



Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України
Інститут газу НАН України



МАТЕРІАЛИ КОНФЕРЕНЦІЇ

**VII ВСЕУКРАЇНСЬКА НАУКОВО-ТЕХНІЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ
СТУДЕНТІВ, АСПІРАНТІВ ТА НАУКОВИХ СПІВРОБІТНИКІВ**

«ІНЖЕНЕРІЯ ПОВЕРХНІ. КОМПЛЕКСНИЙ ПІДХІД»

23 травня 2019 року

Київ 2019

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України
Інститут газу НАН України

МАТЕРІАЛИ КОНФЕРЕНЦІЇ

**VII ВСЕУКРАЇНСЬКА НАУКОВО-ТЕХНІЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ
СТУДЕНТІВ, АСПІРАНТІВ ТА НАУКОВИХ СПІВРОБІТНИКІВ**

“ІНЖЕНЕРІЯ ПОВЕРХНІ. КОМПЛЕКСНИЙ ПІДХІД”

23 травня 2019 року

Київ 2019

Інженерія поверхні. Комплексний підхід: Матеріали сьомої всеукраїнської науково-технічної конференції студентів, аспірантів та наукових співробітників: К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, ТОВ “Фастпринт”, 2019. – 24 с.

В збірнику матеріалів сьомої всеукраїнської міжгалузевої науково-технічної конференції студентів, аспірантів та наукових співробітників “Інженерія поверхні. Комплексний підхід” наведені тези доповідей, які були представлені на конференції. Основні питання, що були висвітлені у ході конференції відносяться до отримання функціональних покриттів методами газотермічного напилення та наплавлення, дослідження і аналіз властивостей покриттів, нових технологій в інженерії поверхні.

ОРГАНІЗАТОРИ

Міністерство освіти і науки України

Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

Кафедра інженерії поверхні КПІ ім. Ігоря Сікорського

Інститут газу НАН України

Матеріали видаються за оригіналами поданими авторами.

ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ КОМІТЕТ

Голова:

Смирнов І.В., доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інженерії поверхні КПІ ім. Ігоря Сікорського

Заступники голови:

Копилов В.І., д.т.н., професор каф. інженерії поверхні КПІ ім. Ігоря Сікорського;

Чорний А.В., к.т.н., доцент каф. інженерії поверхні КПІ ім. Ігоря Сікорського.

Учений секретар:

Степанов Д.В., к.т.н., доцент каф. інженерії поверхні КПІ ім. Ігоря Сікорського.

Члени оргкомітету:

Петров С.В., д.т.н., провідний науковий співробітник Інституту газу;

З М І С Т

СЕКЦІЯ 1. ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ОСНОВИ ІНЖЕНЕРІЇ ПОВЕРХНІ	5
<i>Порицький В.А., Копилов В.І., Попіль Ю.С.</i> Використання воднево-кисневої плазми для отримання жаростійких покриттів.....	5
<i>Світоч І.О., Копилов В.І.</i> Прогнозування жароміцності покриттів на основі нейромережевого підходу.....	6
СЕКЦІЯ 2. ФУНКЦІОНАЛЬНІ ПОКРИТТЯ	8
<i>Гуторчук С.С., Колодій В.О.</i> Іонне азотування внутрішніх поверхонь циліндричних деталей малого діаметру.....	8
<i>Захаров Є.А., Попіль Ю.С.</i> Розробка технології отримання покриттів з самофлюсуючих сплавів, з використанням концентрованих плазмових струменів.....	10
<i>Овсієнко І.А., Копилов В.І.</i> Плазмове напилення керамічного матеріалу з використанням електроіскрового легування.....	12
СЕКЦІЯ 3 СПОРІДНЕНІ ПРОЦЕСИ В ІНЖЕНЕРІЇ ПОВЕРХНІ	14
<i>Пащенко В. М., Гонтар І. О.</i> Плазмотрони на газоповітряних сумішах із підвищеним ресурсом...	14
<i>Захарчук О.Л., Попіль Ю.С.</i> Застосування комбінованих методів обробки для отримання металокерамічного покриття.....	16
<i>Пащенко В.М.,Кругляк А. М.</i> Плазмотрони для різання магістр.....	17
<i>Мінаков С.М., Стреленко Н.М., Бова Ю.В.</i> Особливості формування шарів металу пир 3D друку методом MAG.....	19
<i>Козоріз В.В., Чорний А.В.</i> Отримання композиційних порошоків для адитивних технологій.....	20
<i>Пащенко В.М., Костишин В.С.</i> Плазмотрони для напилення внутрішніх поверхонь.....	21
<i>Шкіндер О.М., Оксенюк Ю.Ю., Степанов Д.В.</i> Підвищення зносостійкості наплавленого металу з використанням нанопорошків оксидів та карбідів.....	23

СЕКЦІЯ 1. ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ОСНОВИ ІНЖЕНЕРІЇ ПОВЕРХНІ ВИКОРИСТАННЯ ВОДНЕВО-КИСНЕВОЇ ПЛАЗМИ ДЛЯ ОТРИМАННЯ ЖАРОСТІЙКИХ ПОКРИТТІВ

*В.А. Порицький, магістр, В.І. Копилов, проф., Ю.С. Попіль, доцент,
(КПІ ім. Ігоря Сікорського)*

Підвищення ресурсу роботи апаратів, механізмів та конструкцій за рахунок захисту від термоциклічних навантажень в різних галузях виробництва, є актуальною задачею сьогодення. Не всі газотермічні способи нанесення, можуть задовольняють технологічні вимоги по створенню жаростійких та теплозахистних покриттів.

Мета роботи – дослідження тріботехнічних властивостей покриттів з використанням оксидних матеріалів, та розробка технологій нанесення жаростійких, теплозахистних поверхонь з використанням в якості процесу і методу воднево-кисневого плазмового струменю.

Проведений аналіз технічної літератури показав, що серед основних газотермічних способів нанесення покриття жаростійких та теплозахистних покриттів використовуються газодинамічний, детонаційний, високошвидкісний HVOF газополуменевий та плазмовий. Кожний з методів має, як ряд переваг так і недоліків. Найбільшого використання, для жаростійких покриттів знайшов плазмовий спосіб, з застосуванням надзвукових сопел і потужністю процесу більше 100 кВт. В якості плазмо утворюючих сумішей використовуються Ar-H₂ та Ar-H₂-He або повітря з 5% пропан-бутановою сумішшю. Залежності від складу порошку такі матеріали при напиленні можуть досягати пористості від 1 до 30% та міцності зчеплення «покриття-основа» 35-120 МПа. При напиленні оксидів Al₂O₃, Cr₂O₃, Al₂O₃-TiO₂, ZrO₂-MgO, ZrO₂-CaO та тугоплавких WC-CO, Cr₃C₃ необхідною умовою є врахування окислювально-відновлювального потенціалу плазми, в окислювальному середовищі, деякі оксиди і карбіди можуть руйнуватися і утворювати більш тугоплавкі сполуки. Температура таких переходів матеріалу частки в пластичний стан може приблизно сягати від 2270-до 3273 К.

Саме таким умовам відповідають властивості воднево-кисневого плазмового струменя. Основною перспективою в застосуванні є: висока ентальпія, теплопровідність і достатня температура для плавлення матеріалу -5293К. Можливість керування геометричними розмірами плазмового струменя за рахунок змін характеристик течії, яка залежить від витрат газу, з прикладеною потужністю від 4 до 7 кВт, можливо отримувати мікро струмені з високою концентрацією енергії та високим коефіцієнтом корисної дії процесу (ККД). Так, як воднево-киснева суміш має окислювальний потенціал, то регулювання його до відновлювального потенціалу може здійснюватися методом насичення суміші продуктами вугле-водневих сполук. Отримано спосіб стабільного ініціювання та регулювання параметрами плазмового струменю, де в якості плазмо утворюючого середовища виступає воднево-киснева суміш отримана з електролізно-водневого генератора. Досліджено розподілення температури та швидкості по довжині плазмового струменю, визначені ефективні інтервали температур плавлення матеріалу, для визначення дистанції напилення та ефективна теплова потужність. По даній роботі проводяться дослідження на міцність зчеплення, тріщиностійкість, пористість та теплопровідність шару покриття.

ПРОГНОЗУВАННЯ ЖАРОМІЦНОСТІ ПОКРИТТІВ НА ОСНОВІ НЕЙРОМЕРЕЖЕВОГО ПІДХОДУ

І.О. Світоч, аспірант, В.І. Копилов, професор (КПІ ім. Ігоря Сікорського)

Для проектування покриттів і моделювання їх поведінки в умовах дії температурних полів і навантажень розроблені підходи, що стали вже класичними, які засновані на різних теоріях деформації і руйнування [1–3].

Останнім часом для прогнозування різних властивостей сталей і сплавів все частіше використовуються нейромережі [4, 5], хоча для матеріалів з покриттями подібні методи рідкісні.

Метою роботи є нейромережевий підхід до проектування жароміцного покриття і прогнозування часу його служби, виходячи з експериментальних даних по повзучості композиційних матеріалів. Для апробації даного підходу, обраний клас плазмових жаростійких покриттів. Інтерес представляє можливість нейромереж прогнозувати характеристики покриття з урахуванням режимів напилення та їх складу, і, як наслідок, запропонувати оптимальний технологічний процес напилення.

За достатньою кількістю даних по повзучості матеріалу з покриттям на початковому етапі, згідно з відповідним алгоритмом, відбувається тренування нейромережі – перцептрон [4, 5].

Математична модель перцептрон за алгоритмом навчання Левенберга-Маркварта представляється у вигляді:

$$y(w, x) = \sum_{i=1}^q v_i f\sigma \left(b_i + \sum_{j=1}^n w_{ij} x_j \right) + b_0, \quad (1)$$

де $x \in R^n$ - вхідний вектор мережі, який складається зі значень x_j ; q - кількість нейронів єдиного прихованого шару; $x \in R^s$ - вектор всіх вагів і порогів мережі; w_{ij} - нелінійно вхідна модель ваги між j -тим входом та i -тим нейроном прихованого шару; v_i - вага нейрону вхідного шару, відповідна i -му нейрону прихованого шару; b_i, b_0 - пороги нейронів прихованого шару і вихідного нейрона; $f\sigma$ - функція активації (тут використовується логістична сигмоїда).

Структура нейромережі з одним прихованим шаром з логістичною функцією активації представлена на рис. 1.

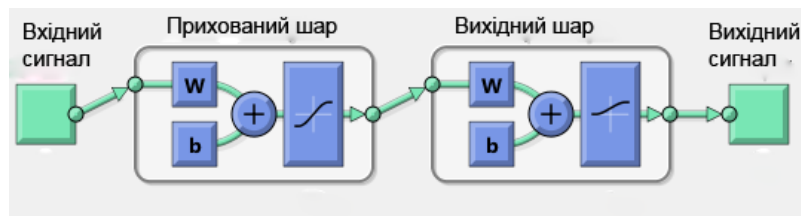


Рис.1 – Структура нейромережі з одним прихованим шаром

Навчання нейромережі проводиться в програмі Matlab з встановленим додатком Neural Network Toolbox. Використана технологія побудови багатовимірної бази даних OLAP [4].

Навчальна база даних містить результати по повзучості матеріалів при температурах від 500 – 1200 °C і напруженнях від $\sigma = 75$ до $\sigma = 200$ МПа з покриттями Mo , Al_2O_3 і домішками нанодисперсних порошків SiO_2 . Результати моделювання на

основі наявних даних по швидкостях повзучості сталі 40Х з молібденовим покриттям представлено на рис. 2 і табл. 1. Отримані аналітичні результати близькі до експериментальних значень.

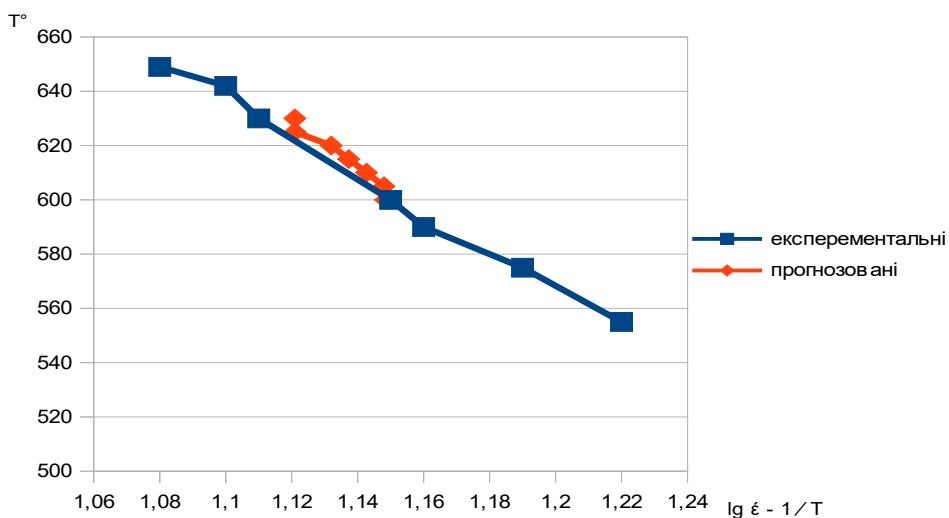


Рис. 2 – Експериментальні і прогнозовані швидкості повзучості ($\dot{\epsilon}$) сталі 40Х з молібденовим покриттям при напрузі 125 МПа в залежності від температури

Таблиця 1. Прогнозовані нейромережею швидкості повзучості сталі 40Х з молібденовим покриттям, згідно з рис. 2

Т°	630	625	620	615	610	605	600
lg $\dot{\epsilon}$ - 1 / T)	1,1148	1.121023	1.1266	1.131984	1.13726	1,148	1,1485

На основі даних експериментів може бути створена база даних, яку можна використовувати для подальшого проектування жароміцних покриттів. Запропонована методика може скоротити час випробувань.

Перелік посилань

1. Геминов В. Н. Ползучесть металлов и сплавов [Текст] / В. Н. Геминов // «Металловедение и термическая обработка». – т. 18 (Итоги науки и техники ВИНТИ АН СССР). – М.: 1984. – С. 57–97.
2. Шестериков С. А. Метод температурно – силового прогнозирования длительной прочности металлов [Текст] / С. А. Шестериков, А. Л. Аршакуни, Л. В. Череева // Проблемы прочности. – 1989.– № 9.– С. 6–9
3. Максимович Г. Г. -Физико – химические процессы при плазменном напылении и разрушении материалов с покрытиями [Текст]/ Г.Г. Максимович, В.Ф. Шатинский, В.И. Копылов. – Киев: Наукова думка, 1983.– 173 с.
4. Нургаянова О. С. Автоматизированное проектирование жаропрочных литейных никелевых сплавов на основе методов искусственного интеллекта.:Дисс. канд. тех. наук. Уфа. 2006 . 104 с.
5. Валюхов С.Г., Определение нейросетевой факторной модели по результатам экспериментальных исследований нанокompозитного покрытия [Текст] / Кретинин, А.В., Стогней О.В // Вестник Воронежского государственного технического университета –Воронеж – 2012 – т.8 – с. 104-110.

СЕКЦІЯ 2. ФУНКЦІОНАЛЬНІ ПОКРИТТЯ

ІОННЕ АЗОТУВАННЯ ВНУТРІШНІХ ПОВЕРХОНЬ ЦИЛІНДРИЧНИХ ДЕТАЛЕЙ МАЛОГО ДІАМЕТРУ

С.С. Гуторчук, магістр, В.О. Колодій, магістр (КПІ ім. Ігоря Сікорського)

Цементация, нітроцементация та азотування є основними способами підвищення міцності деталей, зубів шестерні, лопаток турбін, валів, кранштейнів, внутрішніх поверхонь труб, стволів зброї, тощо, шляхом поверхневого зміцнення. Процес здійснюється в азотовмісних газовому середовищі при робочому тиску в камері установки 0,4-10 мбар під впливом тліючого електричного розряду між катодом (деталлями) і анодом (стінками вакуумної камери). В результаті формування активної плазми - іонізованого газу активно утворюються різні модифікації дифузійних покриттів, що володіють високим службовими властивостями:

1. Вуглецеві і низьколеговані сталі - $h=0,2-1,0$ мм, 350-650 HV; 35-58 HRC;
2. Середньолеговані сталі - $h=0,1-0,8$ мм, 650-1200 HV; 58-71 HRC;
3. Високолеговані і Ті-сплави - $h=0,1-0,3$ мм, 700-1300 HV; 60-73 HRC;
4. Інструментальні сталі - $h=0,01-0,3$ мм, 800-1300 HV; 64-73 HRC;

Зміцнені вироби мають високу твердість, втомну і контактну міцність, найкращі комплексні зносо-задіростійкі і антикорозійні властивості:

1. Коефіцієнт тертя зі змазкою – 0,03-0,05;
2. Коефіцієнт тертя в сухих умовах – 0,1-0,3;
3. Корозійно-ерозійна стійкість відповідає високолегованій сталі 12X18H10T;
4. Контактно-втомна міцність і довговічність більша в 1,5-2 рази.

В цілому вище вказані властивості переверщують показники хромованих та інших хіміко-термічних покриттів в 2-4 рази. Основні переваги і відмінності нових технологій в порівнянні з існуючими процесами ХТП й гальваніки (цементация, ціанування, пічне і каталітичне азотування, хромування та ін.):

1. Екологічна чистота, нешкідливість і безвідходність процесів;
2. Ресурсозбереження за рахунок різкого скорочення електроенергії в 2-5 разів (середнє споживання 0,05 ... 0,1 кВт-год на 1 кг виробу) і робочих газів в 100-200 разів (1 балон аміаку на 3 місяці роботи установки);
3. Мінімальна зміна розмірів і збереження чистових параметрів і допусків конструкторської документації, що виключає додаткову механічну обробку зміцнених виробів;

В даний час установки для азотування, що працюють на тліючому розряді, майже повністю витіснили установки для газового і рідкого азотування. Це пов'язано, перш за все, з тим, що процес іонного азотування в них виявляється найбільш швидким і ефективним. Під час процесу азотування катодного падіння напруги знаходиться в інтервалі 600-800 В в залежності від режиму азотування. Катодне падіння повністю визначає енергію іонів і, як наслідок, швидкість азотування і глибину шару. Тому збільшення катодного падіння напруги може вплинути на режими азотування в кращу сторону.

Збільшити катодне падіння можна різними способами. Наприклад, перевести нормальний тліючий розряд в аномальний. Але при цьому буде збільшуватися

потужність, що виділяється на катоді, що може привести до перегріву деталі. Можливо також використовувати магнетронні системи розряду, які складні в реалізації. Більш прийнятним є використання імпульсного тліючого розряду (ІТР). Імпульсний режим ТР повинен забезпечуватися ключем, встановленим в катодному ланцюгу. Як показали попередні дослідження, такий спосіб формування розряду дозволяє збільшити катодне падіння в 2-3 рази в порівнянні зі звичайним тліючим розрядом без збільшення виділеної потужності [2].

Для активізації газової фази застосовують різні види електричних розрядів: дуговий, тліючий, іскровий і коронний; магнітні і електростатичні поля; опромінення ультрафіолетовими і γ -променями. Найбільшого поширення в даний час отримує процес азотування іонізованим азотом в плазмі тліючого розряду (іонне азотування). У розрідженій азотовмісткій атмосфері між катодом (деталлю) і анодом збуджується тліючий розряд (ТР), іони газу, бомбардуючи поверхню катода, нагрівають її до температури насичення [1, 3].

Будова і властивості зміцненого шару азотованих деталей залежать від наступних технологічних факторів: напруги між електродами, складу газового середовища, ступеня її розрідження, робочої температури, тривалості процесу, взаємного розташування деталей і електродів. Температура азотування зазвичай становить $470-580^{\circ}\text{C}$, напруга - $400-1100\text{ В}$, розрідження - $1-10\text{ мм рт. ст.}$, тривалість процесу становить від декількох хвилин до 24 год. Робочий тиск обмежується властивостями тліючого розряду. При тиску нижче 1 мм рт. ст. енергії іонів недостатньо для нагріву оброблюваної деталі до робочої температури, при тиску вище 10 мм рт. ст. порушується стабільність розряду, тліючий розряд переходить в дуговий, що супроводжується появою на поверхні оплавлених мікрократерів. При тиску 2 мм рт. ст. при 520°C і 6 мм рт. ст. при 620°C досягається максимальна глибина дифузійного шару. На глибину шару впливає і збільшення напруги [4].

Перелік посилань

1. Гаврилова А. В. Исследование структуры азотированных сталей / А. В. Гаврилова, С. А. Герасимов, Г. Ф. Косолапов, Ю. Д. Тяпкин // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1974. № 3. С. 14–17.
2. Бутенко О.И., Головчинер Я.М., Скотников С.А. Формирование диффузионного слоя при ионном азотировании // *Прогрессивные методы термической и химико-термической обработки*. – М.: Машиностроение, 1972. – С. 122–128.
3. Лахтин Ю. М. Теория и технология азотирования / Ю. М. Лахтин и др. М.: *Металлургия*, 1991. 320 с.
4. Лахтин Ю.М., Крымский Ю.Н. Физические процессы при ионном азотировании // *Защитные покрытия на металлах*. Вып. 2. – Киев, 1968. – С. 225–229.

РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ ПОКРИТТІВ З САМОФЛЮСУЮЧИХ СПЛАВІВ, З ВИКОРИСТАННЯМ КОНЦЕНТРОВАНИХ ПЛАЗМОВИХ СТРУМЕНІВ

Є.А. Захаров, магістр, Ю.С. Попіль, доцент, (КПІ ім. Ігоря Сікорського)

Одним з напрямків енергозберігаючих технологій є розробки з використання нових джерел енергії. Перспективним напрямком є використання воднево-кисневої суміші (ВКС) в концентрованих джерелах енергії до яких відноситься плазмовий струмінь, ефективність використання залежить від конструкції плазмотрону, що генерує плазму та плазмоутворюючої суміші [1].

Для розробки технологій плазмового способу обробки матеріалів з використанням ВКС також потрібно теоретично визначити ефективні температурні інтервали, в яких відбувається плавлення та перехід в пластичний стан часток матеріалу, який напильється а також їх швидкість. Для цього практично досліджувалися властивості струменю.

Геометричні розміри плазмового струменю фіксувалися візуально, при цьому перехідна межа від ламінарного до турбулентного характеру течії, визначалась довжиною плазмового струменю та витратами суміші. Витрати газової суміші становили при ламінарному характеру течії $V=0,4$ м³/год і турбулентному більше $0,6$ м³/год при тиску $p= 0,08 -0,10$ МПа.

Методом калориметрування, визначили значення ефективної теплової потужності плазмового струменю. Для визначення ефективної теплової потужності плазмових струменів різних характерів течії та складу паливних сумішей використовувалася експериментальна установка з водяним калориметром ємністю води 20л. Кількість теплоти, яку виділяє плазмовий струмінь, фіксували при нагріванні мідної пластини розміром $150 \times 150 \times 5$ мм і масою 1кг. при цьому визначаються час нагрівання і пластинка переносилась в калориметр. В даній роботі температура калориметра вимірювалась спеціальним термометром Бекмана, що забезпечує точність $\pm 0,01^{\circ}$ Розрахунки проводились по стандартній методиці [2].

Для визначення розподілення температури по довжині плазмового струменю, струмінь розбивався на три інтервали ефективних температур. Використовувались три способи вимірювання: в зоні температур $8000--4000$ К спектральний, $3300 --2200$ К пірометричний, термопарний $2000 --500$ К. Для визначення температури в першій зоні з складових компонент плазмового струменю, було застосовано безконтактний метод емісійної спектроскопії. Для другого оптичний пірометр ЛОП-72 по температурі нагрітого тіла, де в якості тіла використовувався вольфрамовий стержень діаметром 2мм, абсолютна температура розраховувалась по стандартній методиці. В якості термопари були вибрано вольфрам-ренієву термопару ВР-5/20 діаметром 0,5мм, для запобігання окислення та вигорання, термопара розміщувалась в захисній оболонці з кварцового скла. Перед дослідженням термопара градуювалась. Допустима похибка термопар складає $\pm 1\%$ від вимірювальної ЕРС.

Емісійні спектри плазмового факелу реєструвалися за допомогою спектрометра на базі CCD-лінійки Solar ТП (S-150-2-3648 USB), що працює в діапазоні довжин хвиль $200-1080$ нм та має трикутну апаратну функцію з півшириною 0.2 нм в

діапазоні довжин хвиль 200-650 нм та 0.3 нм в діапазоні 650-1080 нм. Реєструвалося випромінювання по променям зору перпендикулярним осі плазмового факелу [3].

Для вимірювання повного тиску плазмового струменю застосовувався водоохолоджуваний зонд.

Визначення розподілення швидкості по довжині плазмового струменя виконувалось розрахунково-дослідним шляхом з використанням відомого рівняння з технічної термодинаміки, яке враховує тиск і температуру газового потоку.

Висновки:

1. Спектральний аналіз плазмового факелу з воднево-кисневої суміші показав, крім відомих характерних складових дисоціації води, наявність в складових плазмового струменя компонент матеріалу електродів, а саме атомарні лінії міді (Cu), компоненти атмосфери, в яку витікає струмінь, компоненти робочого газу- мультиплети кисню та молекулярні смуги OH, NO, O та N₂.

2. При генерації плазми з водне-кисневої суміші можна отримувати різні форми плазмового струменю, за рахунок регулювання витрат суміші, таким чином регулювати ефективну теплову потужності плазмового струменю, так при ламінарному характеру витоку струменю (витратах ВКС $V=0,4$ м³/год., прикладеній електричній потужності до плазмотрону $W=4$ кВт), становила 30 МДж. При турбулентному стані витікання, ($V=0.6-1.0$ м³/год., $W=4$ кВт) ефективна теплова потужність складала 54-60 МДж, що практично в 2 рази більше за плазмовий струмінь, при однакових технологічних параметрах, де в якості плазмо- утворюючого газу використовувалось повітря.

3. Максимальна температура в струмені воднево-кисневої плазми знаходиться на відстані 3-4d_c від зрізу сопла і становить 8400±1000 К при збільшенні відстані на 6d_c температура інтенсивно знижується до 4100±1000 К. Середньо масова температура воднево-кисневого плазмового струменю становить 5000±500 К.

Як показали дослідження струмін низькотемпературної плазми отриманої електродуговим способом ініціювання, де в якості плазмоутворюючого середовища використовується воднево-киснева суміш, отримана з електролізно-водяних генераторів може застосовуватись більш ефективно ніж застосовуємі в даний час плазмоутворюючі гази та їх суміші в процесах газотермічної обробки матеріалів, для цього потрібно розробка нових технологій та обладнання, які є безпечними в роботі та ефективні в застосуванні.

Список літератури

1. Жуков М. Ф. Электродуговые нагреватели газа (плазмотроны)]]: моногр. / М. Ф. Жуков, В. Я. Смоляков, Б. А. Урюков. – М.: Наука, 1973. – 232 с.
2. Николаев Г.А., Ольшанский Н.А. Специальные методы сварки. М., «Машиностроение», 1975.-231 с.
3. Specair: C.O. Laux, T.G. Spence, C.H. Kruger, R.N. Zare, Optical diagnostics of atmospheric pressure air plasma, Plasma Sources Sci. Technol. 12 (2) (2003) P. 125-138.

ПЛАЗМОВЕ НАПИЛЕННЯ КЕРАМІЧНОГО МАТЕРІАЛУ З ВИКОРИСТАННЯМ ЕЛЕКТРОІСКРОВОГО ЛЕГУВАННЯ

І.А. Овсієнко, магістр, В. І. Котілов, професор (КПІ ім. Ігоря Сікорського)

Сучасною тенденцією в інженерії поверхні для управління структурою і властивостями поверхневих шарів композиційних матеріалів є використання комбінацій різних методів нанесення багатошарового покриття [1–4]. До таких способів відносяться газотермічні (плазмові) покриття з попереднім електроіскровим легуванням (ЕІЛ) поверхні основного матеріалу.

Метою роботи є створення композиційного двошарового покриття з підвищеними фізико-механічними характеристиками з використанням електроіскрового легування і плазмового напилення.

Плазмове напилення здійснювалось на установці УПУ-3Д, а електроіскрове легування проводилось на установці «Елітрон-22А».

Процес електроіскрового легування (ЕІЛ) побудований на руйнуванні матеріалу анода при іскровому розряді і спрямованому переносі продуктів на поверхню протилежного електрода у вигляді рідинно-парової і твердої фаз. Електроіскрове легування з притаманним йому властивостями оплавлення і масопереносу елементів покриття сприяє створенню високолегованої зони на окремих ділянках та по глибині вже композиційного шару.

Переваги ЕІЛ полягають у можливості нанесення покриттів не тільки з металів і їх сплавів, але й з композиційних матеріалів, високій міцності зчеплення основного та перенесеного матеріалу, простоті технологічних операцій. Більш широкому впровадженню способу ЕІЛ в промисловості може сприяти всебічне дослідження структури, фазового складу та властивостей зміцнених шарів

В якості електродних матеріалів використовуються метали, металеві сплави, сплави на основі тугоплавких сполук. В останні роки проявляється інтерес до використання в якості електродних матеріалів композиційної ультра високотемпературної кераміки на основі TiO_2 , а також на основі ZrB_2 . Така кераміка характеризується високою абразивною зносостійкістю, термічною і радіаційною стійкістю, високою кислотостійкістю і вогнетривкістю. В якості плазмового покриття використовувалась суміш порошків на основі сплаву $Ni-Cr-B-Si$ і керамік ZrB_2 , TiO_2 , SiC , Al_2O_3 .

Стійкість ЕІЛ-покриттів до абразивного зносу підвищується не тільки з зростом сумарного вмісту твердих фаз, а і з ростом в матеріалі електрода / покриття вмісту ZrB_2 , відповідального за формування боросилікатної фази. Зносостійкість до абразивного зносу зростає також зі зростанням навантаження для ЕІЛ-покриття з матеріалу

Під час ЕІЛ-покриття внаслідок трансформації фазового складу поверхні від крихкого керамічного шару на основі ZrB_2 до пластичної матриці на основі Ti сплаву, модифікованого легуючими компонентами, відбувається зміна механізму абразивного зносу від крихкого руйнування для ЕІЛ- покриття до пластичної деформації. При переході від ЕІЛ-покриття до покриття, зносостійкість підвищується за рахунок зниження втрат на крихке руйнування і трансформації фазового складу поліоксидного шару.

Як свідчать результати досліджень використання комбінацій нанесення різних шарів покриттів приводить до формування нової структури з пошаровим розподілом властивостей, до підвищення адгезійної і когезійної міцності покриттів. При електроіскровому легуванні робочий струм впливає на зміну твердості покриття, що узгоджується з розподіленням легуючих елементів. Так при зміні параметрів струму поряд із твердими включенням в одних зонах покриття має місце зменшення мікротвердості на ділянках, які прилягають до основи. При збільшенні струму спостерігається однорідніша структура з рівномірним розподілом мікротвердості, але при цьому відбувається збільшення ерозії катода. Таким чином, в даних умовах є оптимальне значення струму, що дозволяє отримати покриття з рівномірним розподілом компонентів без руйнування поверхні в зоні розряду. Підвищення мікротвердості поблизу межі сплавлення покриття з основою можна пояснити частковим перемішуванням нижнього і верхнього шарів багатошарового покриття. ЕІЛ-покриття на основі TiO_2 при тривалому нанесенні ($t = 7$ хв/см²) являє собою структурно-неоднорідну гетерофазну поверхню, яка містить згладжені ділянки модифікованого титанового сплаву, що утворені в результаті кристалізації розплаву. Багатошарові покриття на основі керамічних матеріалів мають високу твердість ($20 \pm 1,5$ ГПа) з екстремальним розподілом по товщині шару.

До переваги цього методу можна віднести можливість попереднього очищення поверхні оброблюваного виробу від окисних і інших забруднень катодним розпиленням і водневим відновленням електроіскровим методом, що суттєво покращує зчеплення покриття з основою і впливає на щільність, густину і досконалість текстури.

У подальшому доцільно провести дослідження із вдосконаленням композиційного покриття «електроіскрове легування – плазмове напилення» з метою підвищення міцності та зносостійкості при високих температурах.

Література

1. Коваленко В.С., Кривцун І.В. Комбіновані лазерно-дугові процеси обробки матеріалів // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2001. – № 5. – С. 23–27.
2. Смирнов І.В., Глуховський В.Ю., Копилов В.І. Багатокомпонентні покриття, отримані комбінацією магнетронного розпилення і електроіскрового легування // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2007. – № 6. – С. 86–91.
3. Подчерняева И.А., Панасюк А.Д., Панашенко В.М. [и др.] Электроэрозионная стойкость и структурно-фазовые превращения при электроискровом и лазерном легировании титанового сплава композиционной керамикой на основе систем ZrB_2-ZrSi_2 и $TiN-Cr_3C_2$ // Порошковая металлургия. – 2008. – №1/2. – С. 151–161.
4. Подчерняева И.А., Панашенко В.М., Духота А.И. [и др.] Особенности формирования и трибологического поведения многослойных износостойких ZrB_2 -содержащих электроискровых и лазерно-электроискровых покрытий на титановом сплаве // Проблемы трибологии (Problems of tribology). – 2012. – №4. – С. 96–101.

СЕКЦІЯ 3 СПОРІДНЕНІ ПРОЦЕСИ В ІНЖЕНЕРІЇ ПОВЕРХНІ

ПЛАЗМОТРОНИ НА ГАЗОПОВІТРЯНИХ СУМІШАХ ІЗ ПІДВИЩЕНИМ РЕСУРСОМ

В.М. Пащенко, д.т.н., І.О. Гонтар магістр (КПІ ім. Ігоря Сікорського)

Ресурс роботи технологічних плазмотронів на кисневмісних газах визначається ресурсом роботи катода, як найменш надійного елемента конструкції. Підвищення ресурсу електрода досягається зниженням його питомої ерозії і конструктивними заходами, за допомогою яких відновлюють або зберігають форму розрядного каналу, компонентами якого є електроди плазмотрона.

Найбільш розповсюдженими на сьогодні є термоемісійні і термохімічні катоди. Обидва типи катодів можуть бути застосовані при роботі плазмотрона на газоповітряних сумішах.

Термоемісійні вольфрамові катоди в атмосфері інертних і нейтральних газів при нормальному тиску забезпечують ресурс безперервної роботи більше ніж 100 годин при струмі дуги до 1 кА.

Визначальним параметром, який впливає на ресурс термоемісійних електродів є чистота газів, що використовуються для плазмоутворення. Для підвищення ресурсу роботи таких катодів у середовищах, які містять кисень, їх робочу поверхню вкривають силіцидом вольфраму або тугоплавким оксидом на основі цирконію.

Вольфрамові стрижневі катоди можна використовувати і безпосередньо в хімічно активних газах (повітря, водяна пара тощо) із застосуванням захисту електрода нейтральними газами. Найчастіше для цього застосовується сопло-допоміжний анод, який служить також для підпалювання дуги. На ефективність захисту від основного хімічно активного газу впливає геометрична форма і розміри сопла, а також схема подавання газу. Використання тангенціального подавання захисного газу погіршує ефективність захисту через утворення зони зворотної течії. Ефективність захисту залежить також від форми катода, камери закручування, сопла, витрат газів і визначається складною гідродинамічною картиною течії двох закручених потоків [1]. У разі оптимізації вищезгаданих параметрів, можливо підняти ресурс катода в хімічно активних газах до ресурсу анода (сотні годин).

Зменшення питомої ерозії матеріалу термохімічного катода можливе при зменшенні струмового навантаження на одиницю площі поверхні електрода. Одним із шляхів є використання багатоелементних катодів із розщепленням сумарного струму дуги або із живленням від окремих джерел. У цьому випадку катодний вузол має основний катод і додаткові катоди, розміщені на секціях. Основний катод виконаний з вольфрамового стрижня у мідній обоймі. Додатковий катод складається з набору термокатодних вставок, розміщених вздовж внутрішньої твірної каналу міжелектродної вставки (МЕВ). Розщеплення дуги у катодному вузлі має довільний характер, якому сприяють газодинамічні процеси, що проходять у дуговому каналі.

Термохімічні катоди на основі цирконію та гафнію в кисні, у середовищах із вмістом азоту і вуглецю при атмосферному тиску, надійно працюють на струмі до (400...500) А кілька годин (десятків годин) [2]. Розглянута вище конструкція катодного вузла із розщепленням дуги можлива і для катода на термохімічних вставках. У роботі [3] запропоновано дещо інше конструктивне рішення для

розщеплення катодної плями термохімічного катода. Для підвищення ресурсу термохімічного катода розроблений модифікований катод. Він відрізняється від катода с одиночною вставкою тим, що у мідне тіло окрім центральної вставки запресовані ще три радіальних стрижня через 120° . У модифікованому катоді після утворення початкового кратера на центральній вставці катодна пляма розподіляється на всі 4 вставки. Площа прив'язування опорної плями дуги збільшується у 1,5 рази порівняно із варіантом використання однієї центральної вставки. Знижуються густини струму та теплового потоку і, відповідно, зменшується температура робочої поверхні вставок. Ресурс катода з 4-ма вставками також вищий, ніж катода з однією вставкою, за рахунок як зниження величини питомої ерозії, так і за рахунок збільшення маси гафнієвих вставок. Ресурс електрода при струмі 200 А – близько 90 годин, що суттєво більше, ніж у катода з одиночною вставкою.

Ресурс катода у разі застосування плазмоутворювальних сумішей вуглеводнів із повітрям може бути суттєво підвищений шляхом застосування порожнистих мідних електродів – «холодних» катодів. У плазмотроні з порожнистим мідним електродом процес підпалювання дуги не має настільки суттєвого впливу на ресурс його роботи, як у разі застосування електродів інших типів (наприклад, термохімічних). Це пояснюється інтенсивним переміщенням опорних плям дуги у процесі її розвитку по поверхні внутрішнього і соплового електродів не тільки в азимутальному, але й в осьовому напрямках. Стан поверхні мідного електрода у періоди виникнення дуги та її стійкого горіння суттєво не змінюється, що дає підставу вважати тривалість горіння дуги вирішальним фактором у ресурсі роботи порожнистого електрода [4]. До недоліків такого варіанта вирішення проблеми можна віднести чутливість плазмотрона з порожнистими електродами до стабільності конфігурації дугового каналу та режиму течії газу.

Таким чином, найбільш простим рішенням проблеми підвищення ресурсу катода без суттєвого ускладнення конструкції генератора плазми із мінімальним впливом режимних параметрів на процес горіння дуги на сьогодні можна вважати застосування термохімічних катодів із збільшеною кількістю активних вставок для розщеплення плями прив'язування дуги.

Використана література

1. Дандарон Г.- Н. Б. Исследование эффективности газовой защиты вольфрамового электрода плазмотрона [Текст] / Г. Н. Б. Дандарон, И. В. Попов, В. В. Стенин // Тр. VII Всесоюз. конф. по генераторам низкотемпературной плазмы. – Алма-Ата: Кинап, 1977. – т. 2. – С. 212 – 215.
2. Основы расчета плазмотронов линейной схемы [Текст]: моногр. / – под. ред. М. Ф. Жукова. – Новосибирск: АН СССР, Сибирское отд, Институт Теплофизики, 1979. – 148 с.
3. Аньшаков А. С. Исследование термохимических катодов в дуговых плазмотронах [Текст] / А. С. Аньшаков, Э. К. Урбах, А. Э. Урбах, В. А. Фалеев // Теплофизика и аэромеханика. – 2005. – том 12. – № 4. – С. 685 – 691.
4. Гордеев В. Ф. Термоэмиссионные дуговые катоды [Текст]: моногр. / В. Ф. Гордеев, А. В. Пустогаров. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 192 с.

ЗАСТОСУВАННЯ КОМБІНОВАНИХ МЕТОДІВ ОБРОБКИ ДЛЯ ОТРИМАННЯ МЕТАЛОКЕРАМІЧНОГО ПОКРИТТЯ

О.Л. Захарчук, магістр, Ю.С. Попіль, к.т.н., доцент (КПІ ім. Ігоря Сікорського)

Механічне легування або механіко-хімічний синтез є ефективним способом здобуття покриттям високих триботехнічних властивостей поверхонь.

Метою роботи є отримання покриттів з використанням плазмових покриттів з їх механічного легування де на їх основі відбувається підвищення фізико-механічних характеристик покриттів.

В якості керамічного матеріалу використовувався порошок оксиду алюмінію Al_2O_3 (ядро), а, як легуючі елементи (плакуючі оболонки), металеві порошки Mo, Ni, AlNi. Напилення здійснювалося на плазмовій установці з використанням в якості плазмоутворюючого газу воднево-кисневої суміші, а легування здійснювалось на електроіскровій установці «Електрон-21» з використанням різних матеріалів електроду.

Плазмові покриття на основі кераміки у багатьох випадках мають неоднорідну крупнозернисту структуру. Це призводить до низьких значень твердості і тріщиностійкості, високої чутливості до абразивного зносу, обмежуючи застосування даних керамік в якості матеріалів пар тертя, що працюють при підвищених навантаженнях.

У самій суміші порошоків відбувається легування поверхневих шарів кераміки, і на поверхні кожної частки формується дифузійна оболонка.

В подальшому при плазмовому напиленні механічно легovanого композиційного порошку в суміші протікають перетворення за рахунок термічної активації, коли відбувається перехід низькотемпературної структури корунду $\alpha-Al_2O_3$ у високотемпературну модифікацію $\gamma-Al_2O_3$.

Рентгеноструктурний аналіз показав наявність в покритті різних фаз, окрім чистих елементів Mo, Ni, Al, також оксидів і інтерметалідів на їх основі. Для структури плазмових покриттів, отриманих на основі механічно легovanаних порошоків, характерна наявність тонких (менше 50 нм) прошарків нікелю, зміцнених нанорозмірними включеннями інтерметаліду типа $Ni_3(Al)$ [1]. Прошарки облямовують зерна оксидів.

Як показало дослідження [1], нікелеві прошарки, зміцнені нанорозмірними включеннями інтерметалідів, за своєю природою і до властивостей подібні покриттям з терморегуючих порошоків системи Ni–Al. Вони володіють високою твердістю, жароміцністю і зносостійкістю, сприяють запобіганню розтріскуванню оксидних часток із-за високої демпфуючої здатності цих прошарків.

Введення легуючих елементів знижує крихкість оксиду алюмінію, підвищує когезійну міцність і міцність зчеплення покриття з основою (Fe, сталь X18H10T).

Випробування на тертя показали, що при постійній кількості циклів випробувань незалежно від вигляду покриття знос зростає прямо пропорційно до певного рівня амплітуд, а потім спостерігається нелінійне зростання. Найбільш чутливими до зміни амплітуди мікропереміщення є покриття з порошоків на нікелевій основі, а найбільш стабільними молибденові покриття.

ПЛАЗМОТРОНИ ДЛЯ РІЗАННЯ

В.М. Пащенко, д.т.н., А.М. Кругляк магістр (КПІ ім. Ігоря Сікорського)

Плазмове різання матеріалів достатньо давно широко застосовується у заготівельному, ремонтному виробництвах. Але найбільш привабливим з економічної точки зору є застосування потоків низькотемпературної плазми при виробництві нових деталей та конструкцій.

Найчастіше плазмотрони, що застосовуються для плазмового різання, є плазмотронами прямої дії. Найбільш розповсюдженим у промисловості є плазмотрон прямої дії для плазмового різання повітрям ПВР-402 [1].

Плазмотрон використовує змінний термохімічний катод, який за допомогою різьби закріплений у катодотримачі. Корпус катодотримача одночасно використовується для закріплення плазмотрона на верстаті, підведення електричної енергії, робочого газу та охолоджувальної води. Ізолятор відокремлює катодний вузол від корпусної деталі. На корпусній деталі за допомогою накидної гайки закріплене сопло.

На боковій поверхні вихідної частини катодотримача виконана тризахідна прямокутна різьба для забезпечення тангенціального подавання плазмоутворювального повітря. Теплонапружені елементи конструкції плазмотрона охолоджується водою і ущільнюються кільцевими гумовими прокладками.

Сопло крім формування потоку плазми виконує ще одну функцію – воно приймає участь у двостадійному процесі збудження дуги. Спочатку дуга збуджується між катодом і соплом. «Чергова» дуга, яка створюється між катодом і соплом, обмежується за величиною струму з метою недопущення суттєвої ерозії сопла. У подальшому, факел «чергової» дуги торкаючись виробу створює провідний канал між електродом і заготовкою (анодом). Збуджується основна (робоча) дуга, яка горить між термохімічним катодом і матеріалом, що обробляється. Катодна вставка та сопло є змінними деталями конструкції і періодично замінюються на нові.

Відомо, що стійкість термохімічних катодів не перевищує кількох годин безперервної роботи [2]. Спроби підвищити термін роботи плазмотрона без заміни деталей призвели до застосування плазмотронів прямої дії із порожнистими електродами [3, 4].

Характерним прикладом такого типу різаків є плазмотрон ПВ-7. Він складається із сталевго корпусу, в якому розміщується ізоляційний стакан. У свою чергу всередині останнього розміщується внутрішній циліндричний електрод і сопловий електрод, які розділені між собою завихрювачем-ізолятором. Внутрішній циліндричний із дном електрод охоплює струмопровідна спіраль, яка виготовлена із мідної шини або мідного дроту. Спіраль з'єднана з одного боку із опорним кільцем, а з іншого – із штуцером, через який підводиться струм. Гайкою ізоляційний стакан затискується через шайбу у корпусі плазмотрона. Соплова гайка забезпечує притискання соплового електрода до завихрювача, а його самого до внутрішнього електрода, забезпечуючи тим самим надійний електричний контакт між ними. До сталевго корпусу приварені два штуцера, один із яких слугує для подавання плазмоутворювального повітря, а другий – для подавання охолоджувальної води.

Ущільнення водяних і повітряних трактів всередині плазмотрона здійснюється гумовими кільцями і прокладками.

Електричний пробій зазору між внутрішнім і сопловим електродами, наприклад, за допомогою осцилятора, викликає спочатку протікання струму «чергової» дуги, яка потім переходить у робочу (ріжучу або нагрівальну) дугу.

Дослідженнями встановлено, що за ідентичних умов швидкості різання (як максимальна, так і мінімальна), наприклад, для плазмотрона ПВ-47 (вдосконалений ПВ-7) на (20...40) % вище швидкостей різання плазмотроном ПВР-402 при всіх робочих струмах, а ресурс у (5...10) разів вищий [3]. Слід відмітити, що приблизно на стільки ж більше була і електрична потужність плазмотрона при однакових значеннях робочого струму.

Іншим варіантом підвищення ресурсу роботи плазмотрона є використання термохімічних катодів із кількома активними вставками із цирконію або гафнію [4]. Плазмотрон використовує мідний порожнистий катод із п'ятьма термохімічними вставками, на яких при струмі більше 200 А розміщуються опорні плями дуги. Катод має посереднє охолодження і розміщується у мідному корпусі катодного вузла, що охолоджується водою.

Дуговий канал утворює і частково формує потік плазми міжелектродна вставка, яка виготовляється із міді і має крізний отвір. Остаточне формування плазмової дуги відбувається за участю сопла, яке виготовлене із карбїду бору. Закручування плазмоутворювального повітря здійснюється тангенціальними отворами в ізоляторі.

Плазмотрон охолоджується водою, а герметичність водяних та газових трактів забезпечується гумовими кільцевими ущільненнями.

Використана література

1. Пашенко В. М. Дугові генератори в технологіях інженерії поверхні: моногр. / В. М. Пашенко. – Харків: Мачулін, 2018. – 288 с.
2. Быховский Д. Г. Плазменная резка [Текст] моногр. / Д. Г. Быховский. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1972. – 168 с.
3. Киселев Ю. Я. Исследование и разработка технологии и оборудования плазменно-дуговой резки металлов на обратной полярности [Текст] / Ю. Я. Киселев. – Кишинев: Технический университет Молдовы, Дисс. доктора-хабилитат тех. наук, 2005 – 331 с.
4. Дзюба В. Л. Фізика, техніка та застосування низькотемпературної плазми [Текст]: моногр. / В. Л. Дзюба, К. А. Корсунов. – Луганськ: вид-во СНУ ім. В.Даля, 2007. – 448 с.

ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ШАРІВ МЕТАЛУ ПИР 3D ДРУКУ МЕТОДОМ MAG

С.М. Мінаков, к.т.н., Н.М. Стреленко, к.т.н., Ю.В. Бова, студент, (НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»)

Сучасною тенденцією розвитку 3D друку є використання технологій зварювання, як інноваційного засобу виготовлення металоконструкцій. Найбільш розповсюдженим серед способів зварювання плавленням є *MAG (MIG)* зварювання. Вартість обладнання і зварювальних матеріалів для способу *MAG* є досить доступною. Конструкція пальника на гнучкому спрямовуючому каналі дозволяє досить легко кріпити його на механізмах подачі з трьох координат. Сучасні технології цифрового управління параметрами зварювальної дуги також додають зручності при спостереженні процесів 3D друку. Основним недоліком технології 3D друку металевих виробів методом *MAG* є накопичення зайвого тепла в наплавлених шарах металу, що призводить до необхідності робити зупинки з метою охолодження виробу, який друкується. Втрати металу на розбризкування також є негативним фактором. Зупинки з метою охолодження наплавлених шарів металу призводять до великої кількості стартів та закінчень процесу наплавлення. В результаті технологія 3D друку металевих виробів набуває властивостей нестационарних процесів. Це призводить до спотворення геометрії деталі. На початку наплавлення шару металу нестационарність термічного циклу полягає в тому, що попередні шари (після зупинки для охолодження) мають нижчу температуру ніж в середині процесу наплавлення шару. Формування валика відбувається вищим при початку ніж в середині. При закінченні шару відбувається зворотній процес, що призводить до збільшення температури деталі. Формування валика відбувається нижчим в кінці ніж в середині.

З метою усунення негативних наслідків формування валика металу на старті та закінченні запропоновано та експериментально підтверджено метод зміни напряму наплавлення шарів кожного наступного на зворотній. Це дозволяє зробити термічний цикл всіх ділянок кожного шару більш стабільним, що суттєво відображається на однорідності висоти наплавленого шару.

Нерівномірність термічного циклу при наплавленні шарів методом *MAG* зварювання обумовлена не тільки початком та закінченням шару, але і геометрією деталі. Ділянки деталі, що мають різну товщину будуть мати проблеми із формуванням валика через різницю температури ділянок. Це вимагає додаткових методів регулювання. Аналітичні методи врахування термічних циклів ділянок валиків знаходяться ще у стані розробки. На початковому етапі досліджень найбільш простим рішенням є залучення людини оператора, яка регулює процес зварювання.

Регулювання процесу 3D друку металевих виробів методом *MAG* зварювання можливе за основними параметрами: вольт-амперною характеристикою, швидкістю друку та швидкістю подачі електродного дроту. Оператор в режимі реального часу корегує процес наплавлення шарів змінюючи один із наведених вище параметрів для забезпечення необхідного рівня якості виробу.

ОТРИМАННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ ПОРОШКІВ ДЛЯ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

В.В. Козоріз, магістр, А.В. Чорний, доцент (КПІ ім. Ігоря Сікорського)

В сучасних реаліях в промисловому виробництві все частіше використовуються адитивні технології. Більшість тривимірного виробництва виконується шляхом накладання послідовних шарів матеріалу 3D моделі. За останні декілька років дана галузь науки і технологій набула популярності за рахунок можливості виконання виробів складних геометричних форм, простоті в користуванні та низької собівартості самих тривимірних принтерів. Найбільший потенціал дана технологія має в промисловості, космонавтиці, медицині, електротехніці, та кораблебудуванні.

На даному етапі розвитку дана технологія недостатньо широко використовується для отримання адитивних порошків за рахунок невеликої кількості використовуваних матеріалів. Звісно, з часом перелік матеріалів зростатиме і дана технологія набиратиме ще більшої популярності, ніж в даний момент. Отримання нових композиційних порошків на основі титану та титанових сплавів з допомогою тривимірного друку є невідкладною задачею та потребує особливої уваги. Сфероїдизація здійснюється шляхом переведення частинок із твердої фази у рідку. Рідка частинка за відомих причин набуває сферичної форми. При наступному охолодженні (за умови виключення дії сторонніх сил) рідка частинка сферичної форми переходить у твердий стан, зберігаючи форму сфери.

Для частинок із тугоплавких і (або) хімічно активних матеріалів чи не єдиним способом переведення їх у рідкий стан є нагрівання матеріалу у високотемпературному газовому середовищі із контрольованим складом.

Технологія плазмової обробки порошкових матеріалів за допомогою ВЧ-плазми дозволяє отримувати частинки сферичної форми незалежно від форми початкової сировини. Сфероїдизація порошкових матеріалів відбувається при їх проходженні через плазмовий струмінь, генерований високочастотним плазмотроном. Плазмотрон є мідною водоохолоджуваною камерою, поміщеною в кварцову трубу. Плазмотрон з кварцовою трубою розміщені в індукторі ВЧ-генератора, який створює потужне електромагнітне поле високої частоти.

Застосування ВЧ-плазми обумовлено широкою межею зміни швидкості плазмового струменя, що дає можливість обробки широкого спектру матеріалів. Друга важлива перевага цього процесу - відсутність в плазмі продуктів ерозії електродів, що дає можливість обробляти матеріали найвищої міри чистоти.

Потенціал ринку сферичних мікропорошків з матеріалів з особливими властивостями (карбідів, боридів, твердих сплавів і тому подібне) для 3D-друку або швидке прототипування об'ємних виробів складної форми величезний. Дана технологія принципово змінить структуру промислового виробництва і економіки, забезпечить автоматичне проектування деталей, гнучкість і швидкість виготовлення різних виробів, перерозподіл виробництва від великих підприємств до дрібних або виготовлення деталей безпосередньо у споживача.

ПЛАЗМОТРОНИ ДЛЯ НАПИЛЕННЯ ВНУТРІШНІХ ПОВЕРХОНЬ

В.М. Пащенко, д.т.н., В.С. Костишин магістр (КПІ ім. Ігоря Сікорського)

Плазмове напилення – один із чотирьох базових способів газотермічного нанесення покриття. Воно є найбільш продуктивним і універсальним, порівняно з альтернативними варіантами, і забезпечує нанесення покриттів із високими функціональними властивостями.

Одним із недоліків плазмотронів, які здійснюють нагрівання та прискорення частинок напилюваного матеріалу, є значні габаритні розміри генераторів плазми: елементи конструкції плазмотрона працюють в умовах екстремальних температур (щонайменше кілька тисяч градусів Кельвіна), тому мають, зазвичай, примусове охолодження електродів, яке суттєво збільшує габаритні розміри генераторів плазми. Не менш важливим фактором просторового обмеження на застосування плазмотронів для напилення, є розміри плазмового факела і необхідність дотримання визначеної дистанції між плазмовим пристроєм та виробом. Все це створює певні труднощі у разі необхідності нанесення покриттів в умовах обмеженого простору: порожнинах, пазах, отворах, на внутрішні поверхні посудин тощо.

Залежно від розмірів порожнин теоретично можливе застосування серійних конструкцій розпилювачів. Але, з урахуванням дистанції напилення (150...250) мм і розмірів генераторів плазми (150...350) мм, розміри порожнини не можуть бути меншими (400...700) мм. Таке обмеження суттєво звужує коло задач, які можуть бути вирішені плазмовим нанесенням покриттів.

Промисловістю свого часу були зроблені певні кроки для вирішення згаданої проблеми. Наприклад, базова модель плазмотрона ПУН-1, призначеного для роботи у складі установки «Київ-7», може бути укомплектована кутовим варіантом дугового каналу [1]. В цілому розроблено декілька модифікацій ПУН: для нанесення покриттів на зовнішню поверхню деталей (ПУН-1), для нанесення покриттів на внутрішню поверхню деталей (ПУН-1В) і для нанесення склоподібних порошкових матеріалів на елементи будівельних конструкцій (ПУН-1С). Плазмотрон ПУН-1 розроблений на основі принципової схеми лінійного плазмотрона постійного струму з одиночною металеву МЕВ. Він має катодний вузол, що оснащений змінним термохімічним катодом, який випускається серійно.

Застосування кутового сопла дозволяє розмістити корпус генератора плазми паралельно або під невеликим кутом до поверхні, на якій формується покриття, а газопорошковий потік спрямувати на цю поверхню під певним кутом. Таким чином, можна скоротити фактичну відстань до виробу, зберігши необхідну дистанцію напилення. Результатом є зменшення мінімального розміру порожнини де проводиться формування покриття до (250...300) мм.

Основним недоліком кутового сопла є його знижений ресурс порівняно із базовим суцільним анодом, що є наслідком примусової зміни напрямку витікання вже сформованого потоку плазми. При цьому інтенсифікується тепловий потік у стінку дугового каналу у місці повертання плазмового потоку і збільшується темп ерозії матеріалу електрода.

Ще одним суттєвим недоліком кутового сопла є зменшення кута зустрічі двофазного потоку з поверхнею у ході формування покриття від традиційного 90° до

(45...50)°. Зменшення кута негативно впливає на такі показники якості покриття, як міцність зчеплення з основою та пористість покриття.

Принципово новим варіантом реалізації схеми «кутового сопла» є конструкція, запропонована у роботі [2]. Повертання потоку плазми відбувається ще на стадії його формування. Наслідком цього є суттєве зниження втрат у стінку дугового каналу за рахунок часткового збереження прошарку «холодного» газу між плазмою (дугою) і стінкою дугового каналу.

Іншим шляхом вирішення проблеми розширення розмірного діапазону можливого застосування плазмового напилення може бути зменшення габаритних розмірів розпилювачів зі збереженням умов формування покриття. Наприклад, у ТОВ НВЦ «ПЛАЗЕР» розроблений плазмотрон для напилення внутрішніх поверхонь [3]. Принципова схема плазмотрона не відрізняється від розглянутої вище – це плазмовий генератор з поодинокую міжелектродною вставкою. За рахунок зменшення потужності генератора і застосування термохімічного катода спеціальної конструкції вдалося зменшити габаритні розміри плазмотрона. В результаті таку конструкцію можна застосувати для напилення внутрішніх поверхонь із розміром порожнини від 170 мм і вище.

На ринку пропонуються цілий ряд плазмотронів для напилення внутрішніх поверхонь відомих фірм «Tafa», «Metko Sulzer» [4]. Це двоелектродні плазмотрони з певними обмеженнями за діаметром і глибиною внутрішніх поверхонь, що обробляються. F-1 застосовується для напилення порожнин діаметром від 70 мм із глибиною занурення до 500 мм, 11MB – порожнини діаметром від 80 мм і глибиною занурення до 1000 мм, SG-100 M2700 – порожнини діаметром від 70 мм і глибиною занурення до 600 мм. Практично, запропоновані плазмотрони є варіантами застосування «кутового сопла» із подовженим вихідним електродом, по якому рухається вже сформований потік високотемпературного газу, або мініплазмотронами, які встановлені на виносних комунікаціях.

У загальному випадку зменшення потужності плазмового розпилювача неминуче призводить до зменшення продуктивності процесу і, певною мірою, негативно впливає на фізико-механічні характеристики отриманих покриттів. Використання того чи іншого плазмотрона у конкретному випадку є компромісом між вимогами до показників ефективності процесу напилення та можливістю його застосування в умовах просторових обмежень.

Використана література

1. Пащенко В. М. Обладнання для газотермічного нанесення покриття: навч. посіб. / В. М. Пащенко. – К.: ІВЦ “Політехніка”, 2001. – 416 с.
2. Пащенко В. М. Генерування потоків плазми та керування їх енергетично-просторовими параметрами: моногр. / В. М. Пащенко. – Київ: Гнозіс, 2014. – 283 с.
3. Пащенко В. М. Дугові генератори в технологіях інженерії поверхні: моногр. / В. М. Пащенко. – Харків: Мачулін, 2018. – 288 с.
4. <http://www.plakart.pro/catalog/plazmotrony>

ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ НАПЛАВЛЕНОГО МЕТАЛУ З ВИКОРИСТАННЯМ НАНОПОРОШКІВ ОКСИДІВ ТА КАРБІДІВ

*О.М. Шкіндер, Ю.Ю. Оксенюк магістр, Д.В. Степанов, к.т.н., доцент
(КПІ ім. Ігоря Сікорського)*

Дугове наплавлення – один з найпоширеніших способів відновлення функціональних властивостей деталей машин. Вибір наплавних матеріалів виконується у переважній більшості випадків, виходячи з твердості металу, що наплавляється, та без достатнього обґрунтування обраного варіанту з точки зору оптимальної зносостійкості пари тертя, без урахування впливу механічних властивостей, структури та фазового складу матеріалу на зношування кожної з контактуючих поверхонь.

Однак досвід застосування рекомендованих наплавних матеріалів вказує на їх недостатню надійність в тих чи інших умовах експлуатації. Підвищення ефективності застосування наплавних матеріалів має два шляхи вирішення – розробка і застосування нових спеціальних легуючих систем та матеріалів або пошук нових підходів щодо керування структурою і властивостями наплавленого металу без зміни системи легування.

Одним зі способів вирішення проблеми покращення властивостей наплавленого шару є управління структурою такого металу за допомогою використання модифікаторів. Модифікатори здійснюють вплив на умови кристалізації, розмір первинної структури і, відповідно, властивості наплавленого металу. При чому модифікатори чинять позитивний вплив на властивості наплавленого металу при введенні незначної їх кількості (соті долі відсотка).

Аналіз сучасних тенденцій у великій металургії, литті, зварюванні та наплавленні в проблемі покращення структури і властивостей литого металу вказує на перспективність застосування нанопорошкових матеріалів.

Виходячи з вищевикладеного актуальним є створення підходу до розробки технології наплавлення із застосуванням нанопорошкових матеріалів.

Введення наноконценту в зону наплавлення відбувалося за допомогою парафінового стрижня: парафін розтоплювався, змішувався з нанопорошком у заданій пропорції, перемішувався та застигав. Перед наплавленням цим стрижнем було промазано зону наплавлення. Використовувались нанопорошки SiO_2 та TiC . Наплавлення проводилось на сталь 09Г2С дротом марки Велтек-Н300РМ-S, діаметром 2 мм. Для захисту було використано зварювальний флюс АН-60.

Метал, в який вводили нанопорошок TiC показує зносостійкість більшу порівняно з металом без вводу наноконцентів на 20, 40 та 60% при концентрації нанопорошку TiC в парафіновому стрижні 0,5, 1 та 5 і 10% відповідно. Метал з SiO_2 (концентрація 7 і 10%) також показав позитивний ефект, його зносостійкість виявилась на 60% більшою, ніж в металу без наноконцентів.

Аналіз даних вимірювання мікротвердості вказує на збільшення значень мікротвердості металу при введенні до зварювальної ванни як нанопорошку SiO_2 так і TiC . Так метал без нанодобавок має значення мікротвердості 2,8 ГПа, метал з SiO_2 (10% у стрижні) – 3,3 ГПа, метал з TiC (5% у стрижні) – 4.05 ГПа. Збільшення мікротвердості пояснює збільшення зносостійкості наплавленого металу.

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

Сьома всеукраїнська науково-технічна конференція студентів, аспірантів та наукових співробітників

«ІНЖЕНЕРІЯ ПОВЕРХНІ. КОМПЛЕКСНИЙ ПІДХІД»

23 травня 2019 року

МАТЕРІАЛИ КОНФЕРЕНЦІЇ

(українською мовою)

Матеріали видаються за оригіналами поданими авторами

Комп'ютерна верстка Чорний А.В.

Підписано до друку 20.05.2019. Формат 60x84. Папір офсетний.

Гарнітура Times. Трафаретний друк.

Умов. друк. арк. 1,3. Наклад 20 прим.

Зам. № 10002865/10022834. Ціна договірна.

Надруковано в ТОВ «Фастпринт»

Типографія оперативного друку «Фастпринт»

01033, м. Київ, вул. Василя Яна 3/5

Тел.: 044 - 503-88-26