



КОРЖИК

Володимир Миколайович — член-кореспондент НАН України, завідувач відділу електротермічних процесів обробки матеріалів Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України

СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ В УКРАЇНІ ПЛАЗМОВО-ДУГОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ ОТРИМАННЯ, ОБРОБКИ, З'ЄДНАННЯ ТА 3D-ДРУКУ ВИРОБІВ ІЗ НОВІТНІХ МАТЕРІАЛІВ

Стенограма доповіді на засіданні Президії НАН України 29 травня 2024 року

У доповіді наведено основні результати проведених в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України фундаментальних і прикладних досліджень у галузі плазмових та гібридних технологій. Особливу увагу приділено перспективам широкого практичного застосування розробок, пов'язаних зі створенням нових плазмово-дугових технологій отримання, обробки, з'єднання та 3D-друку виробів із новітніх матеріалів для ремонтного відновлення відповідальних деталей газотурбінних двигунів, конструкцій літальних апаратів, а також для підвищення довговічності й живучості відповідальних елементів спецтехніки.

Шановні члени Президії!

Шановні колеги!

До вашої уваги пропонується доповідь, присвячена науково-практичним результатам досліджень і розробок у галузі матеріалознавства та плазмово-дугових технологій з'єднання, обробки, отримання нових матеріалів та 3D-друку об'ємних великогабаритних виробів із них, а також технологій нанесення функціональних покриттів.

Актуальність цих робіт зумовлена необхідністю створення й застосування розроблених матеріалів і технологій, які використовують плазмові та інші концентровані джерела енергії для підвищення ресурсу та ремонтного відновлення відповідальних деталей газотурбінних двигунів, автомобільної, авіаційної та іншої спеціальної техніки, для захисту радіоелектронної апаратури від електромагнітного випромінювання, а також для забезпечення конфіденційності інформації.

Серед нових розробок у галузі плазмово-дугових технологій, виконаних в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона у співпраці з іншими академічними установами, українськими підприємствами, а також у рамках міжнародного науково-тех-

Рис. 1. Роботизований комплекс для нанесення зносостійких, корозійностійких, теплозахисних і спеціальних покриттів методами високошвидкісного плазмово-дугового наплення



нічного співробітництва, можна виокремити чотири основні групи технологій:

- отримання металевих, керамічних і металокерамічних нанокристалічних покриттів широкого функціонального призначення;
- отримання порошків із заданими розмірами і параметрами сферичності та нанорозмірних матеріалів;
- поверхнева модифікація (зміцнення) відповідальних деталей;
- зварювання, адитивне наплавлення (3D-друк металевих об'ємних виробів та конструкцій).

Зазначені технології реалізовано на основі уніфікованого наукового підходу до створення генераторів низькотемпературної плазми дугового розряду, розроблення теоретичних засад і методів їх розрахунку для подальшого розвитку вже наявних методів, розроблення та практичної реалізації нових технологій і обладнання для зварювання, наплавлення, отримання нових матеріалів, оброблення поверхонь і нанесення покриттів.

Розглянемо детальніше перелічені вище напрями робіт.

Отримання металевих, керамічних і металокерамічних нанокристалічних покриттів широкого функціонального призначення. За цим напрямом розроблено наукові засади процесів плазмово-дугового наплення покриттів з нанокристалічною і аморфною структурою,

виконано комплекс теоретичних та експериментальних досліджень, які підтвердили, що реалізація процесу за надзвукових швидкостей витікання плазмових струменів забезпечує формування нанокристалічної структури в покриттях з металевих сплавів, кераміки та керметів. Створено п'ять модифікацій обладнання для надзвукового наплення таких покриттів, зокрема для роботи у складі роботизованих комплексів; організовано їх виробництво в Україні (рис. 1).

Підтверджено перспективність використання наноструктурованих феромагнітних покриттів, отриманих за технологією надзвукового плазмово-дугового наплення, для екранування корпусних конструкцій різних приладів та комп'ютерної техніки з метою забезпечення конфіденційності інформації. Такі покриття можна використовувати також для екранування радіоелектронної апаратури в радіочастотному діапазоні електромагнітного випромінювання, що особливо актуально для забезпечення керованості та живучості безпілотних літальних апаратів в умовах радіоелектронної боротьби.

На авіаремонтному підприємстві «УРАРП» (м. Миколаїв) організовано промислову дільницю плазмового наплення ущільнювальних покриттів на внутрішні поверхні статора в процесі ремонту авіаційних газотурбінних двигунів. Технологія надзвукового плазмового на-

пилення довела свою ефективність у нанесенні теплозахисних покриттів $\text{CoCrAlY}+\text{ZrO}_2-\text{Y}_2\text{O}_3$ на жарові труби газових турбін, а також для збільшення ресурсу лопаток енергетичних газових турбін. Крім того, ці покриття показали високу ефективність у підвищенні довговічності відповідальних деталей авіаційної техніки: лабіринтних і торцевих ущільнень, компресорних лопаток тощо.

Розроблено технологію і створено обладнання для високошвидкісного плазмового напилення струмопровідними порошковими дротами зносостійких покриттів товщиною до 1,0–1,5 мм на внутрішні поверхні діаметром понад 80 мм довгомірних трубчастих виробів (до 10–15 м). Це зумовлює перспективи застосування цієї технології для відновлення зношених внутрішніх поверхонь стволів артилерійської техніки.

Отримання порошків із заданими розмірами і параметрами сферичності та нанорозмірних матеріалів. Для реалізації цього напряму робіт розроблено наукові основи плазмово-дугових технологій отримання гранул дрібнодисперсних фракцій (до 60–100 мкм) з коефіцієнтом сферичності 0,75–0,85, які відповідають вимогам до матеріалів адитивного виробництва. Такі технології включають плазмове розпилення дрових матеріалів, плазмове розпилення прутків і зливків, плазмову сфероїдизацію порошків неправильної форми. Вивчено закономірності процесів сфероїдизації крапель дисперсних частинок при плазмово-дуговому розпиленні струмопровідних компактних і металопорошкових дров.

Підтверджено можливість отримання інтерметалідних сферичних гранул (наприклад, Fe_3Al) при розпиленні металопорошкових дров, які складаються із залізної оболонки та алюмінієвого порошкового осердя. Розроблено високопродуктивну технологію отримання дрібнодисперсних сферичних гранул із жаростійких сплавів і тугоплавких металів (W, Mo) розпиленням надзвуковими плазмовими струменями нерухомих прутків або зливків діаметром 50–60 мм. Створено оригінальну гібридну технологію розпилення двох дров або

прутків з поєднанням електричної дуги та надзвукового плазмового струменя, що дозволяє отримувати сферичні гранули, в яких частка дрібнодисперсної фракції (<63 мкм) становить 70–80 %.

Розроблено універсальне обладнання для реалізації описаних вище варіантів технологій плазмово-дугового розпилення таких матеріалів у захисній атмосфері, що вигідно відрізняється від провідних світових аналогів меншими (в 3–5 разів) масо-габаритними характеристиками.

Показано, що використання надзвукових плазмових струменів із режимом витікання, близьким до ламінарного, є перспективним для сфероїдизації порошків неправильної форми, отриманих подрібненням, хімічним або механохімічним синтезом.

Проведено також дослідження нагрівання, плавлення, випаровування мікрометричних порошків металів розмірами до 20–40 мкм у струмені дугової плазми та їх подальшої конденсації для синтезу нанопорошків. Отримані попередні результати дають підстави розглядати такий процес як основу для великосерійного високопродуктивного (10–50 кг/год) виробництва нанопорошків, наприклад для отримання нанокремнію, який є перспективним матеріалом для підвищення ємності акумуляторних батарей, а також для отримання наноалюмінію, який використовують для поліпшення характеристик ракетного палива.

Поверхнева модифікація (зміцнення) відповідальних деталей. За цим напрямом розроблено групу процесів, у яких використовують дугову плазму, а також гібридні технології, основані на поєднанні плазми з іншими концентрованими джерелами енергії.

Для формування поверхневих наноструктурованих шарів перспективним є процес імпульсно-плазмової обробки з одночасним легуванням поверхні парами витратного електрода. Густина потужності плазмового струменя, що генерується в продуктах детонаційного згорання горючих газів, сягає 10^5-10^7 Вт/см² за швидкості до 5–8 км/с. Наприклад, формування наноструктурованих поверхневих шарів

Рис. 2. Процес плазмово-електролітної обробки шийки дизельного колінчастого вала (довжина 5 м, маса до 2000 кг)



товщиною 40–80 мкм на виробках із титанового сплаву Ti-Al-V приводить до підвищення мікротвердості в 2,5 раза.

Розроблено також обладнання для поверхневого зміцнення, яке реалізує поверхневу термічну і хіміко-термічну обробку плазмовою дугою, гібридні та комбіновані процеси «лазер + дугова плазма», «дугова плазма + плазмово-іскрове легування» тощо. В Україні організовано виробництво п'яти марок обладнання для реалізації цих технологій, зокрема для роботи у складі роботизованих комплексів. Накопичено певний досвід експлуатації цього обладнання і технологій.

Імпульсна плазмово-детонаційна модифікація поверхневих шарів деталей кріплення в авіації, автомобільних деталей, інструментів для обробки тиском, що працюють в умовах підвищених контактних навантажень, збільшує їх довговічність у 2–6 разів. Технологія плазмово-дугового поверхневого зміцнення гребенів колісних пар рухомого складу залізничного транспорту підвищує їхню зносостійкість у 2–3 рази і водночас зменшує знос рейок та знижує рівень шуму. Для реалізації цієї технології було створено обладнання, яке впроваджено в АТ «Укрзалізниця».

Гібридна лазерно-плазмова хіміко-термічна обробка високоміцного титанового сплаву в локальній атмосфері азоту дозволяє сформу-

вати поверхневі шари з більшою (в 2,5 раза) твердістю, що сприяє підвищенню балістичної стійкості титанової броні.

Результати попередніх досліджень підтвердили перспективність застосування для зміцнення каналу ствола артилерійської техніки комбінованої технології «обробка плазмовою дугою з магнітним керуванням + плазмово-іскрове легування» — зносостійкість при цьому підвищується на 50 %.

Для формування функціональних зносостійких поверхонь із регулярною структурою з локальними включеннями підвищеної твердості (60 HRC) розроблено процес обробки внутрішніх і зовнішніх поверхонь виробів плазмовою в шарі водних розчинів електроліту. Ця технологія показала свою ефективність у підвищенні ресурсу таких деталей, як гільза циліндра, сферичний підп'ятник, підшипники ковзання тощо. Технологію впроваджено у ТДВ «Первомайськдизельмаш» для зміцнення корінних і шатунних шийок та підвищення ресурсу великогабаритних колінчастих валів дизельних двигунів (рис. 2). Також ця технологія є перспективною для зміцнення шийок колінчастих валів двигунів бронетехніки в процесі ремонту після перешліфування під ремонтні розміри.

Крім того, ця технологія плазмово-електролітної обробки пройшла промислові випробування на Інгулецькому гірничозбагачуваль-

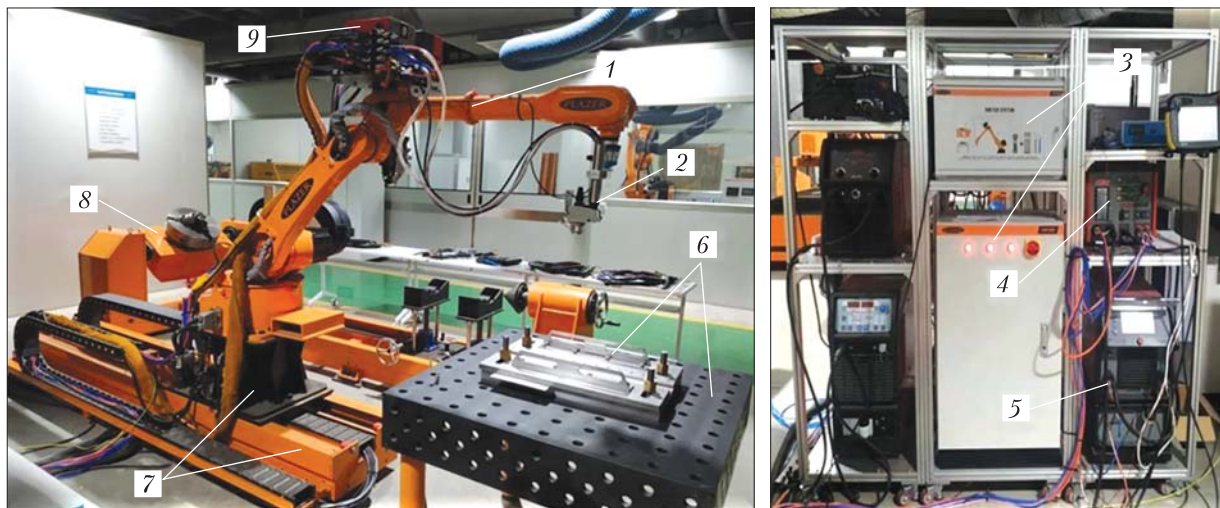


Рис. 3. Багатофункціональний роботизований комплекс з інтелектуальною системою керування для 3D-друку великогабаритних деталей і тіл обертання: 1 – антропоморфний робот; 2 – плазмотрони; 3 – інтелектуальна система керування процесом; 4 – плазмовий модуль; 5 – джерело живлення плазмової дуги; 6 – стіл для наплавлення з технологічним оснащенням; 7 – система переміщення робота; 8 – двівісний обертач-маніпулятор; 9 – механізм подавання присаджувального дроту

ному комбінаті, які підтвердили підвищення в 2–3 рази ресурсу бурового обладнання (труба, замок, муфта).

Є також перспектива застосування плазмово-електролітної обробки для формування зносостійких функціональних внутрішніх поверхонь артилерійських стволів у вигляді гвинтових локальних ділянок або ліній підвищеної твердості (до 55–65 HRC). Така обробка сприяє утворенню в процесі експлуатації системи мікрозападин та аеродинамічних клинів, які за високих швидкостей ковзання снаряду забезпечуватимуть формування розділового газового шару. Створено і підготовлено в Україні виробництво обладнання, яке дозволяє виконувати таку обробку внутрішніх і зовнішніх циліндричних та плоских поверхонь у довгомірних виробках довжиною до 12 м.

Зварювання, адитивне наплавлення (3D-друк металевих об'ємних виробів та конструкцій). За цим напрямом розроблено наукові основи технологій зварювання і наплавлення з використанням плазмової дуги або її поєднання з електричною дугою та лазерним випромінюванням. Створено оригінальну тех-

нологію плазмово-дугового і гібридного точкового та шовного зварювання металів і сплавів різнополярним асиметричним струмом. Розроблено чотири зразки промислового обладнання й організовано їх виробництво в Україні.

Використання технології плазмово-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом високоміцних алюмінієвих сплавів, які належать до важкозварюваних, дозволяє на 20 % знизити масу корпусних конструкцій літальних апаратів. А застосування розробленого обладнання для точкового плазмового зварювання при виготовленні полегшених пустотілих конструкцій дає змогу додатково зменшити їхню вагу ще на 30–60 % зі збереженням високих показників міцності та жорсткості. При цьому швидкісне гібридне лазерно-плазмово зварювання забезпечує підвищення (в 3–10 разів) продуктивності виробництва довгомірних панелей для літальних апаратів і швидкісних катерів.

Було також підтверджено перспективність використання технології плазмово-порошкового наплавлення для зміцнення та відновлення внутрішніх поверхонь стволів артилерій-

Рис. 4. Заготовка зовнішнього кільця жарової труби авіаційного газотурбінного двигуна з нікелевого жароміцного сплаву EI 868 (XN60VT): *a* – після 3D-друку методом адитивного плазмово-порошкового наплавлення; *б* – готова деталь після механічної обробки (АТ «Мотор Січ»)

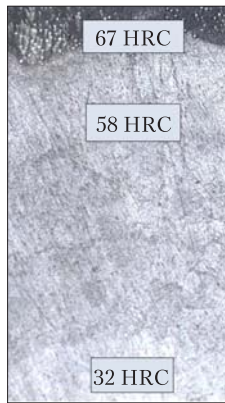


Рис. 5. Реалізація гібридної адитивної технології «плазмово наплавлення присаджувальним дротом – плазмово-порошкове наплавлення»: *a* – зовнішній вигляд системи; *б* – структура напавленої багатшарової стінки з функціонально-градієнтного матеріалу Ti-6Al-4V + WC ($\times 50$); *в* – структура її верхнього напавленого шару ($\times 200$)

ської техніки. Показано можливість наплавлення шару товщиною 1–5 мм на внутрішні поверхні діаметром від 70–80 мм трубчастого виробу з високоміцної сталі. Вибір типу наплавного матеріалу дозволяє змінювати твердість напавленого шару в інтервалі від 400 до 700 за шкалою Віккерса.

На основі нових розробок і досягнень у галузі плазмово-дугових зварювальних технологій створено наукові засади процесів 3D-друку об'ємних великогабаритних металевих виробів шляхом адитивного (пошарового) плазмово-дугового наплавлення. Реалізовано групу нових технологій 3D-друку об'ємних виробів із металевих сплавів, яка включає процеси адитивного плазмово-дугового наплавлення в широкому інтервалі величин і характеристик зварювальних струмів, за різних типів присадних матеріалів (дротів, порошоків, їх поєднання), а також гібридні процеси «плазма +

електрична дуга», «плазма + лазер». Створено і організовано виробництво принтерів для виготовлення об'ємних металевих виробів.

Розроблено роботизований комплекс 3D-друку з інтелектуальною системою керування, для якого практично немає обмежень щодо габаритів об'ємних металевих виробів (рис. 3). Зараз в АТ «Мотор Січ» налагоджено роботу з відновлення контактних поверхонь лопаток газотурбінних двигунів методом адитивного мікроплазмового наплавлення, а також з виготовлення зовнішнього кільця жарової труби (рис. 4) та інших деталей газотурбінного двигуна. Об'ємні вироби з жаростійких нікелевих сплавів, отримані адитивним плазмовим наплавленням, відповідають вимогам технічної документації для виготовлення статорних деталей авіаційних двигунів.

Для роботи в умовах підвищених динамічних навантажень за допомогою адитивного

плазмового наплавлення отримано циліндричні та довгомірні профільні конструкції (довжиною до 6 м) з високоміцних алюмінієвих сплавів, легованих скандієм.

На сьогодні в США компанія Genius активно проводить роботи з 3D-друку ракет, використовуючи при цьому дугову технологію, що за низкою показників поступається адитивним плазмово-дуговим процесам і характеризується відносно низькою продуктивністю, а також має деякі обмеження: використання лише одного присадного дроту діаметром менш як 1 мм, відсутність можливості керування хімічним складом тощо. Дослідження, проведені в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, підтвердили можливість значного підвищення продуктивності 3D-друку при використанні адитивних плазмово-дугових процесів, а також реалізацію додаткових технологічних переваг, таких як синтез нових високоміцних сплавів, можливість плавного змінення хімічного складу надрукованого матеріалу в умовах 3D-друку з використанням двох і більше різнорідних дротів та ін. Також підтверджено, що за допомогою гібридних процесів 3D-друку на основі плазмово-дугової технології відкриваються можливості для отримання просторових виробів із функціо-

нально-градієнтних металоматричних матеріалів, тобто виробів зі змінним хімічним складом та концентрацією зміцнювальних фаз в їх об'ємі. Так, отримано просторові вироби з функціонально-градієнтного матеріалу Ti-6Al-4V + WC, в яких вміст карбіду вольфраму змінюється від 0 до 50 мас. %, а твердість за Роквеллом — від 32 до 67 і вище (рис. 5).

В Інституті зараз реалізується великий проєкт з побудови дослідно-технологічної платформи з трьома роботизованими комплексами 3D-друку, яка має стати базою для підготовки в Україні виробництв великогабаритних конструкцій літальних апаратів і спецтехніки діаметром до 3 м і довжиною до кількох метрів з алюмінієвих, титанових та інших сплавів і функціонально-градієнтних матеріалів на їх основі. Наявність такої технології і відповідного обладнання відкриває можливості для організації в Україні принципово нового типу виробництва спеціальних великогабаритних виробів, адже завдяки створенню розосереджених невеликих роботизованих ділянок можна реалізувати децентралізацію виробництв, що на сьогодні, зрозуміло, має стратегічне значення.

Дякую за увагу!

За матеріалами засідання підготувала О.О. Мележик

Volodymyr M. Korzhyk

Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9106-8593>

STATE AND PROSPECTS OF DEVELOPMENT IN UKRAINE OF PLASMA-ARC TECHNOLOGIES FOR OBTAINING, PROCESSING, JOINING AND 3D PRINTING OF PRODUCTS FROM THE NOVEL MATERIALS

Transcript of scientific report at the meeting of the Presidium of the NAS of Ukraine, May 29, 2024

The report presents the main results of fundamental and applied research in the field of plasma and hybrid technologies conducted at the Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine. Particular attention is paid to the prospects for widespread practical application of developments related to the creation of new plasma-arc technologies for obtaining, processing, joining and 3D printing of products from the novel materials for the repair restoration of critical parts of gas turbine engines, aircraft structures, as well as for increasing the durability and survivability of critical elements of special equipment.

Cite this article: Korzhyk V.M. State and prospects of development in Ukraine of plasma-arc technologies for obtaining, processing, joining and 3D printing of products from the novel materials. *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 2024. (7): 62–68. <https://doi.org/10.15407/visn2024.07.062>