

ЗАСТОСУВАННЯ САМОПОШИРЮВАНОГО ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗУ В ТЕХНОЛОГІЯХ НАНЕСЕННЯ ЗНОСОСТІЙКИХ ПОКРИТТІВ

Д.Л. Луцак, Я.А. Криль, О.В. Пилипченко

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 727177,
e-mail: d.l.lutsak@gmail.com

Проведено аналіз напрацювань щодо використання самопоширюваного високотемпературного синтезу у технологіях нанесення зносостійких покриттів, які представлені у літературі, їх систематизацію та окреслення перспективних напрямків розвитку даних технологій. Визначено переваги самопоширюваного високотемпературного синтезу у порівнянні з традиційними технологіями отримання матеріалів та технічну ефективність його використання у технологіях нанесення зносостійких покриттів. Проведено класифікацію методів застосування самопоширюваного високотемпературного синтезу в технологіях нанесення зносостійких покриттів, до якої включено застосування різного виду вихідних матеріалів, отриманих методом самопоширюваного високотемпературного синтезу, та суміщення процесу нанесення покриттів із синтезом матеріалів покриттів методом самопоширюваного високотемпературного синтезу. Встановлено, що широкі перспективи відкриває метод суміщення процесів самопоширюваного високотемпературного синтезу із одночасним нанесенням покриттів, оскільки дозволяє об'єднати в собі переваги як самопоширюваного високотемпературного синтезу, так і переваги конкретної технології нанесення покриття.

Ключові слова: СВС, наплавлення, напылення, електроискрове легування.

Проведен анализ наработок по использованию самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в технологиях нанесения износостойких покрытий, представленных в литературе, их систематизацию и определение перспективных направлений развития данных технологий. Определены преимущества самораспространяющегося высокотемпературного синтеза по сравнению с традиционными технологиями получения материалов и техническая эффективность его использования в технологиях нанесения износостойких покрытий. Проведена классификация методов применения самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в технологиях нанесения износостойких покрытий, в которую включены применение различного вида исходных материалов, полученных методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, и совмещение процесса нанесения покрытий с синтезом материалов покрытий методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Установлено, что широкие перспективы открывает метод совмещения процессов самораспространяющегося высокотемпературного синтеза с одновременным нанесением покрытий, поскольку он позволяет объединить в себе преимущества как самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, так и преимущества конкретной технологии нанесения покрытия.

Ключевые слова: СВС, наплавка, напыление, электроискровое легирование.

The article deals with the analysis of the represented in literature works on using self-propagating high-temperature synthesis in hardfacing technology, their arrangement and specification of promising direction for development of these technologies. Advantages of self-propagating high-temperature synthesis were determined in comparison with traditional technologies for materials production and technical efficiency of its use in hardfacing technology. The authors of the article classified the methods for application of self-propagating high-temperature synthesis in hardfacing technology, which includes the use of various types of source materials, obtained with the help of self-propagating high-temperature synthesis, and combination of coating process with the synthesis of coating materials by means of self-propagating high-temperature synthesis. It was established that method for combining of self-propagating high temperature synthesis processes presents a significant opportunities with simultaneous coating as it allows to unite the advantages both self-propagating high-temperature synthesis and benefits of a particular coating technology.

Key words: SHS, surfacing, coating, electrospark alloying.

Вступ

Передумовою отримання нових матеріалів з оптимальним комплексом ефективних властивостей є розроблення 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 самопоширюваного високотемпературного синтезу (СВС), суть якої полягає у прохо-

дженні прямого синтезу цінних в практичному відношенні сполук в екзотермічних реакціях між певними хімічними елементами [1-4].

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 [5], на сьогоднішній день СВС уже знайшов широке використання в цілому ряді промислових галузей, серед яких машинобудування, металургія, хімічна промисловість, електротехніка, електронна промисловість та ін. [1-3, 5-7].

Одним з найбільш перспективних напрямків, де знаходить своє застосування реалізація явища СВС, є сучасні технології нанесення захисних покриттів, в тому числі зносостійких [1-3, 5, 8-14].

Цілями даної роботи є аналіз напрацювань щодо використання СВС у технологіях нанесення зносостійких покриттів, які представлені у літературі, їх систематизація та окреслення перспективних напрямків розвитку даних технологій.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій

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 [1]:

$$\sum_{i=1}^m a_i X_i + \sum_{j=1}^n b_j Y_j = Z + Q,$$

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.

Оскільки реакції СВС супроводжуються інтенсивним світловиділенням, високими температурами та протікають у таких же швидких режимах, як і розповсюдження хвиль горіння [1, 2], 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 [4].

При вивченні СВС загалом вимірюються і розраховуються різні характеристики процесу: лінійні і масові швидкості горіння, максимальні температури, температурні профілі, теплові ефекти, межі стійкості фронту горіння та ін.

Основна увага в експериментальних і теоретичних дослідженнях СВС приділяється безгазовому і фільтраційному горінню (горінню сумішей металів і неметалів та горінню металів в газоподібному середовищі – N₂, H₂ та ін.). У обох випадках в ході горіння утворюються тільки конденсовані продукти, при цьому в хвилі горіння може розвиватися висока температура (до 3000 К), [11-14, 16, 18].

Деякі особливості безгазового горіння виявляються і описуються з використанням класичних законів кінетики [1,2] у так званій простій теорії безгазового горіння [3], яка ґрунтується на наступній елементарній моделі процесу [4]:

1) поле температур в хвилі горіння одновимірне; температурні неоднорідності, пов'язані з гетерогенністю системи, несуттєві;

2) дифузійне перенесення продукту горіння у напрямі поширення фронту відсутнє, що є наслідком малості числа Льюїса:

$$Le = \frac{D}{a} \ll 1,$$

де D – коефіцієнт дифузії;

a , м²/с – коефіцієнт температуропровідності.

3) швидкість тепловиділення визначається законами, справедливими для гомогенних реакцій:

$$\Phi(T, \eta) = K_0 e^{-\frac{E}{RT}} (1-\eta)^n,$$

де E – енергія активації;

K_0 – передекспоненціальний фактор;

n – порядок реакції.

Речовина в зоні тепловиділення не зазнає фазових перетворень;

4) фізичні параметри: густина ρ , коефіцієнт теплопровідності λ , питома теплоємність c – не змінюються в ході процесу. Система рівнянь, що описує процес горіння в даному випадку, має вигляд:

$$c \rho \frac{dT}{dt} = \lambda \frac{d^2 T}{dx^2} + Q \rho \Phi(T, \eta);$$

$$\frac{d\eta}{dt} = \Phi(T, \eta),$$

де Q – тепловий ефект;

ρ – густина речовин;

η – глибина перетворення початкових речовин в кінцеві;

t – час;

$\Phi(T, \eta)$ – кінетична функція.

Закономірності поширення фронту хвилі горіння в процесах СВС є численними і піддаються управлінню за допомогою різних параметрів, наприклад, за рахунок зміни співвідношення реагентів, варіювання мірою розбавлення шихти інертними продуктами, підігрівання шихти та ін. Вплив вказаних параметрів на швидкість поширення фронту здійснюється переважно через зміну температури горіння. Прийомом пониження температури горіння в процесах СВС є розбавлення початкових речовин продуктами згорання, а прийомом підвищення – попереднє підігрівання шихти.

Технології із застосуванням явища СВС відрізняються між собою багатьма параметрами, серед яких: типи хімічних реакцій і процесів, зовнішній вплив, види вихідної сировини, структура шихти, морфологія продуктів і способи їх обробки чи переробки, призначення кінцевої продукції.

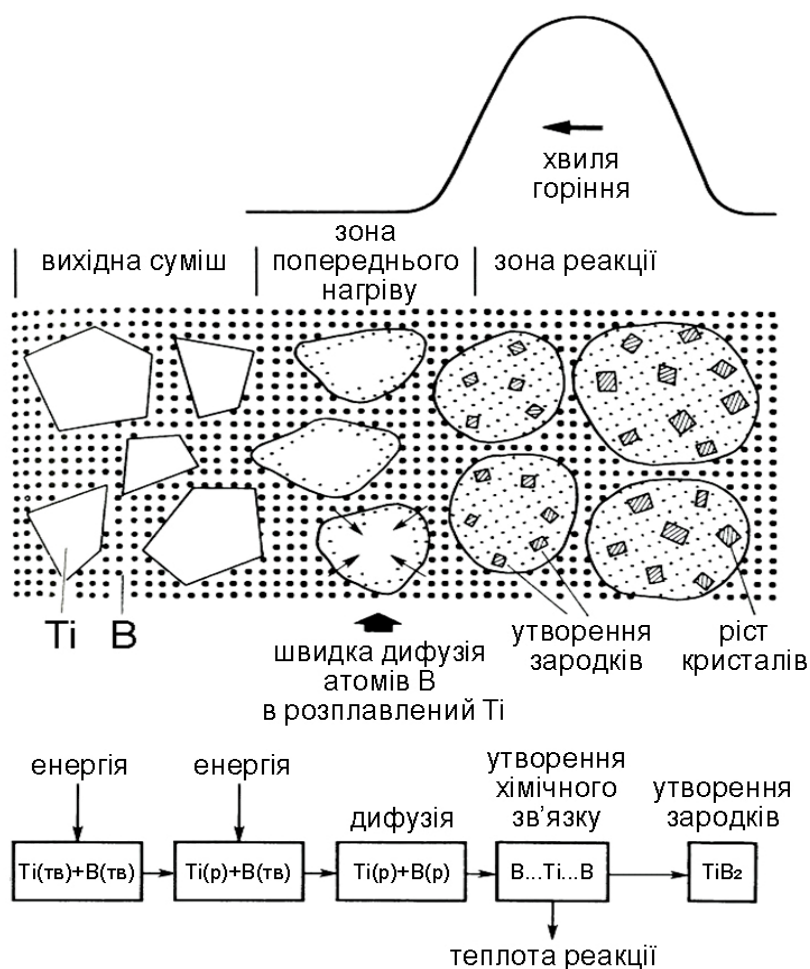


Рисунок 1 – Модель процесу СВС з утворенням дибориду титану [2]

Розглянемо механізм проходження СВС на прикладі системи Ti-B (рисунок 1). Адіабатична температура горіння порошкової суміші Ti-B становить 3190K. Після ініціації процесу СВС в суміші реагентів виникає хвиля горіння, якій передують зона з високою температурою, де проходить нагрівання та хімічна взаємодія елементів. Ця зона переміщується вздовж порошкової суміші, залучаючи в реакцію прилеглі шари. При нагріванні в даній системі проходить розплавлення металу (Ti) з подальшою швидкою дифузійною неметалічного реагенту (B), в результаті чого утворюється нова сполука (TiB_2), що виділяється в окрему фазу.

Розплав металічного титану змочує поверхню частинок бору за рахунок ефекту капілярного розтікання, після чого всередині фази розплаву і на границі розплаву з частинками бору виникають мікрочастинки TiB_2 , які в подальшому перекристалізуються та починають рости. За аналогічним механізмом протікає синтез дибориду цирконію та карбіду титану [2]. Процес утворення зародків кристалів, їх число та розміри можуть корегуватись введенням спеціальних домішок в систему до ініціації процесу СВС.

В рамках проведених робіт щодо вивчення та впровадження СВС як новітньої технології в промислових масштабах було розроблено по-

над 30 технологічних різновидів на основі СВС, які можна об'єднати в шість основних технологічних типів (таблиця 1). Як буде показано нижче, чотири з даних шести технологічних типів, знаходяться прямо чи опосередковане застосування в технологіях нанесення захисних покриттів.

Широке використання СВС в різних галузях можливе завдяки наявності суттєвих переваг СВС у порівнянні з традиційними технологіями отримання матеріалів [1-2], серед яких виділяють:

- 1) високу технологічну продуктивність завдяки високій швидкості проходження СВС;
- 2) значну економію електроенергії за рахунок використання хімічної енергії реагентів;
- 3) можливість отримання більш чистих та однорідних матеріалів завдяки високій температурі процесу та відсутності контакту зі стінками тигля;
- 4) простоту технологічного обладнання, викликану мінімальною кількістю вимог або, подекуди, взагалі їхньою відсутністю, до середовищ проходження СВС;
- 5) проходження ефекту самоочищення – термодесорбції летючих домішок та відновлення оксидних плівок на металах під час синтезу, внаслідок чого отримувані продукти синтезу, як правило, є чистішими, ніж вихідні реагенти;

Таблиця 1 – Основні технологічні типи СВС-технологій

Назва технологічного типу	Характерні ознаки
хімічний синтез	проводиться з метою синтезу продуктів у вигляді спеків з подальшим їх переробленням та використанням як півфабрикатів
СВС-спікання	дає змогу отримати готові вироби із заданими розмірами та формою, які, як правило, володіють високою пористістю
силове СВС-компактування	дає змогу отримати готові вироби із заданими розмірами та формою, які позбавлені високої пористості
СВС-лиття	вироби отримуються за рахунок застосування металургійних операцій (кристалізації злитків, литтю в форми, наплавленні, центробіжному литтю і т.п.) до продукту синтезу, який утворюється у вигляді розплаву
СВС-зварювання	дозволяє отримувати нероз'ємні зварні з'єднання тугоплавких матеріалів між собою, а також тугоплавких матеріалів з більш легкоплавкими матеріалами
газотранспортна СВС-технологія	дозволяє отримувати тонкі захисні покриття товщиною 10-100 мкм за допомогою газотранспортних добавок, які виконують функцію переносу реагентів

б) можливість отримання багатокомпонентних продуктів протягом однієї технологічної стадії виробництва.

На даний час СВС найбільш широко застосовується в хімічних системах, які утворюють неорганічні тугоплавкі матеріали. Ця особливість пов'язана з тим, що в силу високих значень температур, які необхідні для синтезу таких сполук, ефективність СВС в даних системах є найбільш значною.

Всі шість типів СВС-технологій (див. таблицю 1) ґрунтуються на єдиному принципі. Узагальнену схему СВС-технологій представлено на рисунку 2. Даний технологічний процес є трьохстадійним – підготовка сировини, синтез, переробка продукту. Головна особливість полягає в тому, що основна стадія проводиться в режимі СВС.

Класифікація методів використання СВС в технологіях нанесення зносостійких покриттів

До числа галузей техніки, де знаходить своє широке використання реалізація явища СВС, відноситься широкий ряд технологій нанесення захисних покриттів, включаючи напилення, наплавлення, електроіскрове легування, дифузійне насичення та інші [1-3, 5, 8-14]. При цьому необхідно зауважити, що використання СВС в даних технологіях можливе двома принципово відмінними методами:

1) застосування різного виду вихідних матеріалів (порошкових, електродних та ін.), в тому числі композиційних, отриманих методом СВС;

2) суміщення процесу нанесення покриттів із синтезом матеріалів покриттів методом СВС.

Таким чином, в першому випадку СВС застосовується тільки на стадії виготовлення вихідних матеріалів хімічним синтезом, розширюючи їх перелік та забезпечуючи економічність і якість отримуваних сполук. Також авторами [9] зазначається, що у випадку застосу-

вання порошкових СВС-матеріалів можна відійти від використання механічних сумішей порошків, що в кінцевому підсумку покращує однорідність нанесених покриттів.

Метод силового СВС-компактування дозволяє проводити прямий синтез виробів з визначеними розмірами та формами. Прикладом цього є виготовлення вихідних матеріалів для електроіскрового легування у вигляді електродів, використання яких дозволяє підвищити зносостійкість в 2-4 рази та зменшити коефіцієнт тертя до 25% у порівнянні зі стандартними електродами із твердих сплавів на основі карбиду вольфраму (групи ВК і ТК), отриманих методом порошкової металургії [14].

Зведений перелік використання продуктів СВС для нанесення зносостійких покриттів із зазначенням технологій нанесення наведено у таблиці 2.

Значно ширші перспективи відкриває метод суміщення процесів СВС із одночасним нанесенням покриттів в один технологічний цикл, оскільки дозволяє об'єднати в собі переваги як СВС, так і переваги конкретної технології нанесення покриття.

Одним з найбільш вдалих прикладів такого суміщення є технологія відцентрового СВС-лиття або реакційного наплавлення із використанням порошкових сумішей термітного типу [2, 15-19]. Дана технологія дозволяє отримувати керамічні та металокерамічні покриття товщиною до 3 мм на внутрішніх поверхнях металевих труб довжиною до 5,5 м [2]. Вплив відцентрових сил сприяє видаленню газів із продуктів реакції на стадії розплавлення та забезпечує рівномірне формування покриття за товщиною по всій поверхні. Таким чином, суміщення в даній технології відцентрового лиття із проходженням СВС дає змогу отримувати високоякісні покриття із унікальними експлуатаційними показниками. Труби з такими покриттями широко застосовуються в енергетичній, вугільній, металургійній, гірничій, атомній га-

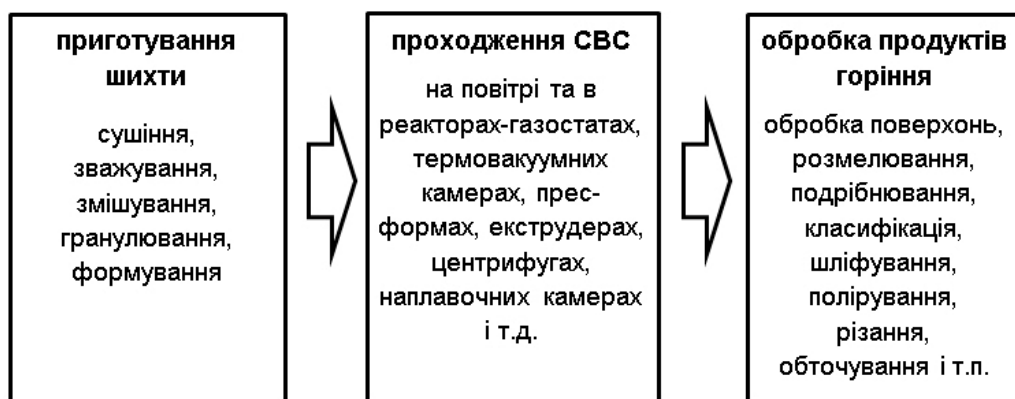


Рисунок 2 – Узагальнена блок-схема СВС-технологій

Таблиця 2 – СВС-матеріали для нанесення зносостійких покриттів

Марка матеріалу	Технологія нанесення	Склад, мас. %	Твердість покриття
NCT-55	ГТН	NiCr/55%TiC	680-990 HV
FCT-50	ГТН	Fe/50%TiC	680-1300 HV
ASCT-50	ГТН	AlSi/50%TiC	340-430 HV
NAA-40	ГТН	NiAl/40%Al ₂ O ₃	350-575 HV
NCC-NCT 70-30	ГТН	25%NiCr/75% (70%Cr ₃ C ₂ –30TiC)	710-1100 HV
FA-15	ГТН	FeAl/15% Al ₂ O ₃	390-730 HV
NCC-75	ГТН	NiCr/75% Cr ₂ O ₃	670-920 HV
СТИМ-20Н	ЕІЛ	TiC/20%Ni	9,9 ГПа
СТИМ-ЗБ	ЕІЛ	TiC/Cr ₃ C ₂ /Ni	HRC 36...60

Примітка: ГТН – газотермічне напилення; ЕІЛ – електроіскрове легування

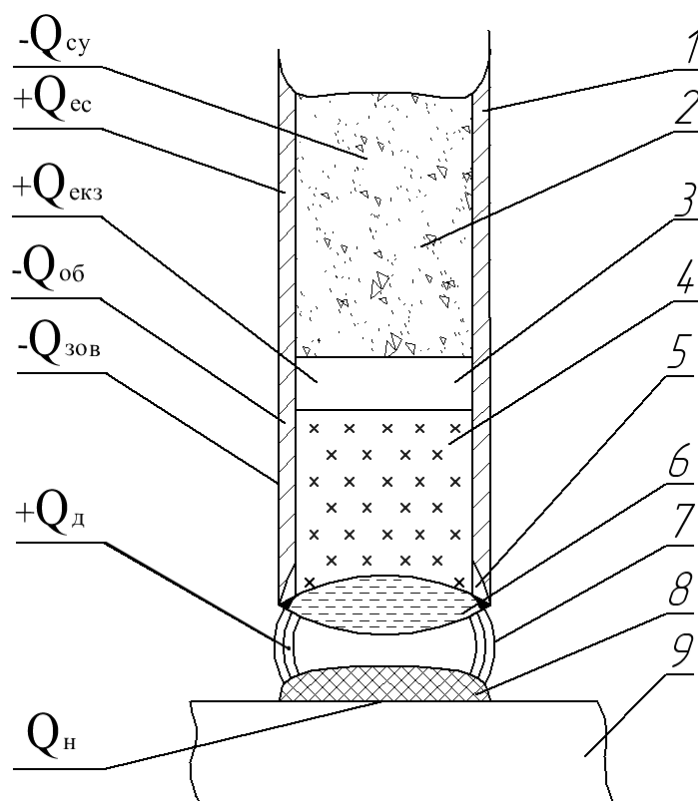
люзах промисловості для транспортування високоабразивних мас, таких як вугільний порошок, вапнякова мука, шлакові відходи тощо [21].

Суміщення процесу СВС із технологіями газотермічного та плазмового напилення також дає можливість покращити якість отримуваних покриттів завдяки збільшенню термічної активності напилюваних частинок та підвищенню міцності зчеплення напиленого покриття з основою [9, 22]. Так, при газотермічному напиленні композиційного порошку SiO₂-Ni-AlSiMg з проходженням синтезу продуктів Al₂O₃, MgAl₂O₄, Mg₂Si, NiAl₃ в матриці Al-Si можна спостерігати підвищення твердості від 300 до 700 HV, при цьому температура основи підвищується від 190 до 550 °C [9].

Процедура нанесення покриттів методом газотранспортної СВС-технології досить проста і використовується для нанесення тонких покриттів (5-150 мкм). В суміш вводять газотранспортні добавки (наприклад, йод) і деталі, на які необхідно нанести покриття; після проходження хвилі горіння частина продукту цього процесу утворює на поверхні деталі покриття у вигляді плівки. Такий варіант технології особливо перспективний для нанесення знос- і корозійностійких покриттів на малогабаритні деталі складної форми. На даний час вказану технологію використовують для нанесення покриттів на різальні пластини, кондукторні втулки, фільтри та інші деталі [23].

Автори робіт [12-13] вказують на перспективність суміщення СВС із технологією дифузійного насичення у вакуумі, оскільки екзотермічність процесу стимулює дифузійні процеси в перехідній зоні покриття з поверхнею. При цьому зазначається, що таке суміщення відкриває широкі можливості створення на конструкційних матеріалах багатофункціональних комплексних покриттів, які здатні забезпечити суттєве підвищення експлуатаційних характеристик робочих поверхонь деталей машин та механізмів. Пропонований метод отримання комплексних багатоцільових захисних покриттів володіє відносно високою продуктивністю, безвідходністю та екологічною чистотою.

Суміщення СВС із електродуговим нанесенням зносостійких покриттів має ряд особливостей. Так, автори [24] розглядають принципову можливість такого суміщення при роздільному введенні легуючих елементів в шихту порошкового електроду, які реагують між собою під впливом теплоти, що виділяється електричною дугою. Порівнюючи мікроструктуру таких покриттів із покриттями, отриманими при комплексному методі легування, коли в шихту вводяться готові хімічні сполуки, автори приходять до висновку, що більшою зносостійкістю володіють покриття, отримані саме при комплексному методі легування, оскільки він забезпечує більш повний перехід карбідної фази у покриття та сприяє подрібненню зерен наплавленого шару.



1 – оболонка електроду; 2 – порошкова суміш; 3 – зона синтезу; 4 – синтезований кермет; 5 – місце пропалвлення оболонки; 6 – крапля розплавленого металу; 7 – електрична дуга; 8 – наплавлений шар; 9 – деталь; енергія, що виділяється: $Q_{об}$ – при горінні електричної дуги; $Q_{екз}$ – при СВ-синтезі; $Q_{ес}$ – при проходженні електричного струму; енергія, що поглинається: $Q_{н}$ – при розплавленні поверхневого шару деталі і наплавлюваного матеріалу; $Q_{су}$, $Q_{об}$, $Q_{зов}$ – на нагріві відповідно, порошкової суміші, оболонки електроду, зовнішнього середовища

Рисунок 3 – Схема процесу електродугового наплавлення порошковим електродом (стрічкою) з одночасним проходженням СВС тугоплавких сполук [24]

Для нанесення покриттів методом СВС пропонується проводити екзотермічну реакцію вихідних компонентів в трубчастому електроді, ініціюючи її дією теплової енергії електричної дуги. В цьому випадку нанесення покриття із утворених тугоплавких сполук буде проходити з одночасним розплавленням металевої оболонки в процесі електродугового наплавлення. Схему такого методу наплавлення представлено на рисунку 3. Самопоширюваний високотемпературний синтез протікає вздовж електроду від енергії, що виділяється в результаті взаємодії шарів порошкової суміші ($Q_{екз}$). При цьому на характер розповсюдження хвилі реакції впливає як енергія, що виділяється при горінні електричної дуги $Q_{д}$ і при проходженні електричного струму $Q_{ес}$, так і енергія, що поглинається на розплавлення поверхневого шару деталі і наплавлю вального матеріалу $Q_{н}$, на нагрівання порошкової суміші $Q_{сум}$, оболонки електроду $Q_{об}$ і зовнішнього середовища $Q_{зов}$.

Зона синтезу 3 (рисунок 3) розповсюджується вздовж порошкової суміші 2, засипаної в оболонку 1. В результаті реакції утворюються тугоплавкі сполуки, спечені в щільний кермет 4 і проходить плавлення оболонки в місцях 5. В зоні горіння електричної дуги 7 оболонка роз-

плавляється з утворенням краплі 6, яка наноситься на деталь 9 у вигляді наплавленого шару 8. Відстань від хвилі синтезу до електричної дуги обумовлена співвідношенням між енергіями, що виділяються та поглинаються. Наближене співвідношення між притоками тепла, викликаного електричним струмом, екзотермічною реакцією та електричною дугою, відповідно рівне $Q_{ес} : Q_{екз} : Q_{д} = 1 : 50 : 1000$. Очевидно, що конкретне співвідношення між вказаними енергіями залежатиме від різних факторів, в тому числі від ентальпії утворення сполук, електричного опору оболонки, режимів наплавлення та ін. Енергія, що виділяється, поглинається в наступних процесах: при розплавленні поверхні деталі і наплавлю вального матеріалу; при нагріванні порошкової суміші до температури синтезу; при нагріванні оболонки електроду і зовнішнього середовища.

Враховуючи потужність теплових потоків та області їх виділення і поглинання, можна прийти до висновку, що на швидкість розповсюдження хвилі синтезу буде впливати, в основному, співвідношення між енергією екзотермічної реакції та енергією, що поглинається металевою оболонкою. Енергії $Q_{ес}$ та $Q_{д}$, що виділяються, здійснюють незначний вплив на

швидкість синтезу: перша – внаслідок відносно низької потужності виділення; друга – внаслідок своєї віддаленості. Переважаюче значення $Q_{об}$ в переліку енергій, що поглинаються, пояснюється значною теплопровідністю металеві оболонки, що обумовлює високу швидкість відбору теплової енергії.

Хвиля СВС може знаходитись на відстані 5-30 мм від гарячого кінця електрода. В окремих випадках спостерігається розповсюдження СВС по всій довжині електрода, після ініціювання його електричною дугою. Характер проходження реакції залежить від теплопровідності та теплоємності оболонки, а також від ентальпії утворення тугоплавких сполук вибраної порошкової суміші. Зміна теплоємності металеві оболонки дозволяє регулювати як швидкість розповсюдження хвилі синтезу, так і відстань зони реакції від зони горіння електричної дуги. Найбільш доступний спосіб зміни теплоємності електрода – вибір певної товщини його оболонки. Однак слід враховувати, що при зниженні товщини оболонки електрода до 0,1-0,2 мм спостерігається її розплавлення під дією виділеної в процесі екзотермічної реакції теплоти. Тому металева оболонка повинна бути достатньо товстою, щоб унеможливити прогар і достатньо тонкою, щоб енергія, виділена при проходженні СВС не поглиналась повністю металом оболонки.

Натомість автори роботи [15] стверджують, що роздільний метод легування при електродуговому наплавленні володіє рядом переваг в порівнянні із комплексним, та дозволяє отримати покриття, які володіють кращими фізико-механічними властивостями, в тому числі й зносостійкістю. В роботі [20] вказується, що при використанні роздільного методу легування спостерігається значний екзоэффект при взаємодії компонентів шихти та більша об'ємна доля частинок карбиду титану, ніж у покриттях, отриманих комплексним методом легування. Автори пояснюють це тим, що в процесі формування структури при роздільному методі легування степінь переходу компонентів в покриття значно більша, оскільки в цьому випадку відсутньою є додаткова стадія дисоціації карбідної складової, а втрати порошку є меншими через спливання його на поверхню наплавочної ванни.

Таким чином, відомості, які приведені в літературі, щодо суміщення СВС із електродуговим методом нанесення покриттів є неоднозначними та подекуди частково протилежними за своїми твердженнями. Це, в свою чергу, свідчить про те, що суміщення СВС із електродуговим методом нанесення покриттів потребує додаткового вивчення задля більш детального уточнення механізму формування тугоплавких сполук та впливу його параметрів на кінцеві властивості отримуваних покриттів.

Висновки

На основі проведеного літературного огляду сформовано перелік основних переваг СВС у порівнянні з традиційними технологіями

отримання матеріалів серед яких висока температура та швидкість проходження процесу, використання більш дешевої хімічної енергії замість електричної, простота та довговічність обладнання. Визначено основні сфери застосування СВС в промислових технологіях, в тому числі технологіях нанесення захисних покриттів. Розглянуто СВС-матеріали для нанесення зносостійких покриттів.

Наукова новизна роботи полягає у запропонованій авторами класифікації використання СВС в технологіях нанесення захисних покриттів за критерієм суміщення СВС з конкретною технологією нанесення.

В практичному значенні значно ширші перспективи відкриває метод суміщення процесів СВС із одночасним нанесенням покриттів, оскільки дозволяє об'єднати в собі переваги як СВС, так і переваги конкретної технології нанесення покриття.

Визначено, що суміщення СВС із електродуговим методом нанесення покриттів потребує додаткового вивчення задля більш детального уточнення механізму формування тугоплавких сполук та впливу його параметрів на кінцеві властивості отримуваних покриттів.

Література

- 1 Мержанов А.Г. Твердопламенное горение / А.Г. Мержанов, А.С. Мукасьян. – М.: Торус Пресс. – 2007. – 336 с.
- 2 Коидзуми М. Химия синтеза сжиганием. – М.: Мир. – 1998. – 247 с.
- 3 Мержанов А.Г. Концепция развития СВС как области научно-технического прогресса. – Черногородка: Территория. – 2003. – 367 с.
- 4 Кузнецов М.В. Огненные технологии или СВС / М.В. Кузнецов, Ю.Г. Морозов // Химия и жизнь. – 2004. – №1. – С. 16-19.
- 5 Коноваленко А.Д. Новые направления развития СВС-технологий / А. Д. Коноваленко, В. В. Драгобецкий // Систем. технології. – 2003. – № 6. – С. 68-73.
- 6 Зозуля В.Д. Новые триботехнические СВС-материалы / В.Д. Зозуля // Наука производству. – 1997. – № 1. – С. 43 – 47.
- 7 Мержанов А.Г. СВС-абразивы: производство, свойства, применение. / А.Г. Мержанов, В.К. Прокудина, Н.С. Песоцкая // Наука производству. – 1998. – № 8(10). – С. 1-12.
- 8 Витязь П.А. Получение порошков методом СВС / Витязь П.А., Ильющенко А.Ф., Талако Т.Л., Лецко А.И. // 50 лет порошковой металлургии Беларуси. История, достижения, перспективы. – Минск, 2010. – С. 112-125.
- 9 Борисова А. Л. Использование процессов самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в технологии газотермического напыления покрытий / А. Л. Борисова, Ю. С. Борисов // Порошковая металлургия. – 2008. – № 1(2). – С. 105-125.
- 10 Прибытков Г.А. СВС композиционные порошки карбид титана – связки из сплавов на основе железа для наплавки износостойких покрытий / Г.А. Прибытков, М.Н. Храмогин,

- В.В. Коржова // Физическая мезомеханика. – 2006. – № 9(1). – С. 185-188.
- 11 Архипов В.Е. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез и его возможные применения / В.Е. Архипов, Г.В. Москвитин, А.Н. Поляков // Вестник научно-технического развития. – 2010. – № 8(36). – С. 8-11.
- 12 Середа Б.П. Исследование поверхностного упрочнения чугунов в условиях самораспространяющегося высокотемпературного синтеза / Б. П. Середа, С. Н. Ткаченко // Металлургия: наука та праця ЗДІА. – Запоріжжя: РВВ ЗДІА, 2010. – № 22. – С. 129-134.
- 13 Змий В.М. Влияние активатора, жидких сред и процесса СВС на получение в вакууме комплексных защитных покрытий на конструкционных материалах / В.М. Змий, С.Г. Руденький, Н.Ф. Карцев, М.Ю. Бредихин // Вісник Українського матеріалознавчого товариства. – 2009. – № 1(2). – С. 36-42.
- 14 Бажин П.М. СВС-электродные материалы марки СТИМ / П.М. Бажин, Р.Н. Пономарев // Всероссийская конференция инновационных проектов аспирантов и студентов. Индустрия наносистем и материалы. – Зеленоград, 2006. – С. 56-57.
- 15 Середа Б.П. Получение износостойких и антикоррозионных покрытий для элементов муфтовых соединений труб с использованием СВС-технологий / Б.П. Середа, Ю.В. Бондаренко, Ю.А. Белоконь // Сучасні проблеми металургії. Т.11: Пластична деформація металів: Наук. вісті. – Дніпропетровськ, 2008. – С.194-199.
- 16 Санин В. Н. СВС-металлургия труб с износостойким защитным покрытием с использованием техногенных отходов металлургических производств / В. Н. Санин, Д. Е. Андреев, В. И. Юхвид // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2011. – № 2. – С. 37-43.
- 17 Кобяков В. П. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез в термитных смесях $Fe_2O_3/TiO_2/Al$ и $Fe_2O_3/TiO_2/Al/C$ / В. П. Кобяков, Н. В. Сачкова, М. А. Сичинава // Неорганические материалы. – 2010. – Т. 46, №12. – С. 1531-1536
- 18 Санин, В.Н. СВС-металлургия труб с износостойким защитным покрытием с использованием техногенных отходов металлургических производств / В.Н. Санин, Д.Е. Андреев, В.И. Юхвид // Изв. высш. учеб. заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2011. – № 2. – С. 37–43.
- 19 Андреев, Д. Е. Получение литых сплавов на основе алюминидов титана методом центробежного СВС / Д. Е. Андреев, В. Н. Санин, В. И. Юхвид // Неорганические материалы. – 2009. – Т.45, №8. – С. 934-940.
- 20 Юхвид В.И. Создание защитных покрытий методами СВС-металлургии / В.И. Юхвид // Наука производству. – 1998. – № 8. – С. 52 – 56.
- 21 Wang, Y. F. Finite element analysis of residual thermal stress in ceramic-lined composite pipe prepared by centrifugal-SHS / Y. F. Wang, Z. G. Yang // Materials Science and Engineering. – 2007. – No 6. – 130-134.
- 22 Кулик Я.А. Повышение адгезии плазменных покрытий напылением терморегулирующих металлооксидных порошков / Я.А. Кулик, А. С. Мнухин, Ю. А. Мезерницкий // Порошковая металлургия. – 1996. . – №10. – С.79-81.
- 23 Середа Б. П. Диффузионное титанирование как метод повышения износостойкости латуни и бронзы в агрессивных средах / Б. П. Середа, И. В. Кругляк, Д. О. Кругляк, В. П. Падалка, А. П. Онищенко, Д. Б. Середа // Металлургия. Вып. 26 : сб. науч. тр. / гл. ред. В. И. Пожуев; М-во образования и науки Украины. – Запорожье: Запорож. гос. инж. акад., 2012. – С. 76-80.
- 24 Пилипченко О.В. Наплавлення матеріалами СВС-класу / О.В. Пилипченко // Метали. Технології & Обладнання. – 2009. – №23-24. – С. 15-18.

*Стаття надійшла до редакційної колегії
04.06.15*

*Рекомендована до друку
професором **Петриною Ю.Д.**
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
професором **Салієм Я.П.***

*(Прикарпатський національний університет
ім. В. Стефаника, м. Івано-Франківськ)*