

Шифр: «Прометей»

ОТРИМАННЯ ЛЕГОВАНИХ АЛІТОВАНИХ ЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ НА
ДЕТАЛЯХ ПРАЦЮЮЧИХ В УМОВАХ КОКСОХІМІЧНОГО
ВИРОБНИЦТВА

Галузь знань: «Матеріалознавство»

АНОТАЦІЯ

КОНКУРСНА РОБОТА «Отримання легованих алітованих захисних покриттів на деталях працюючих в умовах коксохімічного виробництва»: 30 с., 16 рис., 2 табл., 18 джерел.

Конкурсна робота присвячена актуальному дослідженню отриманню легованих алітованих захисних покриттів на деталях працюючих в умовах коксохімічного виробництва.

Мета й завдання роботи – отримати леговані алітовані захисні покриття на деталях працюючих в умовах коксохімічного виробництва, дослідити жаростійкість та корозійну стійкість отриманих захисних покриттів, порівняно з деталями без покриття.

Методи дослідження - у роботі використано сучасні методи термодинамічного дослідження з використанням програмного пакету TERRA. Дослідження жаростійкості та корозійної стійкості виконували у відповідності з діючими стандартами на приладах і обладнанні, які пройшли метрологічний контроль.

Проведені експериментальні дослідження фізико-механічних та експлуатаційних властивостей захисних покриттів на деталях працюючих в умовах коксохімічного виробництва. Проведено математичне моделювання з метою отримання раціонального складу порошкової СВС – шихти.

ЖАРОСТІЙКІСТЬ, ТЕРМОДИНАМІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, ПОКРИТТЯ, АЛІТУВАННЯ, МІКРОСТРУКТУРА, МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, САМОРОЗПОВСЮДЖУВАЛЬНИЙ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИЙ СИНТЕЗ.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1. СУЧАСНИЙ СТАН ПОВЕРХНЕВОГО ЗМІЦНЕННЯ ДЕТАЛЕЙ АЛІТОВАНИМИ ПОКРИТТЯМИ	5
1.1 Алітовані покриття і способи їх отримання.....	5
1.2 . Отримання захисних покриттів в умовах СВС.....	12
2. ТЕРМОДИНАМІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СКЛАДУ ГАЗОВОЇ ФАЗИ.....	16
2.1 Розробка раціональних складів СВС–шихт для отримання жаростійких алітованих покриттів.....	16
2.2 Термодинамічне моделювання в багатокomпонентних насичуючих середовищах при алітуванні в умовах СВС.....	18
3. ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ДЛЯ ОБЛАДНАННЯ КОКСОХІМІЧНОГО ВИРОБНИЦТВА	24
3.1 Обладнання для отримання захисних покриттів в умовах СВС.....	24
3.2 Корозійна стійкість покриттів у водних кислотних розчинах.....	25
3.3 Жаростійкість отриманих захисних покриттів.....	27
3.4 Промислове випробування отриманих покриттів.....	28
ВИСНОВКИ.....	30
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	31

ВСТУП

На теперішній час гостро стоїть питання отримання захисних покриттів, для поверхневого зміцнення деталей працюючих в агресивних умовах.

Серед методів поверхневого зміцнення перспективним є метод хіміко-термічної обробки і нанесення хромо-алітованих покриттів. Хіміко термічна обробка (ХТО) являє собою процес поверхневого насичення матеріалів різними елементами для додання їм відповідних властивостей.

Покриття нанесені методом ХТО завдяки високій зносостійкості можуть бути використані для захисту деталей в автомобільному транспорті, в металургії, машинобудуванні і в сільському господарстві. На теперішній час автомобільна промисловість потребує отримання багатокomпонентних захисних покриттів на сплавах для деталей тертя, що працюють при високих навантаженнях і великих швидкостях в умовах агресивних середовищ.

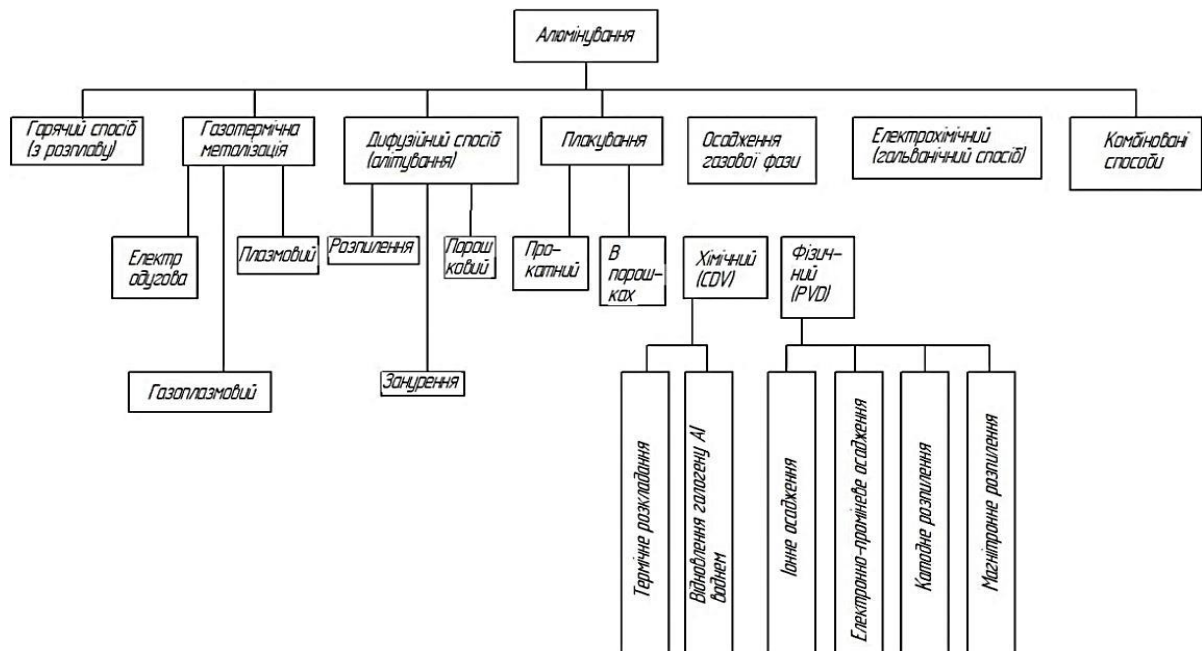
Через це виникає необхідність отримання захисних легованих хромо-алітованих покриттів для захисту конструкційних матеріалів. Однак всі відомі методи енергоємні і тривалі. По цій причині для України високу актуальність становить розробка нових методів ХТО, що дадуть змогу регулювати склад та структуру захисних покриттів, забезпечуючи високі експлуатаційні параметри при мінімальному часі формування таких покриттів. Такі технології базуються на явищі СВС[1-4].

РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ПОВЕРХНЕВОГО ЗМІЦНЕННЯ ДЕТАЛЕЙ З АЛІТОВАНИМИ ПОКРИТТЯМИ

1.1 Алітовані покриття і способи їх отримання

Виходячи із завдань, визначених в стратегічних напрямках розвитку матеріалів і технологій в Україні, аналізу тенденцій розвитку матеріалів у світі, актуальними є покриття і матеріали, які володіють більш високим рівнем властивостей. Цим обумовлено зацікавленість до застосування алюмінію у якості матеріалу для нанесення захисних покриттів.

Відомо, що на поверхні алюмінію при контакті з киснем повітря утворюється оксидна плівка з гарними захисними властивостями, яка складається в основному з оксиду (у аморфному або кристалічному стані) і гідроксиду алюмінію. Оксидна плівка характеризує корозійну поведінку алюмінію, він стійкий в таких окисниках, як азотна кислота, розчини біхроматів [5]. На рисунку 1.1 показані основні способи нанесення покриттів з алюмінію на сталь.



Рисунк 1.1– Способи отримання алітованих покриттів

Алюміній в якості покриття наносять на сталь для підвищення її корозійної стійкості та стійкості проти окалиноутворення [6].

Гарячий спосіб

Алюмінієві покриття на сталі отримують гарячим способом. Для цього до ванни з розплавом алюмінію занурюють підготовлені сталеві вироби. У розплав алюмінію додають кремній, щоб утруднити утворення шару крихкого металу. Отримані з розплаву покриття використовують для підвищення стійкості сталевих виробів до окислення при помірних температурах (до 480 °С). При ще більш високих температурах покриття стають вогнетривкими, але зберігають захисні властивості до 680 °С. Відмічено, що алюмінієві покриття мають нестійкі експлуатаційні характеристики в різних середовищах.

Гаряче алюмініювання застосовують для отримання покриттів на сталевих листах і стрічках, які використовуються для виготовлення труб і глушників двигунів внутрішнього згоряння, газових і повітряних теплообмінників, протипожежних пристроїв, облицювання печей і т.д.

Газотермічний спосіб нанесення алюмінієвих покриттів

Газотермічне нанесення покриттів полягає в нагріванні матеріалу, що розпилюється, до температури плавлення, утворенні потоку, перенесенні цим потоком напилюваного матеріалу і формуванні покриття на поверхні виробу [7]. До групи цього методу відносяться: електродугова металізація, газоплазмове напилення, плазмове напилення. Відмінними рисами газотермічних методів є:

- висока продуктивність;
- технологічна простота і гнучкість;
- можливість нанесення покриттів.

Встановлена здатність алюмінієвого покриття на сталевих трубах нафтопроводів протекторно захищати основний метал, при цьому термін експлуатації таких труб збільшується в 3 рази у порівнянні з трубами без покриття. Покриття алюмінієм шибера засувки і штоку насосів з анодним окисленням збільшило ресурс цих деталей в 6 разів, у порівнянні з деталями

без покриттів. Проте у більшості випадків на алюмінієві покриття, які отримані металізацією, необхідно наносити лакофарбні покриття.

Недоліки методу електродуги – висока яскравість випромінювання, великий рівень шуму, значна пористість покриття, недостатня адгезія. Покриття, отримані плазмовою металізацією, мають пористу (5–9%), шарувату структуру. Плазмові алюмінієві покриття застосовуються як термостійкі покриття на лопатках газових турбін, деталях шасі, камерах згоряння двигунів, в атомній енергетиці – для поліпшення теплообміну, захисту від корозії у водяному середовищі [8].

Дифузійний спосіб (алітування)

Дифузійний спосіб отримання алюмінієвого покриття (алітування) – це процес, який забезпечує на сталевих поверхнях отримання твердих розчинів алюмінію в залізі, запобігаючих окалиноутворення при температурах до 950 °С. Класифіковані три методи алітування:

- алітування розпиленням;
- порошкове алітування;
- алітування зануренням.

Процес *алітування розпиленням* полягає в тому, що деталі з алюмінієвими покриттями, які отримані методами газотермічної металізації, піддають дифузійному відпалу при 850–1000 °С на протязі максимум 5 годин. Відпалювання проводиться під захистом покриття з рідкого скла або в атмосфері інертного газу. Товщина інтерметалідного шару, що утворюється, складає мінімум 0,3 мм. Такий спосіб застосовується для захисту деталей, що контактують з відкритим полум'ям (колосникові ґрати, пароперегрівачі, димо-відвідні системи і елементи промислових печей). Захист сталевій поверхні від окалини ефективний при температурі 600–800 °С.

Плакірування

Плакірувати сталь алюмінієм можна двома методами – прокаткою або за допомогою алюмінієвого порошку.

Плакірувать сталь можна за допомогою *алюмінієвого порошку*. Цей метод використовують для захисту від корозії сталевого дроту. Товщина плакіруваного шару складає 10–20% від загального діаметру дроту. Плакіруваний дріт використовується як провідник для відкритих ліній електропередач.

Для сплаву Д16-Т найбільш ефективним плакірувальним матеріалом виявився сплав АД35 з незначною добавкою цинку; а для сплаву 1420 – алюмінієвий сплав з добавкою 1,2% Zn + 0,11% Zr [9].

Осадження з газової фази

Хімічне осадження з газової фази

Метод хімічного осадження з газової (парової) фази (CVD) різних металовмісних сполук заснований на хімічній реакції, що протікає на поверхні або поблизу неї з подальшим формуванням покриття з атомарних або кластерних утворень. При отриманні алюмінієвих покриттів цим способом використовують реакції розкладання (наприклад, термічного) і реакції відновлення галогеніду алюмінію воднем (іноді у присутності інертного газу).

Відома технологія нанесення алюмінієвого покриття з газової фази на лопатки газових турбін, виготовлених з нікелевих сплавів. За цією технологією алюмінієве покриття наносили дифузійним способом по підшару гальванічної платини з подальшим відпалом. Нова технологія дозволила скоротити час нанесення покриття наполовину, при цьому на зовнішніх і внутрішніх поверхнях лопаток отримані відносно рівномірні по товщині шари алюмінієвого покриття.

Відомий метод нанесення алюмінієвого покриття з суміші випаровуваного хлориду алюмінію і аргону. При пропусканні такої газової суміші над холодною поверхнею підкладки на ній осідає металевий алюміній. Осадження алюмінієвих шарів з газової фази рідких алюмоорганічних з'єднань вивчено в роботі [10]. Для цього в основному використовували наступні алкіли

алюмінію: триізобутилалюміній (ТІБА), диізобутилалюміній гідрид (ДІБАГ), триетил-алюміній (ТЕА).

Переваги способу – можливість нанесення рівномірних по товщині покриттів на вироби складної конфігурації. Спосіб металоосадження CVD відрізняється високою продуктивністю (до 25 мкм на годину) і економічністю на відміну від способів фізичного осадження з газової фази.

Фізичне осадження з газової фази

Спосіб фізичного осадження з газової фази (PVD–процес) називають також способом нанесення покриття за допомогою вакуумного випару або вакуумним напиленням.

Установка для отримання покриття цим способом описана в роботі [11]. Процес PVD відрізняється від способу CVD тим, що не потрібний розігрів підкладки, немає необхідності застосовувати хімічно–активні речовини.

Гальванічне алюмініювання

Процес електрохімічного осадження алюмінію отримав практичне застосування для захисту виробів із сталі, титану, інших металів і сплавів. Для цього використовуються тільки безводні електроліти: ефірно-гідридні, алкілбензолні та металорганічні. Електролітичне відновлення алюмо-органічних з'єднань для отримання покриттів високої чистоти описано в роботі [12]. Отримані покриття відрізняються високою чистотою (99,99%), за своїми фізико-механічними властивостями близькі до електрометалургійних марок алюмінію.

Фізико-хімічні властивості електролітичних алюмінієвих покриттів залежать від режимів електролізу. Мікротвердість покриття відповідає твердості чистого алюмінію, кількість вуглецю в покритті незначна (0,005%). Встановлена залежність пористості від товщини покриття, мінімальна пористість досягнута при товщині ~ 10 мкм. Алюмінієві покриття, отримані електроосадженням, мають незначну внутрішню напругу, високу електропровідність.

Комбіновані способи отримання покриттів на основі алюмінію

Комбіновані способи отримання покриттів на основі алюмінію можна розділити на три групи:

- покриття сплавами на основі алюмінію;
- багат шарові покриття з алюмінієвим шаром;
- поверхнева обробка алюмінієвого покриття (хімічне оксидування, анодне оксидування).

Наносять ці комбіновані покриття способами, розглянутими раніше. Висока стійкість в морській і промисловій атмосфері сталевих деталей, які покриті сплавом системи алюміній–цинк гарячим способом. Відоме покриття на сталі з алюмінієвого сплаву з хромом і одним або декількома елементами групи заліза (нікель, залізо або кобальт), нанесене за допомогою методів фізичного осадження з парової фази.

Різноманіття способів отримання алюмінієвих покриттів свідчить про значний інтерес до їх використання щодо захисту від корозії сталевих виробів. Алюмінієві покриття і покриття алюмінієвими сплавами можуть бути використані замість електролітичних кадмієвих покриттів. При застосуванні алюмінієвих покриттів цілком можна замінити нержавіючі сталі на вуглецеві в певних корозійних і атмосферних середовищах

Одним з простих і економічно вигідних способів є алітування методом розплавлення і напилення розглянутий авторами [28]. Суть цього методу полягає в плавленні металу і розбризкуванні його струменем стислого повітря під тиском 2–4 атм. за допомогою спеціального металізатору (газового, електричного або високочастотного). Перед цим поверхню, для напилення, очищують.

Для підвищення зчеплення покриття, поверхню основного металу роблять шорсткою. При цьому способі алітування зчеплення не відбувається не лише між покриттям і металом, але і між шарами і частками алюмінію. Структура покриття має підвищену пористість (до 20 мікропор на 1мм), тому

для підвищення міцності зчеплення покриття з металом і підвищення щільності, проводиться відпал при температурі 950–1200 °С.

Щоб алюміній під час дифузійного відпалу не окислювався, застосовують обмазку, яку підігрівають до 80–100 °С і наносять на поверхню металізованої деталі шаром 0,8–1,5 мм, за допомогою кисті, занурення або пневматичним розпилювачем. Обмазка просушується на повітрі, потім в печі при 80–100 °С.

Покриття піддається термообробці з метою зниження концентрації алюмінію, оскільки після формування дифузійного шару, вміст алюмінію в шарі знаходиться на рівні 22–32%.

При зниженні вмісту алюмінію, знижується і опірність високо-температурному окисленню і довговічність від хімічного руйнування покриття газовим середовищем, тому для підвищення терміну служби покриття слід збільшити його товщину.

Стандартний процес ХТО передбачає використання насичуючих порошкових середовищ, які поміщають в металеві контейнери разом з виробами, що зміцнюють. Контейнери після герметизації завантажують в термічну піч, нагріту до температури процесу КМБ, і витримують, як правило, десятки годин до отримання необхідної товщини дифузійного шару. Так здійснюються процеси цементації, хромування, алітування, комплексного термодифузійного насичення.

Одним з напрямів розвитку процесів поверхневого зміцнення можна вважати проведення ХТО в киплячому порошковому шарі. У цьому методі використовується специфічний стан порошку дрібнозернистого матеріалу, що має за певних умов ряд властивостей, властивих рідинам, таких як плинність і інтенсивне перемішування часток в об'ємі, що дозволяє їм розтікатися по поверхні виробу, яку обробляють, потрапляти в поглиблення і отвори. Розрізняють два способи досягнення такого стану порошку. Перший спосіб – аеродинамічний, при якому здійснюється продування дрібних часток газовими

потоками, які подаються в реактор від низу до верху під певним тиском. Другий спосіб – вібраційний, при якому контейнер з порошковою засипкою піддається вертикальним вібраціям певної частоти і амплітуди. Регулювання параметрів процесу насичення здійснюється зміною складу і розміру часток порошкового середовища, швидкості подання газових потоків, інтенсивності вібрації контейнера. Такий спосіб ХТО дозволяє скоротити загальну тривалість процесу обробки, проте використовується рідко із-за високих енергетичних витрат, викликаних необхідністю створення віброкиплячого шару, а також складності як найтехнологічнішого процесу, так і устаткування, що використовується.

Заслуговує на увагу спосіб дифузійного насичення в струмопровідних порошкових середовищах. Фізичною основою цього способу є здатність сумішей, що насичують, розігріватися в процесі проходження через них електричного струму. Як правило, такі суміші відрізняються від звичайних порошкових сумішей, що насичують, наявністю в них наповнювачів, що мають високу електропровідність. Як такі струмопровідні наповнювачі можуть використовуватися: графіт, електродна крупка, кокс, деревне вугілля, мідь. Цей спосіб передбачає використання вогнетривкого муфеля, в який поміщені два електроди, розташовані з протилежних сторін муфеля.

1.2. Отримання захисних покриттів в умовах СВС

Передумовою отримання нових матеріалів з оптимальним комплексом ефективних властивостей є розробка технологій якісно нового рівня, які базуються на розумінні та прогнозуванні процесів структуроутворення, а, отже, і можливостях впливу на сам механізм формування структури з бажаними фізико–механічними показниками. Однією з нових та найбільш ефективних технологій виготовлення широкого спектру матеріалів, в тому числі композиційних, є технологія саморозповсюджувального високотемпературного синтезу (СВС), суть якої полягає у проходженні прямого синтезу цінних в

практичному відношенні сполук в екзотермічних реакціях між певними хімічними елементами.

Метод СВС дозволяє отримувати тугоплавкі сполуки різного хімічного і фазового складу (карбіди, нітриди, силіциди, халькогеніди, інтерметаліди, гідриди), а також відновлені метали. Крім того, методом СВС можна отримувати неорганічні матеріали з різними фізичними властивостями (порошкоподібні; спечені – суцільні та пористі; литі), а також вироби певної форми і розмірів. Можливе також проведення вирощування монокристалів з розплавлених продуктів горіння.

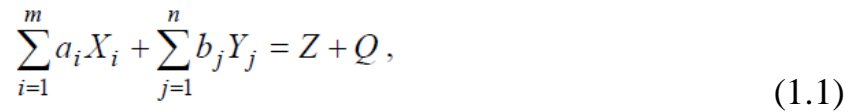
Незважаючи на те, що можливості СВС–процесів до кінця не вивчені і все ще не до кінця виявлено сфери можливого застосування СВС–технологій [13], на сьогоднішній день СВС уже знайшов широке використання в цілому ряді промислових галузей, серед яких машинобудування, металургія, хімічна промисловість, електротехніка, електронна промисловість та ін. [14].

Одним з найбільш перспективних напрямків, де знаходить своє застосування реалізація явища СВС, є сучасні технології нанесення захисних покриттів, в тому числі зносостійких. Метою даної роботи є аналіз напрацьованих щодо використання СВС у технологіях нанесення зносостійких покриттів, які представлені у літературі, їх систематизація та окреслення перспективних напрямків розвитку даних технологій.

Оскільки реакції СВС супроводжуються інтенсивним світловиділенням, високими температурами та протікають у таких же швидких режимах, як і розповсюдження хвиль горіння [15], то їх відносять до різновиду горіння та вивчають в рамках теорії горіння, а продукти горіння досліджують матеріалознавчими методами. Таким чином, галузь СВС, як і багато інших, знаходиться на стику наук – хімічної фізики та матеріалознавства.

У сучасному, розширеному розумінні СВС являє собою процес горіння будь-якої хімічної природи, що призводить до утворення цінних у

практичному відношенні твердофазних матеріалів. В самому загальному вигляді схему процесу СВС можна представити в наступному виді :



де $X(i)$ – метал у твердому стані (Al, Ti, Zr, Hf, V, Nb, Ta, Mo, W та ін.);

$Y(j)$ – метал чи неметал у твердому, рідкому або газоподібному стані (Al, C, B, Si, N₂, O₂, H₂, S, Se та ін.);

$Z(k)$ – продукти синтезу (карбіди, бориди, силіциди, нітриди, оксиди, гідриди, інтерметаліди);

Q – тепловий ефект реакції.

Елементи X являють собою порошки металів, Y – використовуються в порошкоподібному, рідкому або газоподібному станах, продукт Z є тугоплавкими і при температурі горіння знаходиться звичайно у твердому стані.

Близько з точки зору реакційної дифузії процеси можуть протікати в системах, в яких один реагент є порошком, а інший газом. Тут також поверхню контакту реагентів повинна бути високою. Найбільш складна картина в реальних порошкових сумішах, що складаються з частинок різного сорту. Мала поверхню контакту частинок не здатна забезпечити чисто твердофазний режим горіння, і поширення хвилі горіння можливо лише при наявності додаткових інтенсифікують факторів, таких як дію регенеріруємих газових молекул - переносників (забезпечують газотранспортний перенесення реагентів) або контактна плавлення за рахунок утворення легкоплавких евтектичних сумішей. Можливі ситуації, коли один з реагентів повністю плавиться або газифікуємо, проте продукти при цьому утворюються повністю в твердому стані. Саме тверде полум'я з різноманітністю форм перетворення речовини лягло в основу методу СВС. Організація СВС полягає в створенні

порошкової суміші і навколишнього середовища, що забезпечують екзотермічність взаємодії при локальному ініціюванні процесу (запаленні). Потім відбувається мимовільне поширення хвилі реакції (горіння) та охолодження синтезованого продукту. СВС - процеси розрізняються хімічною природою реагентів, складом і структурою шихти, параметрами навколишнього середовища, можливими зовнішніми впливами-енергетичними і механічними. Всі ці фактори впливають на умови процесу, характер і швидкість поширення фронту горіння, зонну структуру хвилі горіння (теплову та концентраційну), механізм хімічних і структурних перетворень в хвилі, максимальну температуру, пост - процеси в продуктах горіння (структурні перетворення і охолодження).

Хімія СВС - процесів відіграє важливу роль у виборі систем і створення умов для вирішення того чи іншого завдання синтезу.

Традиційна хімія горіння розглядає переважно реакції термічного розкладання і окислення всіляких палив: натуральних і синтетичних, органічних і неорганічних, твердих, рідких і газоподібних. Підбір горючих систем заснований на пошуках найбільш калорійних складів, при горінні яких виділяється якомога більше енергії. Зазвичай хімічна енергія палива виділяється у вигляді теплової енергії газоподібних продуктів горіння, шляхи перетворення якої в інші види енергії добре відомі.

Підбір СВС - Систем заснований на принципах технологічного горіння. Основна ознака - утворення корисного продукту в результаті екзотермічної реакції, причому величина теплового ефекту становить інтерес лише в тій мірі, в якій здатна забезпечити сам процес горіння. Такий підхід приваблює до розгляду велику кількість різноманітних горючих систем і хімічних реакцій. Проте, найбільшого поширення набули реакції синтезу - як основна (або єдина) хімічна стадія процесу.

РОЗДІЛ 2. ТЕРМОДИНАМІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СКЛАДУ ГАЗОВОЇ ФАЗИ

2.1. Розробка раціональних складів СВС–шихт для отримання жаростійких алітованих покриттів

Випробування на жаростійкість проводиться в електричній печі при температурі 1000 °С протягом 25 годин. Характеристикою жаростійкості служить зміна маси зразка, виготовленого зі сталі 45, на якому отримано леговане алітоване покриття при $t_{п} = 1000$ °С і $\tau_{в} = 60$ хвилин.

Параметри оптимізації:

L_1 – показники жаростійкості (ΔG) для системи Al–Si;

L_2 – показники жаростійкості (ΔG) для системи Al–Ti;

L_3 – показники жаростійкості (ΔG) для системи Al–Cr;

В результаті регресивного аналізу отримані рівняння, що показують залежність жаростійкості легованих АП від вмісту легуючих елементів:

$$L_1 = 89,4 - 1,9X_1 + 4,8X_2 - 6,6X_3 - 5,5X_1^2 + 6X_2^2 - 4X_3^2 + 0,75X_1X_3 - \\ - 0,25X_1X_3 - 0,75X_2X_3$$

$$L_2 = 49,778 + 2,5X_1 + 1,2X_2 - 1,8X_3 + 3,2778X_1^2 - 7,2222X_2^2 + 5,7778X_3^2 + \\ + 0,125X_1X_2 + 2,375X_1X_3 + 1,375X_2X_3$$

$$L_3 = 61,511 - 1,5X_1 + 0,2X_2 - 0,9X_3 + 0,6111X_1^2 - 2,8889X_2^2 + 1,6111X_3^2 - \\ - 3 X_1X_2 + 0,75X_1X_3 + 0,5X_2X_3$$

Одержуємо натуральні рівняння, що характеризують впливи режиму теплового самозапалювання та вмісту легуючих елементів на жаростійкість легованих захисних покриттів:

$$\Delta L_1 = - 56,9 + 11XC - 7,8 Si + 5,72Al - 0,22 XC^2 + 0,38 Si^2 - 0,16 SiAl$$

$$\Delta L_2 = 129,67 - 5,24 XC + 10,83 Ti - 9,24Al + 0,13 Ti^2 - 0,45 Al^2 + 0,23 Al^2$$

$$\Delta L_3 = 25,96 + 1,2 XC + 5,89Cr - 0,18 Cr^2 - 0,15 XCCr^2$$

Поверхні відгуку отриманих математичних моделей представлені тривимірними графічними залежностями (рис. 2.1–2.3).

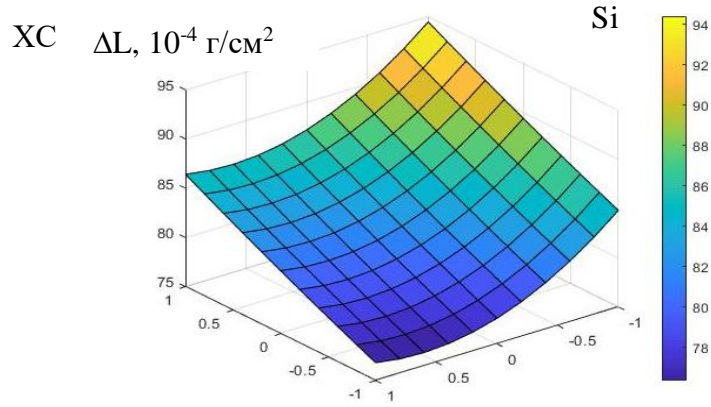


Рисунок 2.1 – Вплив вмісту XС та Si в СВС–шихті на жаростійкість

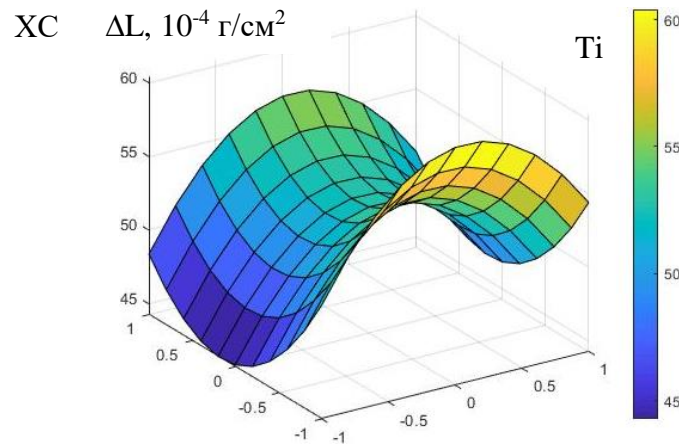


Рисунок 2.2 – Вплив вмісту XС та Ti в СВС–шихті на жаростійкість

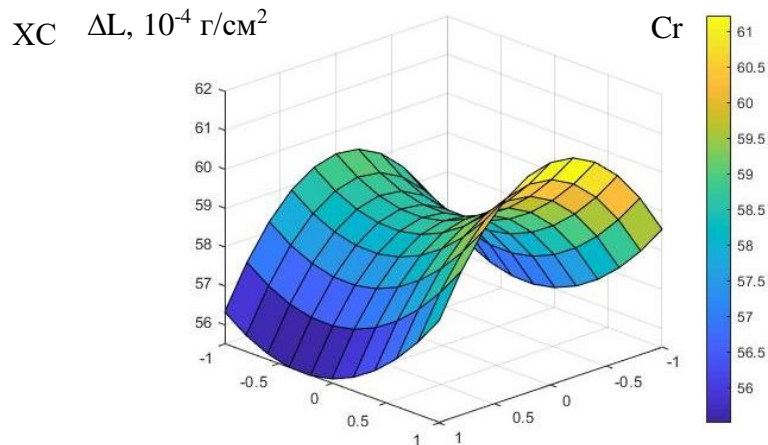


Рисунок 2.3 – Вплив вмісту XС та Cr в СВС–шихті на жаростійкість

Рекомендовані раціональні СВС–шихти для отримання жаростійких легованих АП представлені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – СВС–шихти для отримання жаростійких легованих ал на сталі 45

Покриття	Склад СВС–шихти, % мас.
Al–Si	20% XC + 27% Al + 12% Si + 36% Al ₂ O ₃ + 2% NH ₄ I + NH ₄ F;
Al–Ti	20% XC + 25% Al + 8% Ti + 42% Al ₂ O ₃ + 2% NH ₄ I + 3% AlF ₃ ;
Al–Cr	20% XC + 14% Al + 8% Cr + 53% Al ₂ O ₃ + 2% NH ₄ I + 3% AlF ₃ .

2.2. Термодинамічне моделювання в багатоконпонентних насичуючих середовищах при алітуванні в умовах СВС

Порошкові насичуючі шихти при алітуванні в умовах СВС мають у своєму складі хромисту складову, алюміній, транспортні активатори, а також титан, хром та кремній. Рівноважний склад СВС–шихт в режимі теплового самозапалювання розраховувався [16] для систем: XC + Al + Si + Al₂O₃ + NH₄I + AlF₃; XC + Al + Ti + Al₂O₃ + NH₄I + AlF₃; XC + Al + Cr + Al₂O₃ + NH₄I + NH₄F, для великого діапазону зміни вихідних компонентів в залежності від температури (рис. 2.4 – 2.12).

В результаті горіння порошкових сумішей з ТА можливе утворення газової фази, яка містить сполуки I, I₂, I₃, F₂, F₃, H, H₂, H₃, F, F₂, F₃, HF, H₂F з хімічними елементами. Зі збільшенням температури спостерігається збільшення кількості галогенідів.

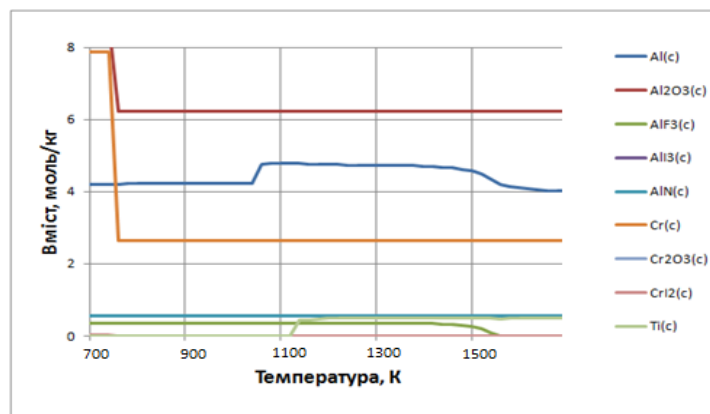
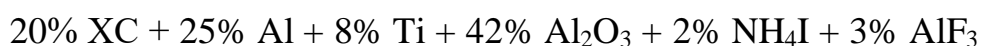


Рисунок 2.4 – Вміст конденсованих продуктів в реакторі в режимі теплового самозапалювання СВС–шихти для системи:



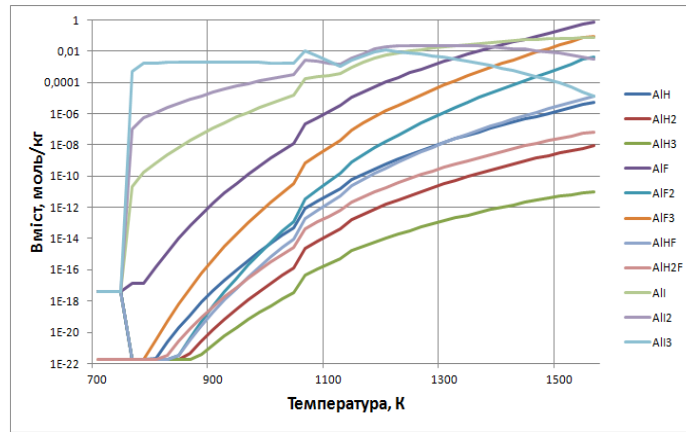


Рисунок 2.5 – Вміст газоподібних сполук алюмінію в реакторі, режим теплового самозапалювання СВС–шихти для системи:
 $20\% \text{XC} + 25\% \text{Al} + 8\% \text{Ti} + 42\% \text{Al}_2\text{O}_3 + 2\% \text{NH}_4\text{I} + 3\% \text{AlF}_3$

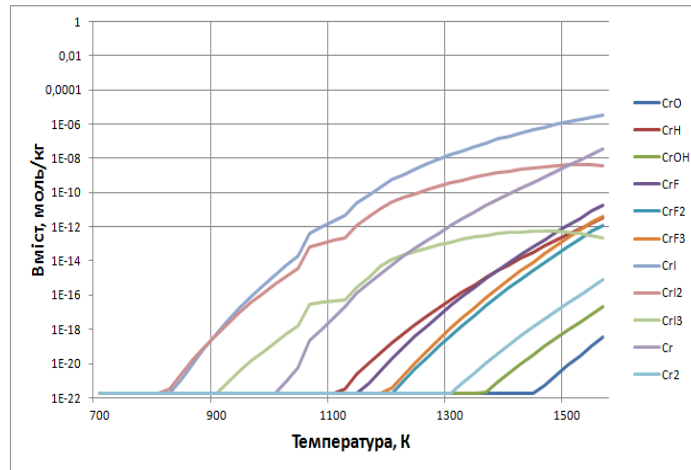


Рисунок 2.6 – Вміст газоподібних сполук хрому в реакторі, режим теплового самозапалювання СВС–шихти для системи:
 $20\% \text{XC} + 25\% \text{Al} + 8\% \text{Ti} + 42\% \text{Al}_2\text{O}_3 + 2\% \text{NH}_4\text{I} + 3\% \text{AlF}_3$

Це підтверджує можливість перенесення легуючих елементів для утворення покриттів. Також кількість продуктів в газоподібній фазі зростає і виділяються конденсовані продукти (рис. 2.4, 2.8, 3.8). Характерно, що в області температур 700–1500 К відбувається розпад продуктів реакції, що підтверджує поява продуктів розкладання та різке збільшення кількості молей газу.

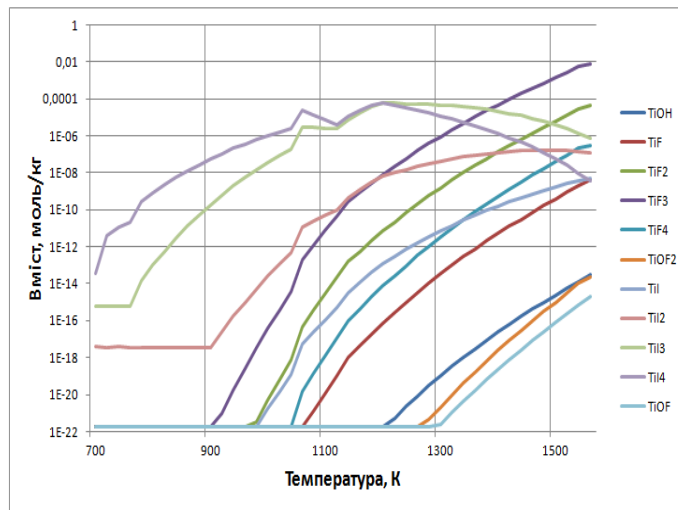


Рисунок 2.7 – Вміст газоподібних сполук титану в реакторі, режим теплового самозапалювання СВС–шихти для системи:
 $20\% \text{XC} + 25\% \text{Al} + 8\% \text{Ti} + 42\% \text{Al}_2\text{O}_3 + 2\% \text{NH}_4\text{I} + 3\% \text{AlF}_3$

Газоподібні продукти, взаємодіють з елементами порошкової системи (Al, Si, Ti, Cr) і переводяться в газову фазу (з'являються AlH , AlH_2 , AlH_3 , AlF , AlF_2 , AlF_3 , AlHF , AlH_2F , AlI , AlI_2 , AlI_3 , Cr , Cr_2 , CrO , CrH , CrOH , CrF , CrF_2 , CrF_3 , CrI , CrI_2 , CrI_3 , TiOH , TiF , TiF_2 , TiF_3 , TiF_4 , TiOF_2 , TiI , TiI_2 , TiI_3 , TiI_4 , TiOF і ін.).

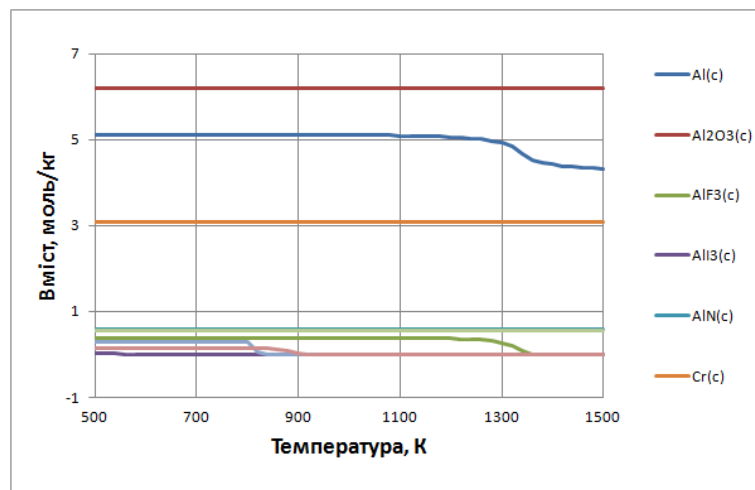
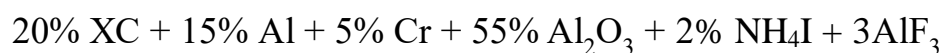


Рисунок 2.8 – Вміст конденсованих продуктів в реакторі, режим теплового самозапалювання СВС–шихти для системи:



При температурах вище 700 К частка конденсованої фази практично не змінюється. Цей факт дає підставу припустити, що в температурному інтервалі 700–1500 К відбуваються реакції з виділенням конденсованої фази, але без зміни числа молей, що характерно для реакцій розпаду, обміну з матеріалом, тобто по суті відбувається хімічний транспорт елементів. В діапазоні температур 400–1500 К є: AlH , AlH_2 , AlH_3 , AlF , AlF_2 , AlF_3 , AlHF , AlH_2F , Al , Al_2 , Al_3 і ін., вміст конденсованих сполук: Al(c) , $\text{Al}_2\text{O}_3(\text{c})$, $\text{AlF}_3(\text{c})$, $\text{Al}_3(\text{c})$, AlN(c) , Cr(c) , $\text{Cr}_2(\text{c})$, CrI(c) , Ti(c) і ін.

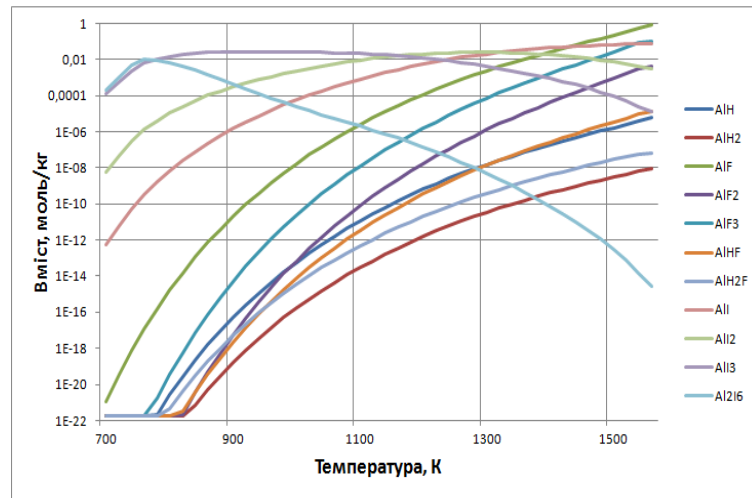


Рисунок 2.9 – Вміст газоподібних сполук алюмінію в реакторі, режим теплового самозапалювання СВС–шихти для системи:

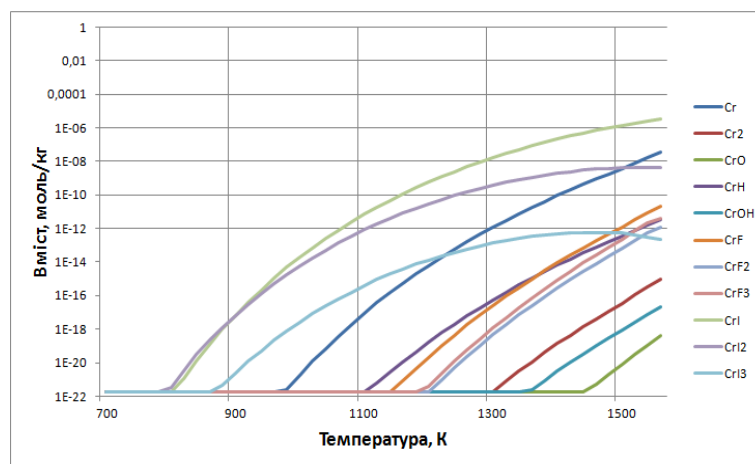
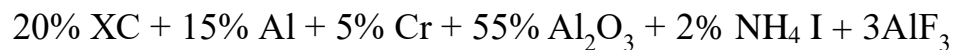
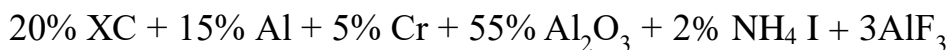


Рисунок 2.10 – Вміст газоподібних сполук хрому в реакторі, режим теплового самозапалювання СВС–шихти для системи:



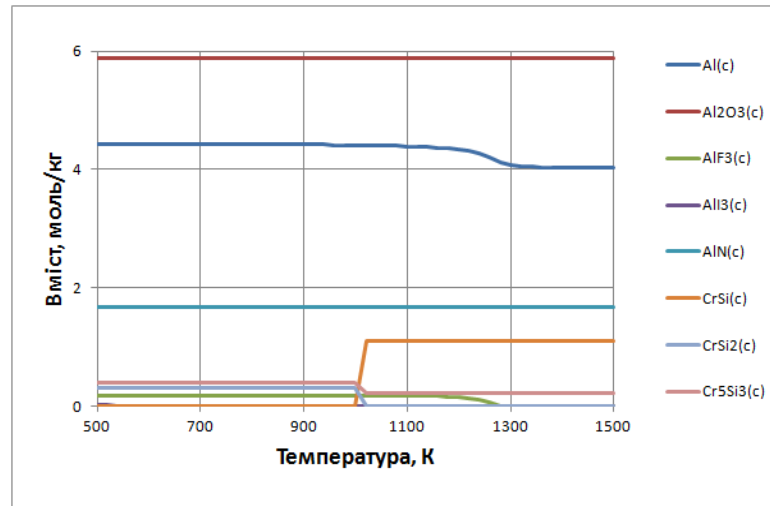


Рисунок 2.11 – Вміст конденсованих продуктів в реакторі, режим теплового самозапалювання СВС–шихти для системи:



Вміст газоподібних сполук титану в реакторі, режим теплового самозапалювання СВС–шихти для системи: 20% XC + 25% Al + 8% Ti + 42% Al₂O₃ + 2% NH₄I + 3% AlF₃ в діапазоні температур 400–15000 К є: TiOH, TiF, TiF₂, TiF₃, TiF₄, TiOF₂, TiI, TiI₂, TiI₃, TiI₄, TiOF і ін., а також вміст конденсованих продуктів: Al(c), Al₂O₃(c), AlF₃(c), AlI₃(c), AlN(c), Cr(c), Cr₂(c), CrI(c), Ti(c) і ін.

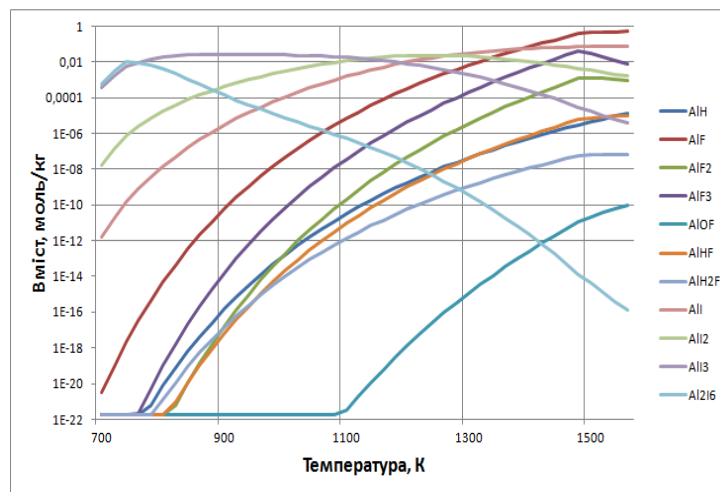


Рисунок 2.12 – Вміст газоподібних сполук алюмінію в реакторі, режим теплового самозапалювання СВС–шихти для системи:



Вміст газоподібних сполук алюмінію в реакторі, режим теплового самозапалювання СВС–шихти для системи: 20% ХС + 15% Al + 5% Cr + 55% Al_2O_3 + 2% NH_4I + 3 AlF_3 в діапазоні температур 400–15000 К є: AlH, AlH₂, AlF, AlF₂, AlF₃, AlHF, AlH₂F, AlI, AlI₂, AlI₃, Al₂I₆ і ін.

Вміст газоподібних сполук хрому: Cr, Cr₂, CrO, CrH, CrOH, CrF, CrF₂, CrF₃, CrI, CrI₂, CrI₃ і ін., а також вміст конденсованих продуктів: Al(c), Al₂O₃(c), AlF₃(c), AlI₃(c), AlN(c), Cr(c) і ін.

Вміст газоподібних сполук алюмінію в реакторі в режимі теплового самозапалювання СВС–шихти для системи: 20% ХС + 27% Al + 8% Si + 40% Al_2O_3 + 2% NH_4I + 3% NH_4F в діапазоні температур 400 – 1500 К є: AlH, AlF, AlF₂, AlF₃, AlOF, AlHF, AlH₂F, AlI, AlI₂, AlI₃, Al₂I₆ і ін. Вміст газоподібних сполук кремнію: SiH, SiH₂, SiH₃, SiF, SiF₂, SiF₃, SiHF, SiI, SiI₂, SiI₃, SiN і ін., а також вміст конденсованих продуктів: Al(c), Al₂O₃(c), AlF₃(c), AlI₃(c), AlN(c), CrSi(c), CrSi₂(c), Cr₅Si₃(c) і ін.

РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ДЛЯ ОБЛАДНАННЯ КОКСОХІМІЧНОГО ВИРОБНИЦТВА

3.1 Обладнання для отримання захисних покриттів в умовах СВС

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

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

1. Cr_2O_3 - оксид хрому (III) (ТУ 6-09-4272-84) - джерело хрому в покритті.
2. Al_2O_3 - оксид алюмінію (III) (ТУ 6-09-426-75) - інертна добавка.
3. MgB_{12} - поліборид магнію (ТУ 6-09-3558-78) - джерело бору в покритті.
4. Ti – титан марки ПТХ5-1(ТУ 113-12-132-83) – джерело Ti в ХЗП
5. NH_4F - фтористий амоній (ГОСТ 4463-76) -активатор процесу ХТО.
6. NH_4Cl – хлористий амоній (ГОСТ 3773-72) – активатор процесу ХТО

Нанесення захисних покриттів в умовах СВС, на деталі та зразки, здійснювали на установці, принципова схема якої наведена на рис. 4.1. Установка складається з наступних основних функціональних систем: реакційне обладнання, система газопостачання, система контролю і регулювання технологічними параметрами.

Обладнання складається з реакційного склянки (реактора) 12, на дно якого насипано шар піску 19, стабілізує рівень реакційної суміші 13. Кришка реактора являє собою кришку з вмонтованим по середині вхідним патрубком, сполученим з газовою магістраллю 6. Для зменшення теплових втрат і надійного фіксування термопар, реактор закривають зверху азбестового кришкою 10. Нагрівання реактора здійснювався в печі шахтного типу 9. Система газопостачання складається з балона 1 з інертним газом (аргон), який надходить в реакційний склянку 12 через редуктор 2, ресивер 3, вентиль 4, витратомір 5 і газову магістраль 6.

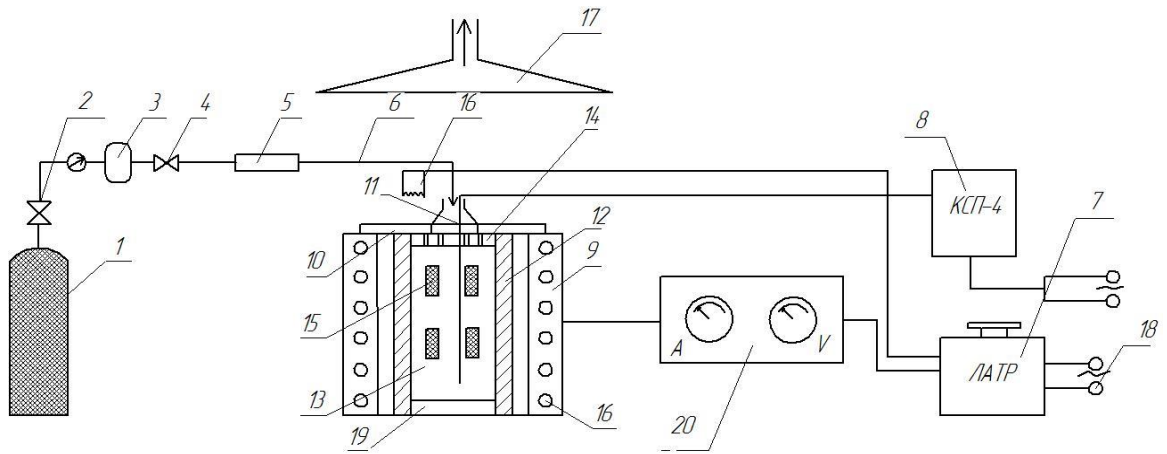


Рис. 3.1 - Принципова схема установки для нанесення покриттів в умовах СВС: 1 – газовий балон; 2 – редуктор; 3 – ресивер; 4 – вентиль; 5 – витратомір; 6 – газова магістраль; 7 – ЛАТР; 8 – регулятор температури КСП-4; 9 – електропіч; 10 – кришка реактора; 11 – термопара; 12 – реактор; 13 – реакційна суміш; 14 – пориста решітка; 15 – деталі; 16 – електроспираль; 17 – система утилізації газів; 18 – мережа; 19 – шар піску, 20 - амперметр і вольтметр.

Система контролю і регулювання технологічними параметрами: регулювання темпу нагріву реакційної суміші здійснювалося через регульований лабораторний автотрансформатор ЛАТР 7, який контролює потужність печі 9 і за допомогою вольтметра і амперметра 20; вимір температури проводилося регулятором температури «КСП-4» 8 з хромель-алюмель термопарами (ХТА) 11; зміна швидкості подачі інертного газу здійснювалося за допомогою вентиля 4, сполучених через газову магістраль 6 з витратоміром 5.

3.2 Корозійна стійкість покриттів у водних кислотних розчинах

Для підвищення корозійної стійкості необхідне покриття, що містить елементи, які утворюють пасивні плівки [17]. При випробуванні в 15%-водному розчині соляної кислоти найкращу стійкість показують АП, леговані хромом та титаном, що мають такі показники втрати маси: 22,4 і 20,5 г/м².

Результати корозійних випробувань за 8 діб, наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Корозійна стійкість сталі 45 з АП при дослідженні в водних кислотних середовищах.

Корозійне середовище	Вид покриття	Втрата маси (10^{-4} г/м ²)							
		Час випробування, доба							
		1	2	3	4	5	6	7	8
15% р-н HNO ₃	Без покриття	83	145	219	286	346	457	523	605
	Al–Si	5,5	10,3	17	22	26	30	34	37
	Al–Ti	6	12	18	23	27	32	37	42
	Al–Cr	5,3	10	14	17	22	27	32	36
15% р-н HCl	Без покриття	53	86	116	159	209	267	324	384
	Al–Si	6,4	9,8	11,2	14,3	17,6	20,2	24,3	27,1
	Al–Ti	5,7	8,9	10,6	12,7	14,8	16,3	18,5	20,5
	Al–Cr	6,1	10,2	11,9	13,6	15,6	18,2	20,1	22,4
15% р-н H ₂ SO ₄	Без покриття	56	89	124	153	186	216	241	267
	Al–Si	3,5	4,5	6,3	7,9	8,8	10,5	11,7	12,8
	Al–Ti	2,8	3,2	4,3	5,4	6,9	7,7	8,4	9,2
	Al–Cr	3,7	4,8	6,1	7,7	9,3	10,4	12,6	13,3

При випробуванні в 15%–водному розчині сірчаної кислоти найкращу стійкість показують АП, леговані кремнієм та титаном, що мають такі показники втрати маси: 12,8 і 9,2 г/м². При випробуванні в 15%–водному розчині азотної кислоти добру стійкість показують АП, леговані титаном та кремнієм, що мають показники: 42 і 37 г/м². Порівняльний аналіз корозійної стійкості захисних СВС–покриттів і отриманих в ізотермічних умовах ХТО, показує, що вони мають втрату ваги в 1,9–2,2 рази меншу.

Отримані результати можна пояснити утворенням на поверхні легованих фаз, що призводить до пасивації поверхні в агресивних середовищах. Також можна припустити вплив електрохімічного гальмування анодного розчинення металів при більш високій концентрації легуючих елементів легованих АП у порівнянні з покриттями отриманими в ізотермічних умовах, що свідчить про відсутність мікророзтріскування. Відомо [17], що механічні напруги (у даному випадку стискаючі залишкові напруги впливають на корозійну поведінку металів, внаслідок отримання конструкційним матеріалом додаткової енергії через те, що рівень залишкових напруг у покриттях, отриманих в умовах

теплого самозапалювання СВС–шихт вищий. В результаті чого зменшується ймовірність мікророзтріскування пасивних оксидних плівок, що призводить до підвищення корозійної стійкості. Порівняльний аналіз корозійної стійкості захисних СВС–покриттів і отриманих в ізотермічних умовах ХТО, показує, що вони мають втрату ваги в 1,9–2,2 рази меншу.

3.3. Жаростійкість отриманих захисних покриттів

Основним елементом всіх жаростійких покриттів є алюміній, який використовується для утворення захисної оксидної плівки $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ [18]. У дифузійних покриттях вміст алюмінію зазвичай знаходиться на рівні 15... 25%. Такий вміст алюмінію забезпечує формування плівки оксиду $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ при окисленні. Другим найважливішим компонентом покриттів є хром, який забезпечує формування плівки $\alpha\text{-Cr}_2\text{O}_3$. Вміст хрому в високотемпературних покриттях зазвичай знаходиться на рівні 7 ... 20%.

Суттєве значення має кремній, який вводять для підвищення жаростійкості при високотемпературному окисленні і сольовій корозії. Оскільки жаростійкість не залежить від структури, а визначається хімічним складом, то використання явища СВС дозволяє отримувати більш високий вміст легуючих елементів, таких як кремній, титан, хром, алюміній, що дозволяє підвищувати жаростійкість (рис. 3.2).

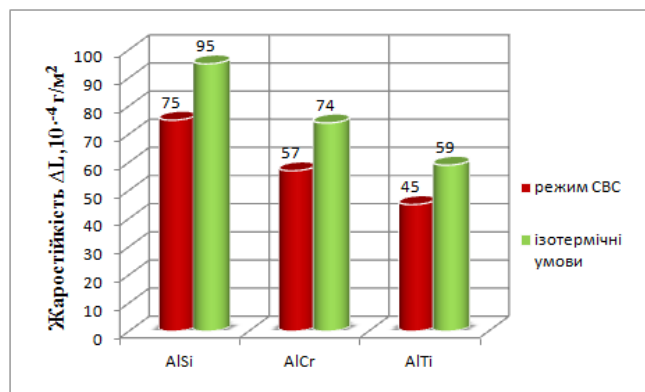


Рисунок 3.2 – Порівняльна характеристика жаростійкості АП, отриманих в режимі теплого самозапалювання СВС–шихт і в ізотермічних умовах ($t_{\text{вип}} = 900 \text{ }^\circ\text{C}$).

Леговані АП, отримані при ізотермічних умовах мають більш пористу поверхню (фаза FeAl), через яку кисень проникає до поверхні сталі. У порівнянні з покриттями, отриманими в ізотермічних умовах, жаростійкість легованих АП, отриманих в умовах СВС в 1,27–1,31 рази вища, що можна пояснити також і більш високою концентрацією хрому, алюмінію, кремнію й титану, які сприяють утворенню захисних оксидних плівок SiO_2 , TiO_2 , Cr_2O_3 , Al_2O_3 .

3.4 Промислове випробування отриманих покриттів

Отримані наукові результати дозволили розробити раціональний мало-відходний технологічний процес отримання легованих алітованих покриттів на конструкційних матеріалах, що дозволяє використовувати відпрацьовану шихту, в якості: баластового матеріалу для СВС–шихт, абразивного матеріалу для шліфування, порошкового матеріалу для напилення. Леговані хромом і титаном алітовані покриття (АП) і технологія їх отримання пройшли випробування в умовах ПрАТ «Запоріжжкокс». Отримані наукові результати найшли промислове випробування для зміцнення деталей коксогасильного вагону (рис. 3.3), який використовується для прийому з коксової печі спеченого коксу, перевезення його на гасіння (з метою припинення горіння і золоутворення).



Рисунок 3.3 – Плита коксогасильного вагону зміцнена в умовах СВС
 а) загальний вигляд вагону, б) плита без покриття(після застосування);
 в) плита з легованим титаном АП (після застосування)

Відкритий зверху кузов вагона являє собою металевий зварний каркас з похилим глухим підлогою. Кут нахилу підлоги (поду) 28° , що забезпечує повне сповзання коксу під час його розвантаження на рампу. Внутрішню бічну поверхню каркаса і поду вагона футерують знімними плитами товщиною 20–25 мм. Плити прикріплені до металоконструкцій каркаса болтами з головками урівень. Плити поду кузова укладаються вільно на спеціальні опори, що дозволяє проводити їх швидку заміну. Зазор між плитами (5–8 мм) забезпечує вільне їх розширення при нагріванні і стікання води і шламу в процесі гасіння коксу. Розроблені рекомендації були враховані під час модернізації футеровки зйомними плитами коксогасильного вагону (рис. 3.3, в).

Впровадження розробленого легованого хромом і титаном алітованого покриття, технологічного процесу його формування, і нанесення на плиту коксогасильного вагону може дозволити: підвищити жаростійкість у 2,1–2,7 рази; очікуваний економічний ефект від впровадження отриманих результатів досліджень складає орієнтовано 110000 грн./рік.

ВИСНОВКИ

1. У ході термодинамічного моделювання встановлено, що в діапазоні температур 700–1500 К продукти розкладання активаторів (AlF_3 , NH_4I , NH_4F) реагують із легуючими елементами, що входять до СВС–шихт з утворенням газоподібних з'єднань: AlH , AlF , AlHF , AlI , TiOH , TiF , TiOF_2 , TiI , TiOF , Cr , CrO , CrH , CrF , CrI , SiH , SiF , SiHF , SiI , SiN та ін. Зі збільшенням температури, кількість продуктів у газоподібній фазі зростає та виділяються конденсовані продукти: $\text{Al}(c)$, $\text{Al}_2\text{O}_3(c)$, $\text{AlF}_3(c)$, $\text{AlI}_3(c)$, $\text{AlN}(c)$, $\text{Cr}(c)$, $\text{Cr}_2(c)$, $\text{CrI}(c)$, $\text{Ti}(c)$, $\text{Al}(c)$, $\text{Al}_2\text{O}_3(c)$, $\text{AlF}_3(c)$, $\text{Ti}(c)$, $\text{Al}_2\text{O}_3(c)$, $\text{AlF}_3(c)$, $\text{AlI}_3(c)$, $\text{AlN}(c)$, $\text{CrSi}(c)$, $\text{CrSi}_2(c)$, $\text{Cr}_5\text{Si}_3(c)$.

2. Отримано показники жаростійкості алітованих покриттів, легованих хромом, кремнієм, та титаном на сталі 45. У порівнянні з покриттями отриманими в ізотермічних умовах жаростійкість легованих алітованих покриттів, отриманих в умовах СВС в 1,27–1,3 рази вища, що можна пояснити більш високою концентрацією хрому, алюмінію, кремнію і титану, які утворюють захисні оксидні плівки Cr_2O_3 , $\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$, TiO_2 .

3. Впровадження розробленого легованого хромом і титаном алітованого покриття, технологічного процесу його формування, і нанесення на плиту коксогасильного вагону може дозволити: підвищити жаростійкість у 2,1–2,7 рази; очікуваний економічний ефект від впровадження отриманих результатів досліджень складає орієнтовано 110000 грн./рік.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Серета Б.П., Калініна Н.Є., Кругляк І.В. Поверхнєве зміцнення матеріалів: Монографія – Запоріжжя: РВВ ЗДІА. – 2004. – 230 с.
2. Б.П. Серета, Л.П. Банніков, С.В. Нестеренко, О.С. Гайдаєнко, І.В. Кругляк, Д.Б. Серета. Поверхнєве зміцнення матеріалів працюючих в умовах комплексного впливу агресивних речовин: Кам'янське: ДДТУ, 2019. –173 с.
3. Б.П. Серета, І.В. Кругляк, Ю.О. Белоконь, Д.О. Кругляк, Д.Б. Серета Поверхнєве зміцнення конструкційних матеріалів з використанням композиційних насичуючих середовищ - ДДТУ, 2019. – 242с.
4. Sereda D. Obtaining of Boride Coatings under SHS Conditions for Car Parts./ Sereda D., Sereda B. //Material science and technology- 2016. Salt Lake City, Utah USA 2016-1339p.-P.945-948.
5. Бахвалов Г.Т. Защита металлов от коррозии. М: Металургия. 1964. 290 с.
6. Кошелев В.Н., Губенкова О.А. Исследование защитной способности пиролитических алюминиевых покрытий на стали 30ХГСА. *Авиационные материалы и технологии*. 2009. №1. С. 6–10.
7. Кудинов В. В., Иванов В. М. Нанесение плазмой тугоплавких покрытий. М.: Машиностроение, 1981. 192 с.
8. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Жаростойкие и теплозащитные покрытия для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД. *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. С. 60–70.
9. Синявский В.С., Семенов А.М. Оптимизация химического состава материала плакировки листов из сплава 1420 с целью защиты от коррозионных поражений. *Технология легких сплавов*. 2008. №2. С. 115–119.
10. Земсков Г.В., Артющенко Н.И. Осаждение алюминия из газовой фазы. *Защита металлов*. 1970. №4. С. 473–474.
11. Плихунов В.В., Петров Л.М. и др. Оборудование, технологии и методы контроля для осуществления комплексного подхода к формированию

многофункциональных покрытий и модифицированных слоев методом вакуумной ионно-плазменной обработки: материалы VIII науч. конф. по гидроавиации «Гидроавиасалон–2010». М.: ЦАГИ. 2010. С. 188–193.

12. Разуваев Г.А., Грибов Б.Г. и др. Металлоорганические соединения в электронике, М.: Наука, 1972. 479 с.
13. Коноваленко А. Д., Драгобецкий В. В. Новые направления развития СВС–технологий. *Системні технології*. 2003. № 6. С. 68–73.
14. Мержанов А.Г. Проблемы горения в химической технологии и металлургии. *Успехи химии*. – 1976. – С. 827-848.
15. Мержанов А.Г. Твердопламенное горение. М.: Торус Пресс. 2007. 336 с.
16. Термическая обработка в машиностроении / ред. Ю. М. Лахтина, А. Г. Рахштадта. М.: Машиностроение. 1980. 783 с.
17. Колотыркин Я.М. Металлы и коррозия. М.:Металлургия.1985. 88 с.
18. Поклад В.А., Шкретов Ю.П., Абраимов Н.В. Покрытия для защиты от высокотемпературной газовой коррозии лопаток ротора турбины ГТД. *Двигатель*. 2010. №4 (70). С. 4–8.