - 20% мас. вміст кремнію

Рисунок 3.4 - Залежність температури запалювання (\square) та максимальної температури (Δ) від вагового вмісту хромистої складової ($\text{Cr}_2\text{O}_3+2\text{Al}$) та кремнію

Однак таке збільшення відбувається лише в діапазоні вмісту кремнію, близькому по стехіометрії до хрому, що відновлюється. Збільшення вмісту кремнію понад стехіометрію веде до зниження максимальної температури. Оптимальним є вміст кремнію – 15% та хромистої складової від 20 до 30%.

Як видно, вихідний вміст компонентів у суміші, що розглядається, також значно впливає на загальну картину займання.

Максимальна температура також залежить від кількості реакційної суміші активатора процесу - фтористого алюмінію. При вмісті активатора у кількості понад 3% мас відбувається зниження максимальної температури (рисунок 3.5).

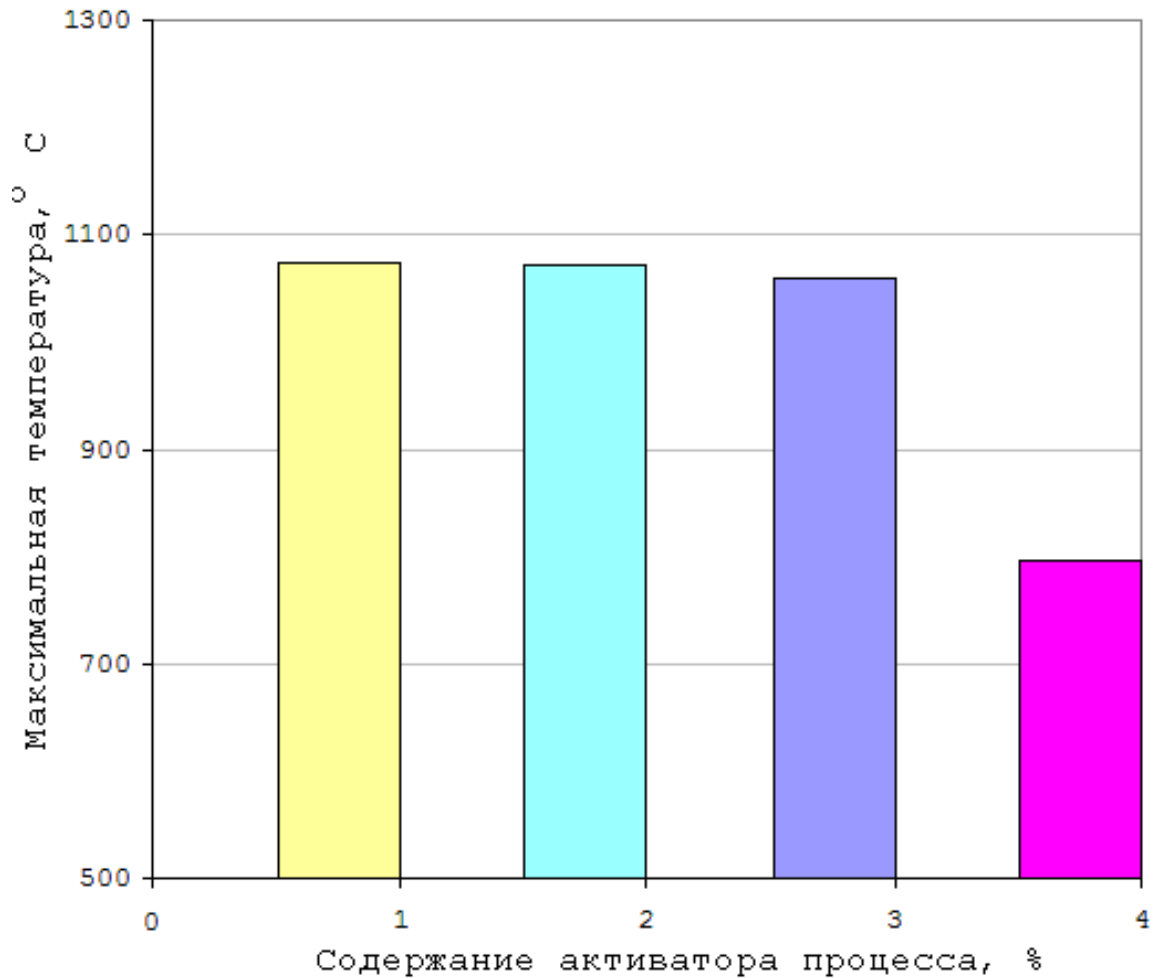


Рисунок 3.5 - Залежність максимальної температури (T_m) від вагового вмісту активатора процесу (AlF_3) для складу $XC + Si + Al_2O_3 + AlF_3$

Очевидно, при такому вмісті фтористий алюміній діє як інертна складова.

Істотний вплив на теплову картину процесу надає співвідношення мас суміші, що реагує, і оброблюваних деталей. Зростання маси деталей сприяє збільшенню температури займання і зниження максимальної температури розігріву. Це пов'язано з тим, що деталі, що зміцнюються, відводять на себе частину тепла і діють як інертний розріджувач. Для збереження умов

протікання процесу в невиродженому режимі співвідношення мас суміші, що реагує, і оброблюваних деталей повинно бути не менше 3:1 [39].

Введення його у кількості 5% призводить до зменшення товщини шару на 30-50%.

Спостерігається стравлювання поверхневого шару на стадії охолодження (рисунок 3.13). Поряд із цим носій входить до складу покриття, що негативно впливає на корозійну стійкість шару. Оптимальним є 1-3% мас, оскільки менше значення призводить до формування поверхневого шару трохи більше 10 мкм.

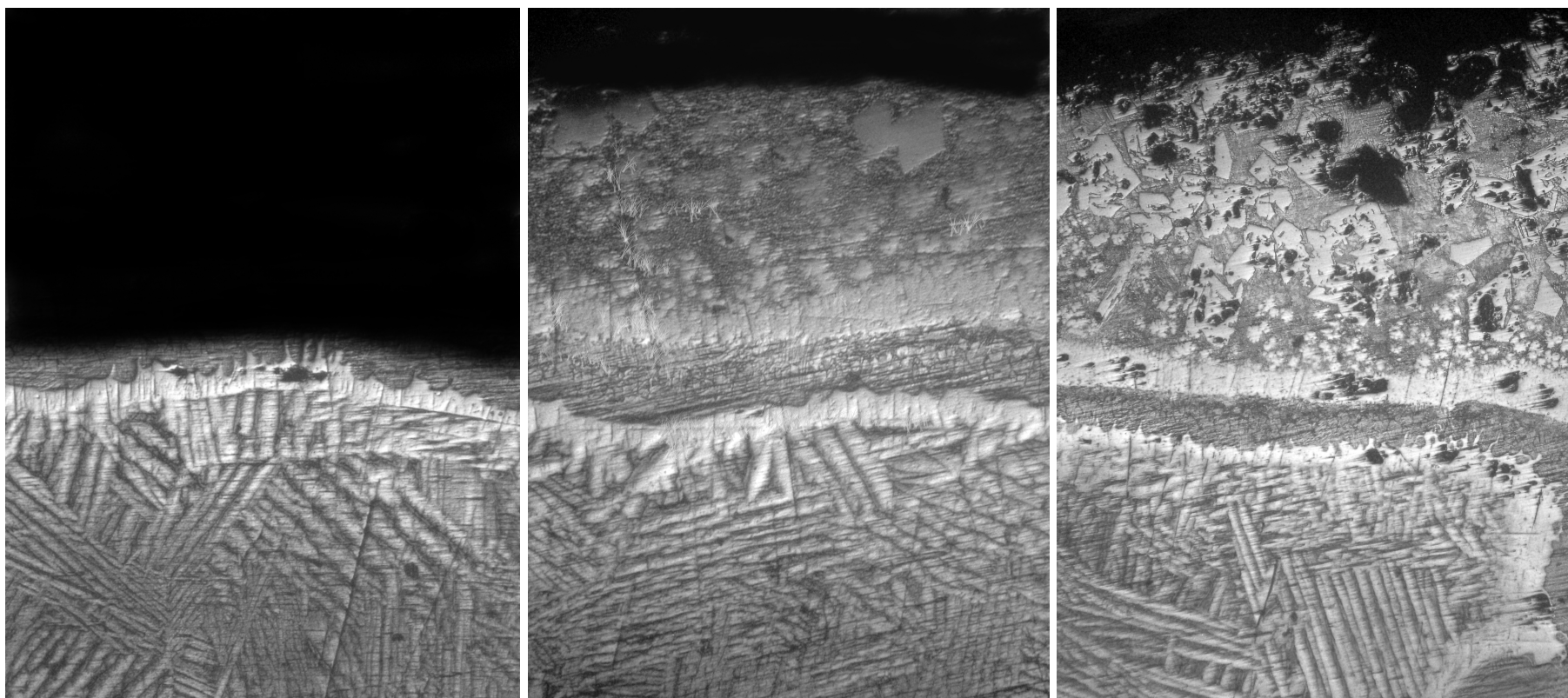
Для підтвердження отриманих оцінок були проведені експерименти зміцнення титанових зразків у режимі теплового самозапалювання з різними темпами нагріву (від 3 до 48° С/хв.), що впливає на якість зміцнених шарів.

Результати залежності температури займання та максимальної температури процесу від темпу нагріву (вимірювання температур вироблено в центрі реактора) представлені на рисунку 3.6.

Видно, що при прагненні темпу нагрівання до значення порядку 4-5° С/хв система прагне виродження. При збільшенні темпу нагріву система все далі і далі йде від критичних умов, при цьому максимальна температура зростає, а температура займання зменшується.

Проведені експерименти показали, що найкращою якістю (рівномірність по товщині, суцільність, твердість) мають покриття, отримані в діапазоні темпів нагрівання від 10 до 20 С/хв.

Очевидно отриманий результат є наслідком проведення

*a**б**в*

a – 1% AlF_3 ; *б* – 1-3% AlF_3 ; *в* – 5% AlF_3

Рисунок 3.6 - Мікроструктури силікованих зразків на титановому сплаві ВТ 1-0 при різному вмісті газотранспортного агента в суміші, $\times 200$

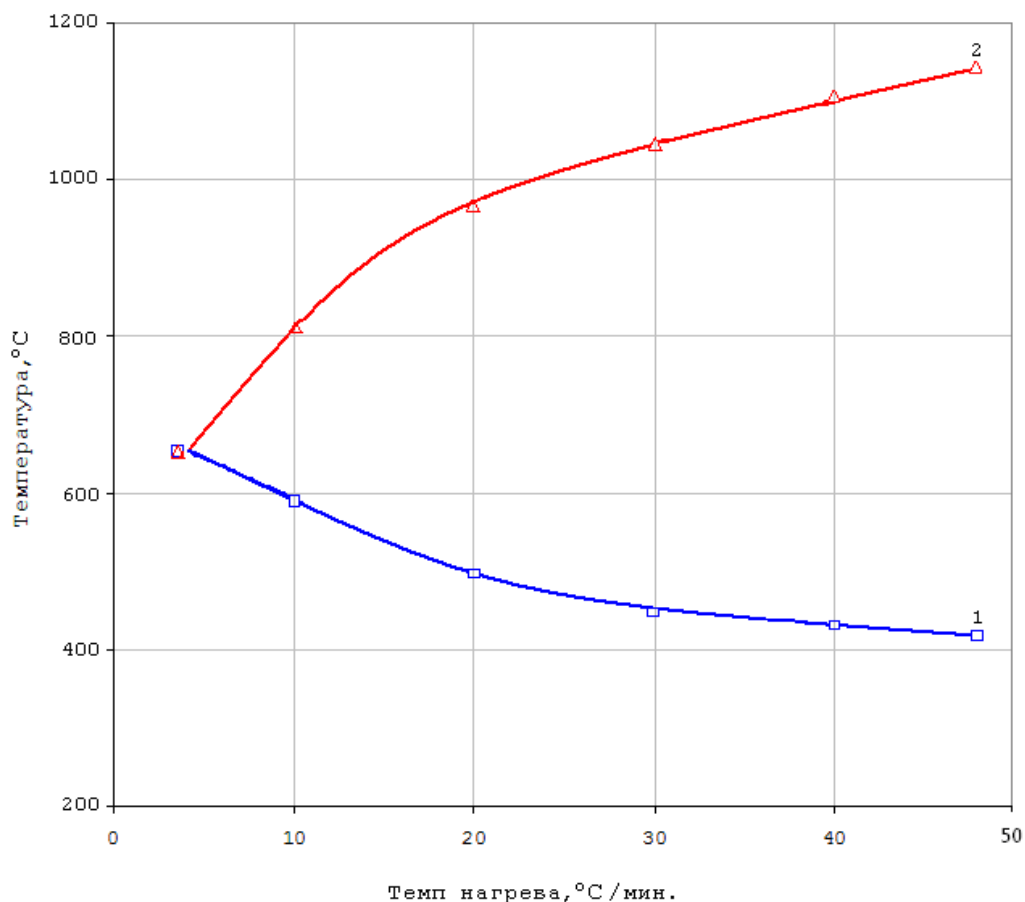


Рисунок 3.7 - Залежність температури займання (1) та максимальної температури (2) від темпу нагрівання для суміші: $\text{XC} + \text{Si} + \text{Al}_2\text{O}_3 + 2\% \text{AlF}_3$

процесу в тій області samozапалювання, де система має мінімальні температурні градієнти по радіусу та висоті реактора.

Всі наступні експерименти проводили за оптимальних темпів нагрівання та однакових умов теплообміну реактора з навколишнім середовищем.

Висновки до розділу

1. В результаті моделювання та термодинамічного аналізу реакцій та їх продуктів були проаналізовані можливості отримання покриттів у режимі теплового samozапалювання стосовно процесів силікування, а також утворення евтектичних композицій титанових сплавів. Показано, що в області температур 800-1200K частка конденсованої фази падає, що підтверджується появою у системі продуктів розкладання та збільшення

молів газу. Газоподібний продукт взаємодіє з елементами суміші та переводить їх у газову фазу (SiF_3 , SiF_4 , CrF_2).

2. Встановлено, що у температурній області 950–1400оС найбільший вихід газофазних продуктів спостерігається під час використання носія у кількості 3%. Водночас тут спостерігається найменший вихід конденсованих фаз. Для суміші з вмістом носія 1 та 2% мас. ці продукти виділяються приблизно у рівній кількості. Також встановлено, що чим більше суміші газотранспортного носія, тим більше вихід газофазних продуктів (SiF_3 , SiF_4 , CrF_2 , AlF).

3. Експериментально показано, що найбільш кращою якістю (рівномірність по товщині і суцільність) мають покриття, отримані в діапазоні темпів нагріву від 10 до 20° С/хв., що є наслідком проведення процесу в тій області samozapalювання, де система має мінімальні температурні градієнти радіусу та висоті реактора.

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. 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 переміщаються 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-І, В-Іа, В-Іб, В-Іг, В-ІІ, В-ІІ. Пожежонебезпечні зони поділяються на чотири класи; П-І, П-ІІ, П-ІІ, а, П-ІІІ. 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 м². У зв'язку з цим будівля з пожежної безпеки має бути віднесена до категорії В і виконана не нижче за ІІ 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 небезпеки 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. 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

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

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:

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
- Матеріал > поліетилен
- Індивідуальний захист для очей із захисною сіткою
- Захист для очей > інфрачервоний захисний фільтр 4-8.
- 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 [10].

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 потоку газоході м/сек	Об`єм газу в г/г.м ³	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 [11].

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

Зазвичай протипожежний водопровід поєднується з господарським, виробничим водопроводом.

Притипожежний 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

Літературний огляд показав, що використання титанових сплавів в умовах впливу високих температур та проблему захисту титанових сплавів можна вирішити шляхом створення нестационарних умов. Однак всі відомі методи нанесення захисних покриттів (порошковий, з паст, рідких та газових середовищах) є енергоємними і характеризуються великою тривалістю процесу. У цьому актуальною є розробка нової технології, яка забезпечує отримання покриттів необхідних експлуатаційних характеристик за мінімального часу формування. Така технологія може служити як способи отримання покриттів на основі самрозповсюджувального високотемпературного синтезу.

Як видно з проведеного аналізу, основи СВС-процесу, що застосовуються у металургійній практиці, вже створено. Однак теорія цих процесів, методи управління ними та шляхи широкого регулювання складів та властивостей їх продуктів вивчені зовсім недостатньо.

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. Алексеев 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., Серeda Б.П., Шмессель Э.А. Высокотемпературный способ получения покрытий в условиях СВЧ. *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 β -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 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, Днепропетровск. 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.