

ПЛАЗМОВО-ДУГОВІ ТЕХНОЛОГІЇ АДИТИВНОГО НАПЛАВЛЕННЯ (3D ДРУКУ) ПРОСТОРОВИХ МЕТАЛЕВИХ ВИРОБІВ: ДОСВІД ЗАСТОСУВАННЯ І НОВІ МОЖЛИВОСТІ

В.М. Коржик¹, А.А. Гринюк¹, В.Ю. Хаскін¹, О.М. Войтенко¹, О.М. Бурлаченко¹, О.О. Хуан^{2,3}

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: vnkorzhyk@gmail.com

²ІМЗ ім. Є.О. Патона, НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, просп. Берестейський, 37. E-mail: olha_khuan@ukr.net

³Науково-дослідний інститут зварювальних технологій імені Патона в провінції Чжецзян. КНР, провінція Чжецзян, м. Ханчжоу, район Сяошань, вул. Шісін Белу 857, оф. 426. E-mail: oliamir@163.com

Зростання актуальності 3D друку готових металевих виробів в останні роки обумовлене скороченням витрат на виготовлення, механічну обробку, зміну типорозмірів і номенклатури деталей, можливістю отримання суцільних деталей зі складною внутрішньої геометрією. Одним з найперспективніших процесів 3D друку, який забезпечує широкий діапазон продуктивності (0,02...25 кг/год. і більше) при можливості наплавлення стінки завтовшки 2...20 мм є адитивне плазмово-дугове наплавлення (АПДН) дротами та порошковими матеріалами. У роботі розглянуто сучасний стан досліджень адитивного виробництва металевих деталей зі сталей і сплавів, визначено стан і перспективи розвитку АПДН. Показано, що АПДН дозволяє виконувати 3D друк із використанням широкої номенклатури присаджувальних матеріалів, зокрема компактних і композиційних (порошкових) дротів, порошків легких сплавів і тугоплавких металів, композиційних порошків і механічних сумішей порошків сплавів, металокераміки, карбідів, боридів тощо. До нових можливостей застосування АПДН відносяться розробка технологій вирощування виробів із матеріалів з градієнтними функціональними властивостями, із різнорідних матеріалів, із супутнім модифікуванням наплавленого металу додатковою обробкою, покращенням властивостей наплавленого металу за рахунок застосування гібридних процесів. Висвітлено стан інноваційних розробок технологій та обладнання АПДН, виконаних в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, та їх промислового впровадження. Бібліогр. 32, табл. 5, рис. 22.

Ключові слова: адитивне виробництво, 3D друк, плазмово-дугове наплавлення, сталі, нікелеві, алюмінієві, титанові сплави, структура, механічні властивості, градієнтні функціональні властивості, обладнання

Вступ, мета і задачі роботи. В останні роки у підході до використання процесів 3D друку відбувся якісний стрибок, пов'язаний з переходом від створення моделей-прототипів, за якими виготовляли металеві вироби, до безпосереднього друку таких виробів з різних металів і сплавів [1]. Сучасне адитивне виробництво (AM – Additive Manufacturing) – це інноваційний виробничий процес, який пропонує виготовлення виробів з розвиненою геометрією поверхні необхідного розміру із поверхнею, яка потребує мінімальної механічної обробки, безпосередньо з САД-моделей, що призводить до скорочення часу виготовлення, зменшення об'єму відходів і фінальної вартості. Наприклад, вартість адитивного наплавлення титанових деталей авіаційної техніки є вдвічі нижчою за вартість їх виготовлення з кованих заготовок [2]. Ще одним важливим напрямком застосування адитивного виробництва є військова справа. Таким чином, завдяки надзвичайній гнучкості та можливості адаптування до розв'язання широкої номенклатури промислових задач адитивне вирощування деталей стає все актуальнішим у сучасному світі.

У сучасному адитивному виробництві для отримання готового металевого виробу переважно використовують два основні підходи [1, 2]: пошарове селективне плавлення порошку та пряме пошарове вирощування стінки деталі із матеріалу у вигляді порошку або дроту. Для процесів селективного плавлення порошку використовують енергію лазерного (SLM) або електронного променю (EBSM). Обидва ці процеси забезпечують формування деталей згідно з заданими у моделях розмірами. Після 3D друку даними способами у більшості випадків не використовують механічну обробку поверхні деталі. Але у цих способів є низка суттєвих недоліків, а саме: розміри деталей, які можна друкувати, обмежуються розмірами установок для друку даними способами (робоче поле не більше 800×800×800 мм); складне коштовне обладнання; необхідність використання порошків правильної сферичної форми дрібних розмірів (5...15 мкм), які є коштовними та вибухо- і пожежонебезпечними; необхідність використання в рази більшої кількості порошку, ніж об'єм готової деталі; при вирощуванні деталі з

Коржик В.М. – <http://orcid.org/0000-0001-9106-8593>, Гринюк А.А. – <https://orcid.org/0000-0002-6088-7980>, Хаскін В.Ю. – <http://orcid.org/0000-0003-3072-6761>, Войтенко О.М. – <https://orcid.org/0000-0003-4946-6517>, Бурлаченко О.М. – <https://orcid.org/0000-0003-2277-4202>, Хуан О.О. – <https://orcid.org/0009-0001-2623-5321>
© В.М. Коржик, А.А. Гринюк, В.Ю. Хаскін, О.М. Войтенко, О.М. Бурлаченко, О.О. Хуан, 2023

градієнтними відмінностями механічних властивостей при поступовому використанні порошків різного хімічного складу відбувається їх змішування поза зоною сплавлення, що викликає необхідність відбракування порошку, який лишається в установці після завершення друку.

Часто у виробництві виникає потреба сформувати заготовку з певного матеріалу із механічною обробкою після вирощування. У такому випадку доцільно використовувати адитивне вирощування за допомогою плавлення електричною дугою матеріалу, що подається у зварювальну ванну, а саме [3]: аргонодугове наплавлення неплавким електродом (TIG) з присаджувальним дротом; наплавлення плавким електродом, включаючи процеси наплавлення під шаром флюсу (SAW), наплавлення плавким електродом у середовищі захисного газу (MIG/MAG процес і, як його різновид, процес «холодного переносу металу» СМТ), а також адитивне плазмово-дугове наплавлення (АПДН) порошками або присаджувальними дротами.

Найперспективнішим з точки зору продуктивності вирощування, збільшення коефіцієнту використання матеріалу, якості наплавленого металу, можливості скоротити процес механічної обробки заготовки за рахунок максимального наближення до реальних розмірів деталі є саме плазмово-дугове наплавлення [4]. Процес АПДН можна реалізовувати у діапазоні струмів 3...450 А. При цьому процес зварювання/наплавлення при струмах до 50 А отримав окрему назву – мікроплазмове зварювання/наплавлення [5].

Значний внесок в розвиток процесів 3D друку металевих матеріалів з використанням енергії стисненої дуги та порошкових матеріалів і присаджувальних дротів зробили науковці ІЕЗ ім. Є.О. Патона та ІМЗ ім. Є.О. Патона [3–5].

Серед адитивних технологій, які використовують методи наплавлення, на даний час набули найбільшого розповсюдження процеси DED-W/WAAM/3DMP (Wire Direct Energy Deposition/Wire Arc Additive Manufacturing/3D Metal Prin), або WAAM – адитивне наплавлення металевим дротом, у які входять дугові процеси із використанням неплавкого та плавкого електроду, а також процеси із коротким замиканням дугового проміжку (типу СМТ – Cold Metal Transfer) [3]. СМТ – це модифікований варіант зварювання плавким електродом у захисному газі, заснований на механізмі керованого режиму передачі металу в зварювальну ванну за рахунок використання імпульсного струму і зворотно-поступального руху дроту.

Серед дугових способів СМТ процес стосовно адитивних технологій має ряд незаперечних переваг. Одна з важливіших – система зворотної подачі дроту, синхронізована з високошвидкіс-

ним цифровим керуванням, яке визначає довжину дуги, коротку фазу замикання та теплопередачу в зону зварювання [6]. Цей процес забезпечує мінімальне розбризкування металу, відносно стабільність формування шва, знижену теплопередачу в зону обробки. Однак СМТ-процес з точки зору застосування в адитивних технологіях має свої недоліки: порівняно низьку продуктивність через використання дротів малих діаметрів, наявність значної внутрішньої дефектності (пори, включення).

Використання АПДН забезпечує ряд переваг як з технологічної, так і з економічної точки зору. До них можна віднести високу продуктивність, регулювання в широких межах теплопередачі в основний і наплавлений матеріали і, як наслідок, управління глибиною та шириною проплавлення, структурою, складом і властивостями матеріалу, що формується. АПДН постійним струмом зворотної полярності або змінним струмом забезпечує очищення поверхні попереднього шару від забруднень за рахунок ефекту катодного розпилення, достатнє змочування та розтікання рідкого металу за мінімального нагрівання поверхні. При цьому забезпечується отримання шаруватих матеріалів із сприятливою структурою без внутрішніх дефектів. Крім того, порівняна простота та невисока вартість обладнання для плазмового наплавлення повинні забезпечити інтерес виробників до використання в адитивних технологіях [3, 7].

Вище вказаним обумовлено потужний потенціал застосування та розвитку технологій АПДН. Потрібно відзначити такі переваги та ширші технологічні можливості АПДН перед методами WAAM [3, 8]:

- широке регулювання продуктивності 3D друку (0,02...25 кг/год) та ступеню деталізації об'ємних елементів (завширшки від 2,0...2,5 до 10...20 мм) шляхом реалізації процесу, як в режимі мікроплазмового наплавлення низькоамперною плазмовою дугою (при струмах 5...35 А), так і при струмах 50...450 А і вище (у залежності від потужності джерела живлення);
- широкий діапазон регулювання погонної енергії, зони нагріву та глибини проплавлення попередньо наплавлених шарів шляхом АПДН із використанням прямої або дотичної плазмової дуги;
- 3D друк на постійному струмі прямої та зворотної полярності, змінному струмі, у тому числі реалізація процесу катодного очищення та руйнування оксидних плівок при наплавленні легких металів і сплавів з тугоплавкими оксидними плівками на їх поверхні;
- 3D друк із використанням від одного до чотирьох присаджувальних дротів, у тому числі

із струмопровідним присаджувальним дротом з підігрівом;

- використання для 3D друку в якості присаджувального матеріалу компактних і композиційних (порошкових) дротів, порошоків легких сплавів і тугоплавких металів, композиційних порошоків і механічних сумішей порошоків сплавів, металокераміки, карбідів, боридів тощо;

- реалізація процесу 3D друку із використанням присадки, яка не рухається разом із плазмотроном під час наплавлення шару (металева крупка, фольга, тонкі смужки металу), яка накладається по чергово після наплавлення кожного шару (процес, подібний до методів «ламінування» або селективного плавлення);

- можливість запуску плазмової дуги без додавання дроту або порошку, що дозволяє виконувати попереднє нагрівання основи або наплавлених шарів перед адитивним наплавленням.

Порівняння основних техніко-економічних показників процесів адитивного наплавлення із використанням вільної дуги з процесами, що використовують стиснену (плазмову) дугу, також підтверджує переваги адитивних плазмово-дугових технологій (табл. 1) [3–8].

Мета роботи – аналіз сучасного стану наукових досліджень, технологічних розробок і практично-

го досвіду адитивного виробництва металевих виробів із різних типів сплавів і композиційних матеріалів; виявлення потенціалу застосування та розвитку адитивного технологій плазмово-дугового наплавлення, у яких в якості джерела нагріву використовується плазмова дуга; визначення нових можливостей і перспективних напрямів їх подальшого розвитку та застосування.

Для досягнення цієї мети в роботі вирішувались наступні задачі:

1. Аналіз стану наукових досліджень і практичного досвіду АПДН об'ємних виробів із різних типів сплавів.

2. Виявлення нових можливостей плазмово-дугових технологій в адитивному виробництві, у тому числі при застосуванні гібридних і комбінованих методів 3D друку.

3. Опис розробок нового обладнання для реалізації технологій АПДН в адитивному виробництві.

1. Застосування технологій АПДН (3D друку) просторових металевих виробів. 1.1 АПДН об'ємних виробів із сталей і сплавів на основі заліза та нікелю. При адитивному виробництві 3D об'єктів зі сталей і сплавів на основі заліза виникає низка проблем, пов'язаних з їх перегрівом у процесі наплавлення. Наприклад, при СМТ дру-

Таблиця 1. Порівняння основних техніко-економічних показників різних технологій адитивного наплавлення (3D друку) об'ємних металевих виробів

Номер	Технологія	Середнє значення ширини одиничного наплавленого шару, мм	Середні розміри нерівностей вільної поверхні отриманих виробів, мм	Відхилення геометричних розмірів виробу, мм	Продуктивність виготовлення трьохвимірного виробу, кг/год.	Питомі витрати електричної енергії, кВт/кг	Характеристики міцності (% від межі міцності вихідного присадного матеріалу)	Характеристики пластичності (% від параметру подовження вихідного присадного матеріалу)
1	WAAM (дугове адитивне наплавлення струмопровідним плавким дротом MIG/MAG)	4,0...6,5	0,5...2,0	0,5...1,5	0,3...15,0	6...18	0,80...0,90	0,85
2	WAAM (дугове адитивне аргонодугове наплавлення неплавким електродом з подаванням нейтрального присадного дроту проволочки TIG)	6,0...8,0	0,5...1,0	0,5...1,0	1,0...4,8	7...15	0,50...0,80	0,85
3	WAAM (СМТ)	2,0...4,0	0,3...0,6	0,2...0,8	0,5...7,0	5...10	0,80...0,90	0,75...0,80
4	Мікроплазмове пошарове порошкове наплавлення	1,6...3,2	0,1...0,5	0,1...0,5	0,01...0,3	4...8	0,9...0,95	0,85...0,90
5	Мікроплазмове пошарове наплавлення дротом	2,0...3,5	0,2...0,8	0,2...0,8	0,02...0,4	5...10	0,9...0,95	0,85...0,90
6	Плазмове пошарове наплавлення дротом	3,0...4,0	0,5...1,0	0,2...0,8	0,2...10,0	5...12	0,9...0,96	0,85...0,90

ку стінки зі сталі 2Cr13 спостерігалася невелика кількість пор із відсутністю тріщин у різних шарах, що вказує на високий рівень ущільнення [6]. Осаджена мікроструктура складалася з мартенситу та фериту разом із фазою $(Fe, Cr)_{23}C_6$, що виділяється на межах зерен α -Fe. Однак, через перегрів вміст мартенситу поступово зростав від 5-го до 25-го шарів, не дивлячись на частковий розпад метастабільного мартенситу на стабільний ферит внаслідок дифузії атомів вуглецю. Твердість незначно змінювалася з 5-го до 15-го шарів, а потім швидко зростала від 20-го до 25-го шарів; процес руйнування трансформувалася від пластичного (1-й–10-й шари) до змішаного (15-й–20-й шари) і, нарешті, до крихкого руйнування (25-й шар). Таким чином, для налагодження процесу 3D друку зі стабільним формуванням структури виробу необхідно змінити технологічний підхід. Одним з перспективних варіантів для цього є АПДН.

Так, процес АПДН запропоновано використувати для отримання деталей з підвищеною зносостійкістю з інтерметалічних сплавів, наприклад, алюмініду заліза. У роботі [9] показано можливість виготовлення даним способом деталей із інтерметалічної сполуки залізо–нікель–алюміній. У роботі [10] для адитивного виготовлення зносостійких функціональних шарів поверхонь зношування та корпусу інструменту зі сплавів на основі нікелю Ni 625 і на основі заліза PS Fe-hard D запропоновано використовувати плазмово-дугову технологію 3DPMD. Плазмово-дугове наплавлення дротами (до 120 А) та мікроплазмове наплавлення порошковими матеріалами (при струмі до 50 А) для виготовлення виробів з вуглецевих і нержавіючих сталей запропоновано в [11]. Дослідження особливостей процесів виготовлення сталевих просторових примітивів типу «стінка», «стакан», «конус» і «напівсфера» показали, що відхилення від номінального розміру при їх виготовленні не перевищують $\pm 0,5$ мм, пористість лежить в межах 1...2 %, а механічна міцність становить близько 90...95 % міцності литого металу.

Структура наплавленого матеріалу є дрібнозернистою, рівномірною, перемішування шарів надзвичайно низьке.

Аналіз мікроструктур зразка адитивного мікроплазмового наплавлення присаджувальним дротом Св-08Г2С (діаметром 1,2 мм), виконаного в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України (ІЕЗ), показав відсутність тріщин і пор, однорідність і рівномірність структури, подібну до структури зразків, наплавлених мікроплазмовим способом з присаджувальним порошком. Стінки характеризуються щільністю, яка відповідає литій структурі, із зернами невеликих розмірів, без дендритів. Пористість, включення та мікротріщини відсутні. Несуцільність між дотичними шарами по лінії сплавлення відсутня, розмір зони термічного впливу шару нарощування ~ 2 мм. Мікроструктура наплавленого матеріалу рівноважна, зерно має приблизно однакові розміри у всіх напрямках (15...20 мкм) з добре помітними межами та евтектичною складовою між ними (рис. 1). Це – зерна фериту (світлі зерна) та перліту (темні ділянки). Багатшарова структура наплавленого об'ємного зразка не проявляється, перемішування наплавлених шарів надзвичайно низьке, утворення оксидів не спостерігається.

У разі WAAM процесу з використанням MAG наплавлення дротом Св-08Г2С (діаметром 1,2 мм) мікроструктура наплавленого металу представлена зернами фериту та перліту (рис. 2). Відмінністю такої структури від аналогів, одержаних мікроплазмовим наплавленням тим же дротом, є більший розмір зерен, а також наявність первинних кристалів у формі дендритів та евтектики. Дендрити виявляються у вигляді деревоподібних утворень з чіткими осями окремих гілок. Між первинними кристалами виявляються прошарки іншої фази, що входить до евтектики. Можна сказати, що евтектика структурно вироджується, вона у невеликій кількості з'являється внаслідок нерівноважної кристалізації. Її утворенню сприяє уповільнення охолодження порівняно

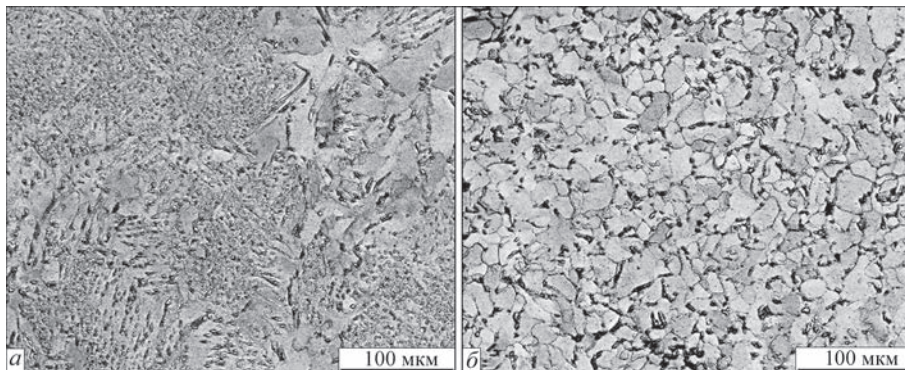


Рис. 1. Мікроструктура просторового виробу типу «тонка стінка», отриманого адитивним мікроплазмовим наплавленням з подачею нейтрального присаджувального дроту Св-08Г2С: *a* – верхній шар; *b* – середина стінки (електронно-зондовий аналіз на аналізаторі CamScan-4)

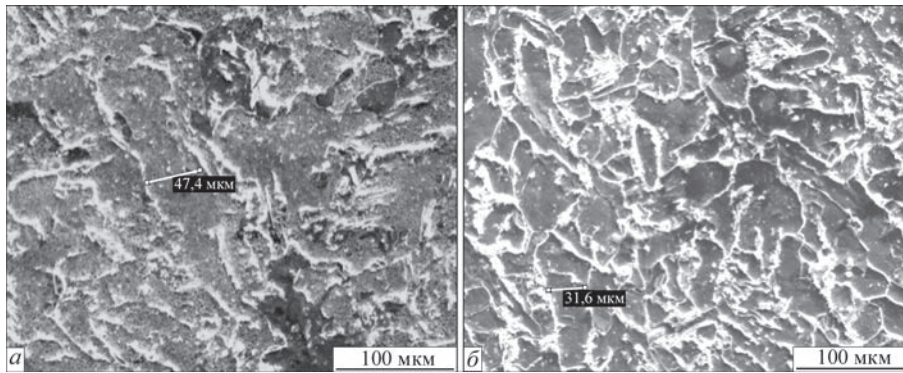


Рис. 2. Мікροструктура просторового виробу типу «тонка стінка», отриманого методом WAAM (MAG) з використанням дроту Св-08Г2С: *a* – верхній шар; *б* – середина стінки електронно-зондовий аналіз на аналізаторі CamScan-4

з мікроплазмовим наплавленням. Відстань між гілками дендритів основної феритної фази при такому охолодженні досить велика, тому евтектика має грубу будову. Утворення оксидів немає, проте можна відзначити великі розміри хвилеподібних валиків на поверхні.

Відмінність зразків, отриманих адитивним MAG наплавленням, від зразків, отриманих за мікроплазмовою технологією, у першу чергу міститься в тенденції збільшення зернистості та розмірів ЗТВ при практично незмінному вмісті кремнію та марганцю. Це можна пояснити більшими погонними енергіями і, відповідно, більшою інтенсивністю нагрівання нарощуваних шарів при MAG наплавленні.

У роботі [12] також підтверджено принципову можливість використання плазмово-дугового (мікроплазмового) з імпульсним струмом для 3D друку сталевих об'ємних металевих виробів з достатньою геометричною деталізацією. При цьому зерна наплавлених шарів змінюють структуру від відносно малого розміру зерна біля підкладки до дуже грубої структури з великим розміром зерна біля вершини виробу. При цьому в якості матеріалу для 3D друку показана можливість використання сталевого дроби розміром біля 1 мм. Проте у випадку використання такого присаджувального матеріалу методом мікроплазмового наплавлення продуктивність є невисокою (порядку 50 г/год) у разі контролю температури виробу і охолодження після кожного шару

протягом певного часу очікування [12]. Такий підхід дозволяє регулювати розмір зерен і твердість надрукованих тривимірних сталевих виробів.

Для адитивного виробництва компонентів складної геометрії із вуглецевих і легованих сталей також використовують АПДН дротовими та порошковими присаджувальними матеріалами при виготовленні інструменту із складноконтурними поверхнями для поперечної прокатки [13].

Також накопичено успішний досвід АПДН відповідальних виробів гарячого тракту авіаційних двигунів з використанням присаджувального дроту із нікелевого жароміцного сплаву EI 868 (ХН60ВТ) (рис. 3) [14].

Для забезпечення оптимального поєднання кількості та морфології зміцнюючих фаз сплаву і сприятливого поєднання характеристик пластичності та жароміцності було проведено термічну обробку при $T = 1200$ °С. Макроструктура вказаних виробів, зразків до і після термообробки є шаруватою, характерною для багат шарового наплавлення з чітким розподілом шарів (рис. 4, *a*, *б*) [14]. Мікροструктуру після термічної обробки при збільшенні $\times 200$ представлено на рис. 4, *в*. У ході аналізу мікροструктури зразків після термообробки встановлено наявність дендритної структури з витягнутими зернами в напрямку відводу тепла в процесі пошарового вирощування (поперек шарів) (рис. 4, *в*). У мікροструктурі лінії сплавлення є невидимими, структура є однорідною зі взаємним

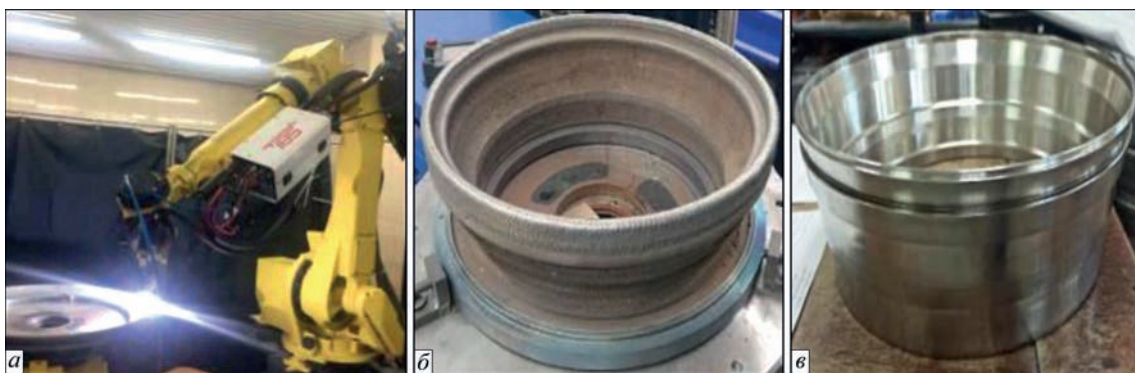


Рис. 3. Процес АПДН (3D друку) заготовки із нікелевого жароміцного сплаву EI 868 (ХН60ВТ) (*a*), заготовка деталі після 3D друку (*б*), готова деталь після механічної обробки (*в*) [14]

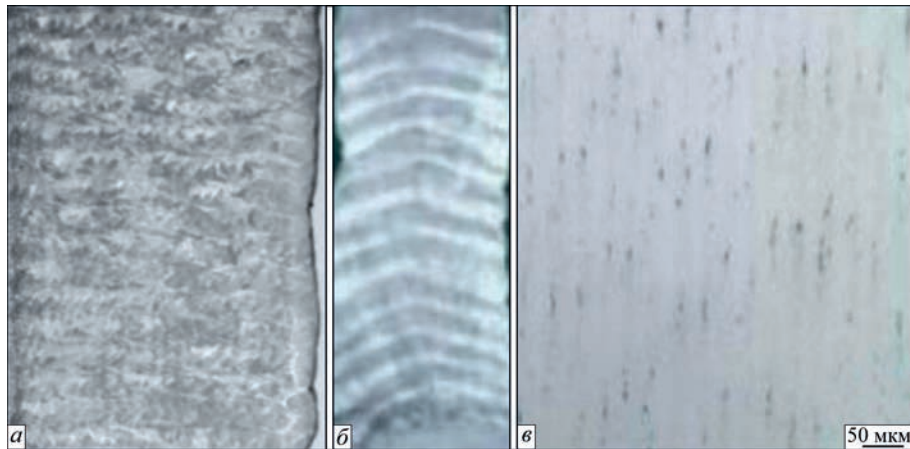


Рис. 4. Макро- (а, б) і мікроструктури (в) матеріалу об’ємних виробів із нікелевого жароміцного сплаву EI 868 (XN60VT), отриманих адитивним плазмово-дуговим наплавленням: а – повздовжній напрямок; б, в – поперечний напрямок [14]

проростанням зерен між шарами. Мікроструктура відповідає нормальному термообробленому стану сплаву EI868 (XN60VT), перегріву не виявлено.

Механічні випробування зразків із вказаного нікелевого жароміцного сплаву EI 868 (XN60VT), проведені при $T = 900 \text{ }^\circ\text{C}$, знаходяться на рівні значень поковок, встановлених нормами технічних умов (табл. 2).

Таким чином, матеріал об’ємних виробів із сплаву EI868 (XN60VT) отриманий методом АПДН, відповідає вимогам технічної документації для виготовлення статорних деталей авіаційних двигунів.

1.2. АПДН об’ємних виробів із алюмінієвих сплавів. Для 3D друку об’ємних виробів із алюмінієвих сплавів АПДН відрізняється низкою переваг перед іншими дуговими методами. Крім високої продуктивності та можливості регулювання в широких межах теплопередачі в матеріал, що наплавляється, дана технологія допомагає долати проблему виникнення дефектів із-за оксидних тугоплавких плівок на поверхні алюмінієвих сплавів. АПДН постійним струмом зворотної полярності або змінним струмом забезпечує очищення поверхні попереднього шару від забруднень за ра-

хунок ефекту катодного розпилення, підвищене змочування та розтікання рідкого металу за мінімального нагрівання поверхні, дозволяє забезпечувати достатню деталізацію об’ємних елементів з мінімальною товщиною стінки (рис. 5).

У роботах [15, 16] наведено результати досліджень структури та механічних властивостей тривимірних зразків, отриманих адитивним наплавленням дроту із алюмінієвого сплаву AlMg5 із застосуванням мікроплазмової технології на постійному струмі та СМТ методу. Встановлено, що для цих двох методів 3D друку характерні ті ж дефекти, що і для традиційних металургійних процесів (рис. 6).

Виявлено, що магній зустрічається у вигляді евтектичних прожилок з тонким диференціюванням, тобто з сильною розгалуженістю та малими розмірами вкраплень евтектики Al + Mg або компактних включень з округлими межами. Розмір зміцнюючих фаз у зразках із вказаного сплаву AlMg5, отриманих адитивним мікроплазмовим наплавленням, менше, ніж у зразків, вирощених СМТ методом, що дозволило в даному випадку для мікроплазмової технології забезпечити більші значення механічних властивостей (табл. 3).

Результати механічних випробувань підтвердили, що методи мікроплазмового та СМТ адитивного наплавлення відповідають нормам ГОСТ

Таблиця 2. Механічні властивості зразків із нікелевого жароміцного сплаву EI 868 (XN60VT), виготовлених АПДН [14]

Метод виготовлення зразків для механічних випробувань	Механічні властивості		
	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
Зразки, виготовлені АПДН	Повздовжній напрямок		
	349	471	48,1
	341	482	59,0
	345	477	53,6
	Поперечний напрямок		
	326	432	64,0
	306	526	66,3
316	479	65,2	
Поковка за ТУ27.1001190414-038:2007	> 220	> 450	> 50

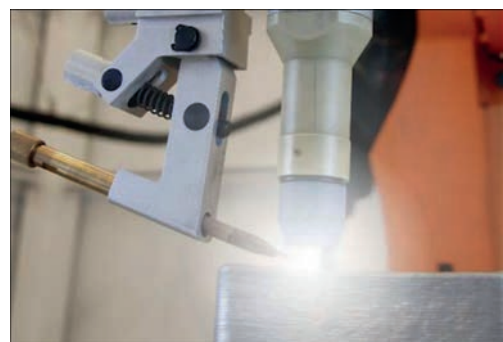


Рис. 5. Процес АПДН тривимірної конструкції типу «стінка» із використанням присаджувального дроту із алюмінієвого сплаву

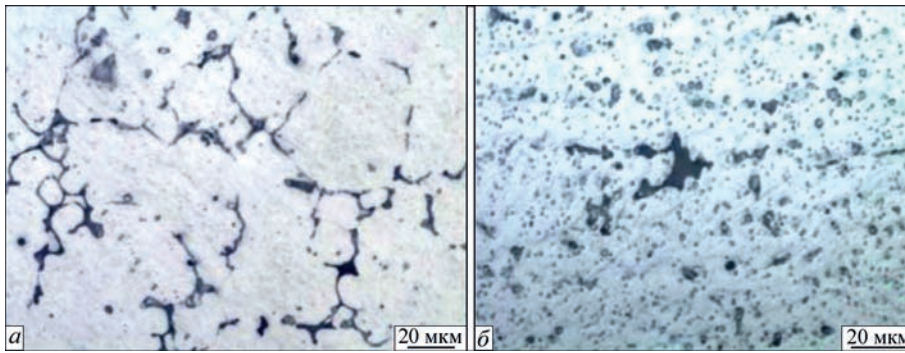


Рис. 6. Мікроструктура тривимірних зразків, вирощених різними методами 3D друку ($\times 500$): *a* – мікроплазма; *б* – СМТ

Таблиця 3. Механічні властивості об'ємних матеріалів із сплаву AlMg5, отриманих з допомогою різних технологій [15, 16]

Метод 3D друку	Механічні властивості		
	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
Мікроплазмове адитивне наплавлення	274	154	25,2
СМТ адитивне наплавлення	261	124,5	13,7
Норми для сплаву AlMg5 за ГОСТ 17232-99	>270	>120	>13,0
Норми EN ISO 18273	250	120	9

17232-99 і стандарту EN ISO 18273 для алюмінієвого сплаву AlMg5. При цьому для даного сплаву технологія АПДН показала дещо вищий рівень механічних властивостей, ніж для 3D друку із використанням методу СМТ.

Порівняння структури та механічних характеристик об'ємних виробів, отриманих АПДН дроту із сплаву 5A06 і дуговим MIG наплавленням аналогічним плавким електродом, показує значно менший ступінь анізотропії структури та механічних характеристик для плазмово-дугової технології [13]. Для MIG методу середні показники межі міцності та текучості зразків у напрямку, перпендикулярному орієнтації текстури, становлять 251 і 101 МПа. Ці ж показники у напрямку, паралельному орієнтації текстури, становлять 239 і 90 МПа. Середні показники відносного подовження у напрямку, паралельному та перпендикулярному орієнтації текстури, становлять 37 і 34 % відповідно. При АПДН сплаву 5A06 середні показники межі міцності та текучості зразків у на-

прямку, перпендикулярному орієнтації текстури, становлять 295 і 150 МПа. Ці ж самі показники у напрямку, паралельному орієнтації текстури, становлять 290 і 145 МПа. У цілому, показники міцності зразків, отриманих АПДН дроту 5A06, знаходяться на рівні 0,92...0,94 міцності листового металу 5A06.

Підтверджено можливість виготовлення складнопрофільних циліндричних деталей типу «диск автомобільного колеса», які працюють в умовах підвищених динамічних і ударних навантажень, і «перехідник», АПДН дроту з алюмінієво-магнієвого сплаву 1580, що деформується, з добавками скандію, на постійному струмі зворотної полярності (рис. 7, 8) [17].

На рис. 9 показано макроструктуру шарів верхньої (рис. 9, а) та нижньої (рис. 9, б) частин стінки з алюміній-магнієвого сплаву 1580, отриманої АПДН на постійному струмі зворотної полярності (табл. 4) [17]. На макрошліфах наявні ділянки посиленого зростання дендритів, причому переважно у нижній частині наплавлення. У верхній частині наплавлення це менш виражено, що пояснюється зниженням впливу ефекту термоциклювання та повторного нагріву металу по мірі вирощування стінки. Також виявляються відмінності у мікроструктурі верхньої (рис. 9, в) та нижньої (рис. 9, г) частин стінки при різному збільшенні. Структура становить алюміній-магнієвий твердий розчин з окремими частинками первинної β -фази (Al_3Mg_2) на межах зерен, де також зустрічаються скупчення первинних інтерметалі-

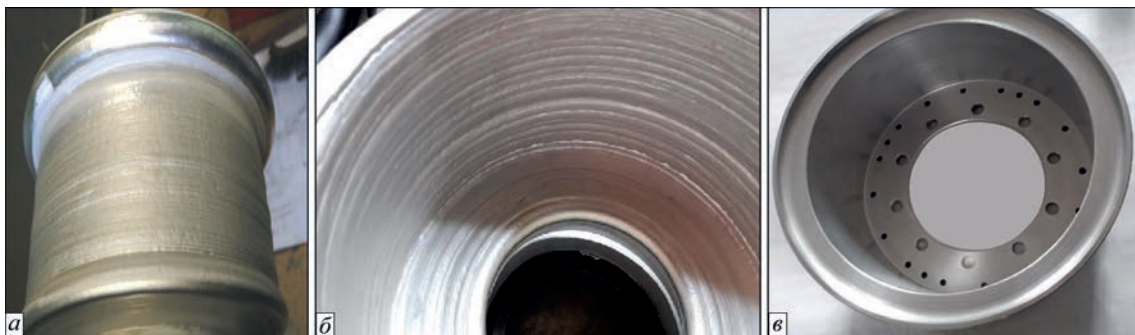


Рис. 7. Диск автомобільного колеса з алюмінієво-магнієвого сплаву 1580, виготовлений АПДН на постійному струмі зворотної полярності [17]: вигляд зовнішньої поверхні (*a*) і внутрішньої порожнини (*б*) після 3D друку; вигляд після механічної обробки (*в*)



Рис. 8. Перехідник з алюмінієво-магнієвого сплаву 1580, виготовлений АПДН на постійному струмі зворотної полярності [17]: зовнішній вигляд після 3D друку (а) та після механічної обробки (б)

дів $Al_3(Sc,Ti)$, $Al_3(Sc,Zr)$, Al_3Sc . Мікроструктура верхньої частини наплавлення (рис. 4, а) є більш дрібнодисперсною, з більшою об’ємною часткою виділення β -фази по межах зерен – до 2,5 %. Відмінності в мікроструктурі нижньої і верхньої частини наплавлення (рис. 9, в, г) ще раз свідчать про те, що цикли нагріву металу попередніх шарів, які пов’язані із багаторазовим повторенням наплавлення, призводять до ефекту посилення спрямованого зростання дендритів тим інтенсивніше, чим частіше це повторюється.

Отже, АПДН алюміній-магнієвих сплавів, що деформуються, забезпечує відносну стабільність структурного та фазового складу матеріалу попередніх шарів під впливом термічних циклів наступних по мірі формування заготовки. Межі міцності наплавлень знаходяться на рівні властивостей литого матеріалу, поступаючись деформованому; пластичність наплавленого металу значно перевищує як пластичність виливків – у 2...3 рази, так і пластичність відпалених прокатних напівфабрикатів – у 1,5 рази.

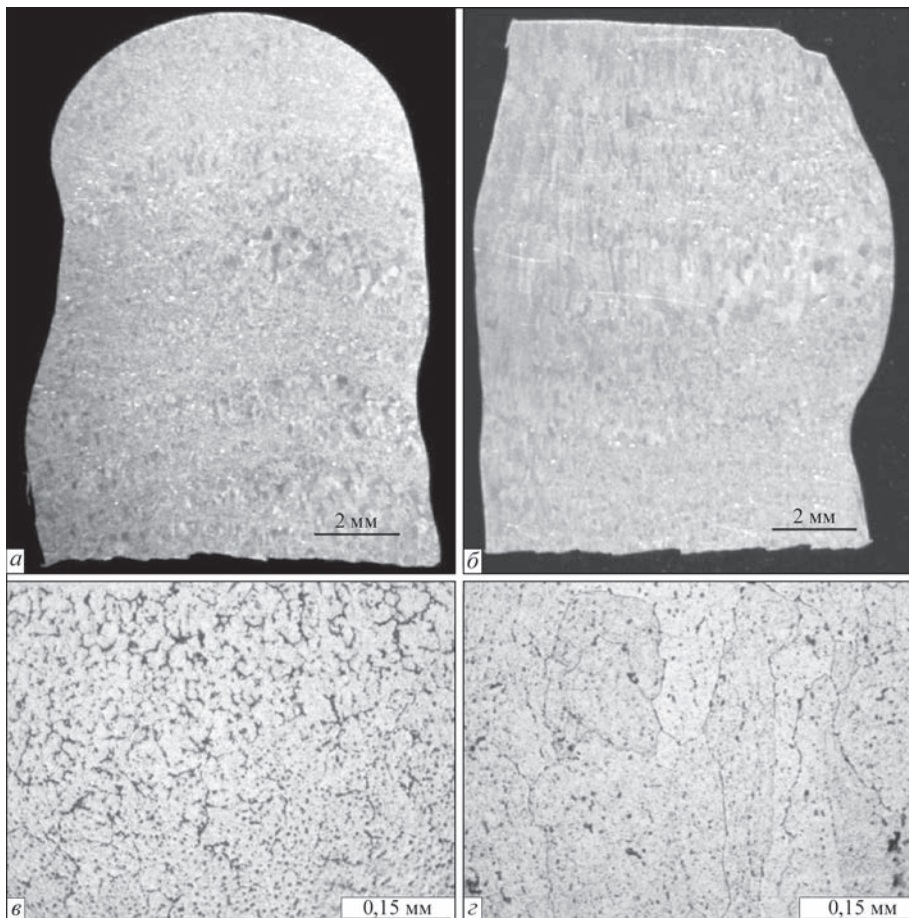


Рис. 9. Макро- (а, б) і мікроструктури (в, г) різних зон об’ємних елементів з алюмінієво-магнієвого сплаву 1580, виготовлених АПДН на постійному струмі зворотної полярності [17]: а, в – верхня частина; б, г – нижня частина

Таблиця 4. Механічні властивості алюмінієвого сплаву 1580, отриманого за допомогою різних наплавлених матеріалів [17]

Матеріал і стан зразка		σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	φ , %
Сплав 1580, АПДН	Наплавлення 1	294	192	24,5	33,5
	Наплавлення 2	296	193	25,0	27,0
Сплав P-1580, відлитий	Литий пруток	312	183	9,1	–
Сплав P-1580, прокатка	Гарячедеформований	369	266	16	–
	Холоднодеформований	453	429	5	–
Сплав P-1580, прокатка + відпал	Відпалений	390	277	14	–

При використанні АПДН різнополярним асиметричним струмом з використанням присадного дроту ER2319 із високоміцного важкозварюваного сплаву $AlCu_6MnZrTi$, схильного до утворення гарячих тріщин при зварюванні, межа міцності об'ємного зразка, виготовленого із наплавленого металу, становить 258 МПа, або 63 %, що становить 0,63 міцності листового матеріалу алюмінієво-мідного сплаву 2219 у стані повної термічної обробки [18]. Проведення термообробки такого надрукованого матеріалу шляхом гартування і штучного старіння дозволяє підвищити міцність металу деталі до 0,8...0,85 міцності обробленої в процесі виготовлення і термообробленої масивної заготовки. У разі застосування процесу TIG для 3D друку даного сплаву середня межа міцності знаходиться на рівні 237 МПа, що становить лише 57 % від цього показника для листового матеріалу із сплаву 2319.

Шляхом оптимізації технологічних режимів АПДН на змінному (різнополярному) струмі досягається можливість формування об'ємних виробів із високоміцних алюмінієвих сплавів системи $Al-Cu-Li$ (AA2319), які також відносяться до класу важкозварюваних [19]. На структуру та властивості матеріалу, отриманого АПДН цього сплаву, впливають значення струму стисненої дуги та швидкість подачі дроту, співвідношення прямих/зворотних імпульсів струму, температура нагріву попередніх наплавлених шарів. При цьому досить суттєвий вплив на зменшення пористості в наплавлених шарах із цього сплаву здійснює та чи інша атмосфера захисного газу, склад плазмоутворюючої суміші, витрати робочих газів і швидкість потоку плазми. Так, у при АПДН сплаву AA2319 якісна стінка була отримана при струмі плазмової дуги 120 А (частоти 50 Гц, баланс 50 %), швидкості наплавлення 140 мм/хв., швидкості подачі дроту 0,9 м/хв, при використанні суміші газів $Ar/He_{15}/N_{0,015}$, витратах захисного газу 15 л/хв і плазмоутворюючого газу 0,3 л/хв, а також при попередньому нагріві підкладки до температури 200 °C (рис. 10).

1.3. АПДН об'ємних виробів із титанових сплавів. Процес АПДН із використанням, як дротів, так і порошків є одним з найперспективніших для виробництва об'ємних титанових деталей, у тому числі в таких галузях промисловості, як ае-

рокосмічна, автомобільна, суднобудівна, та у морській інженерії [20]. У порівнянні із лазерними та електронно-променевими адитивними технологіями з'являється можливість виготовляти деталі з різних матеріалів. Основною перевагою цієї групи технологій є можливості 3D друку габаритних конструкцій при значно нижчих витратах матеріалів та інвестицій [21]. Навіть без вирішення завдання максимальної продуктивності при використанні технологій АПДН досягається швидкість нарощування об'єму титанових сплавів від 170 см³/год і вище. Таку продуктивність не може забезпечити більшість променевих методів [22].

Основною технологічною трудностю АПДН об'ємних виробів із титанових сплавів є надійне забезпечення ефективного газового захисту як зварювальної ванни, так і ділянок деталей, які можуть нагріватися до температур вище 300 °C. Такі нагріті ділянки інтенсивно поглинають гази із оточуючої атмосфери. Для усунення цього використовують локальний газовий захист з допомогою різноманітних пристроїв і систем, а також 3D друк у контрольованій атмосфері. Найефективніше вирішення проблеми газового захисту – це створення спеціальної камери з аргоною атмосферою. Однак для створення такої камери потрібні певні інвестиції. Також виникає обмеження габаритів вирощуваних тривимірних деталей розмірами цієї камери.



Рис. 10. Результат якісного АПДН на змінному струмі об'ємного елемента у вигляді багатошарової стінки зі сплаву AA2319 системи $Al-Cu-Li$ [19]

Застосування локального газового захисту при АПДН також дозволяє досягати відмінних результатів і задовільних механічних характеристик надрукованих виробів з титанових сплавів. Так, при використанні імпульсного постійного струму джерела живлення плазмової дуги і присаджувального дроту із сплаву Ti-6Al-4V діаметром 1 мм у локальному газовому захисті створювати просторові бездефектні структури товщиною від 4 мм із даного сплаву із відмінними механічними характеристиками [23].

У процесі 3D друку в нижніх шарах формується більш крупнозерниста структура, а у шарах, розташованих вище, зменшується розмір зерен β -фази, мартенситу та елементів Відманштеттена (рис. 11). Подібні структури були раніше виявлені в процесах 3D друку даного сплаву із використанням лазерного випромінювання [24], а також WAAM процесу плавким електродом [25]. При цьому середня межа текучості (YS) і межа міцності на розрив (UTS) досягають 909 і 988 МПа відповідно, а подовження досягає близько 7,5 %. Такі показники перевищують вимоги стандартів для даного сплаву, отриманого за ливарними технологіями, а також є вищими, ніж у матеріалах аналогічного складу після термодформаційної обробки (ковки). Це дає підстави для успішного застосування такого матеріалу в авіакосмічній галузі.

У роботі [26] описано процес 3D друку АПДН дротів сплаву Ti-6Al-4V, орієнтований на виго-

товлення великих аерокосмічних компонентів. Технологія дозволяла отримувати прямі стінки завтовшки до 17,4 мм, що забезпечило максимальну ширину стінки після механічної обробки 15,9 мм і у даному випадку перевершило конкуруючі процеси. Коефіцієнт використання матеріалу складав Ti-6Al-4V в середньому становила 93 %, а максимальна продуктивність 3D друку – 1,8 кг/год. Під час наплавлення в шарах, обернених до підкладки, формувались грубі стовпчасті зерна, які при охолодженні перетворювалися на структуру ламелей Відманста (рис. 12). У наплавлених шарах були виявлені смуги, які мали повторювану мікроструктуру кошикового переплетення із змінними розмірами. Можна побачити збільшення розміру елементів Відманста. Мікротвердість становила у середньому 387 HV, що на 12 % вище, ніж у підкладки із матеріалу аналогічного складу.

У даний час накопичено певний практичний досвід виробництва авіаційних деталей з титанових сплавів із використанням технології АПДН в контрольованому середовищі. У якості прикладів успішного застосування даної технології в авіакосмічній галузі можна навести результати, отримані компаніями Camarc Additive LLC, США (рис. 13) і Norsk Titanium, Нідерланди (рис. 14). Остання з 2017 р. виробляє деталі літаків із використанням високотехнологічних промислових машин для 3D друку. Надруковані фірмою Norsk способом АПДН із присаджувальними дротами

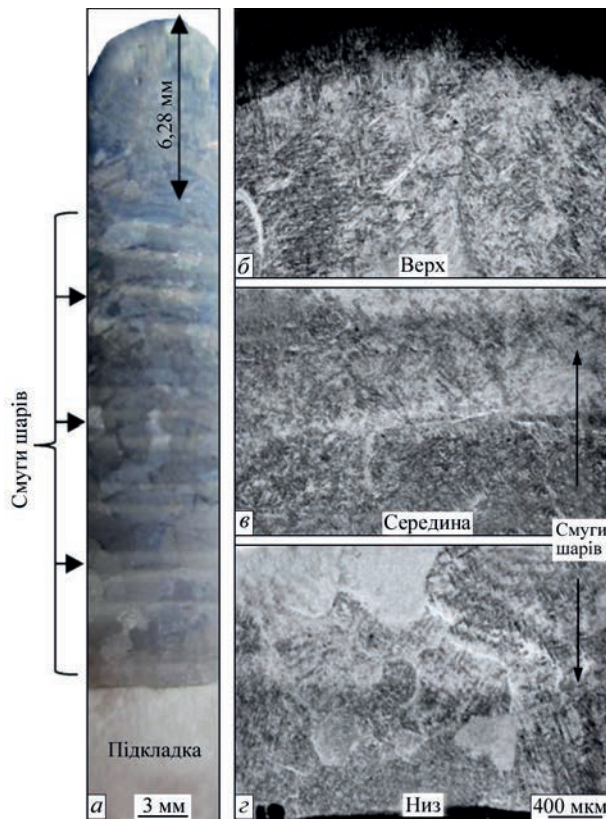


Рис. 11. Макро- (а) і мікроструктура (б-г) стінки зі сплаву Ti-6Al-4V, отриманої АПДН: б – верхня область, в – середня область, г – нижня область

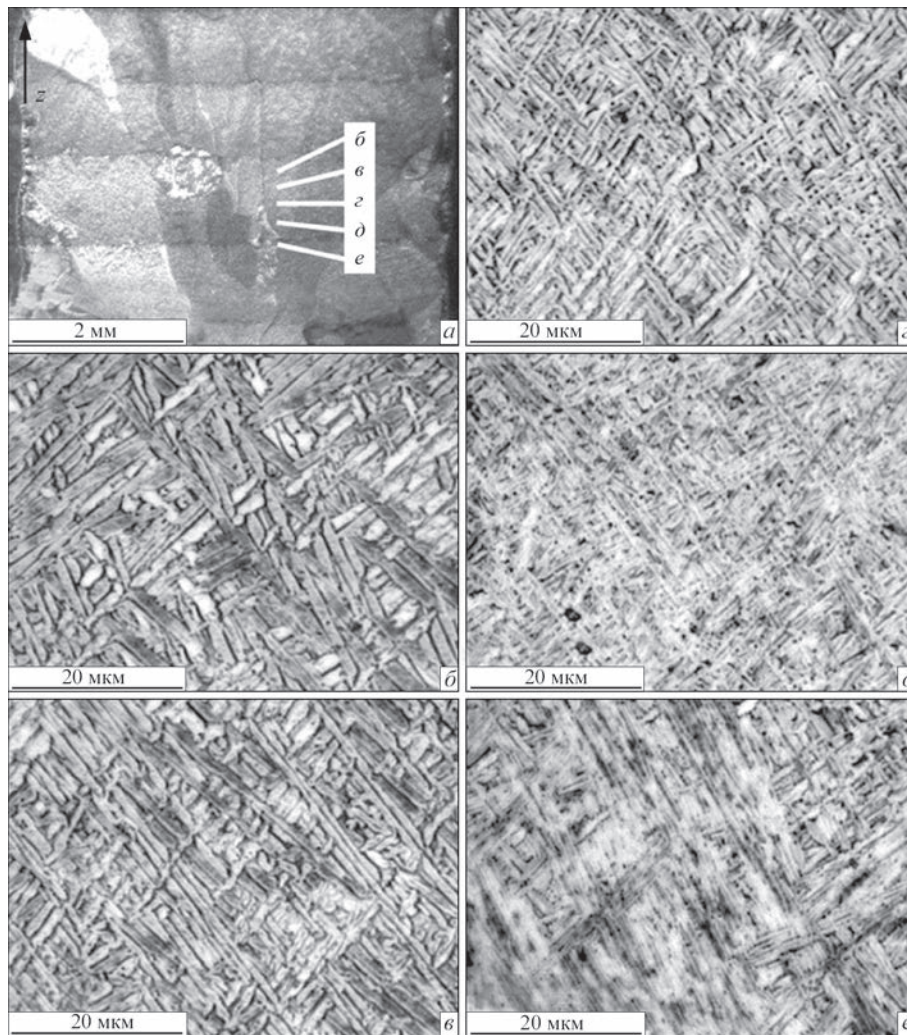


Рис. 12. Структури зон шарів просторового елемента типу «стінка» шириною до до 17,4 мм, отриманого АПДН дроту із сплаву Ti-6Al-4V: *a* – макроструктура наплавленої стінки; *б–e* – мікроструктура місць, зазначених на *a*

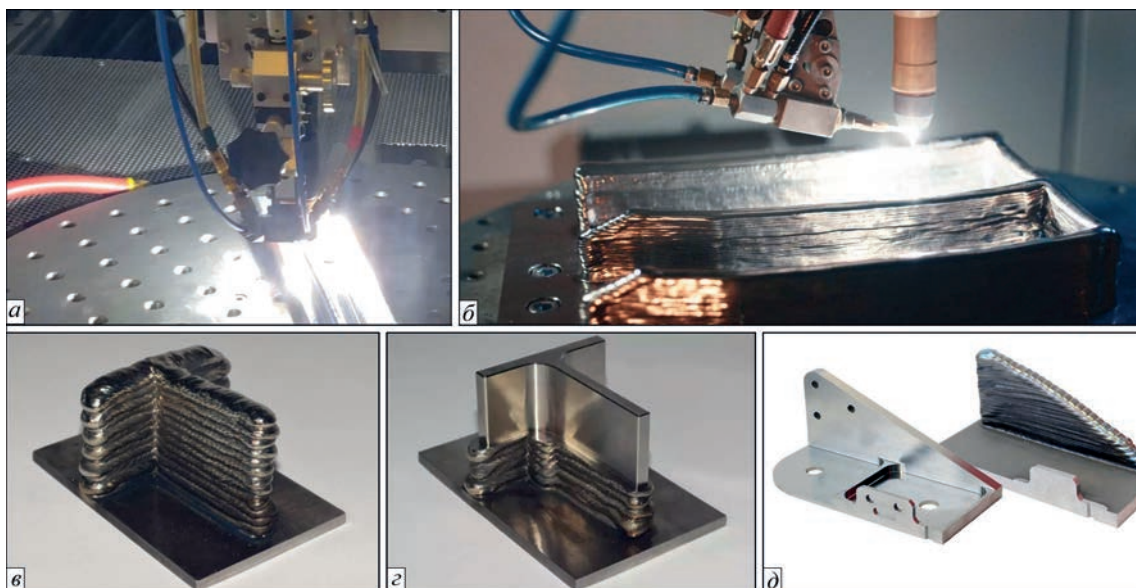


Рис. 13. Процес 3D друку авіаційних деталей з титанових сплавів із використанням технології АПДН в контрольованому середовищі (*a, б*) в компанії Camarc Additive LLC, США та приклади надрукованих деталей до і після механічної обробки (*в–д*) з титанових сплавів деталі схвалені на федеральному рівні для комерційних літаків Boeing, США. Застосовані при цьому технології не лише на 75 % продуктивніші за традиційне кування, але також знижують витрати на виробництво титанових виробів на 50...75 % і вимагають менше ресурсів.



Рис. 14. Приклад надрукованих авіаційних деталей із титанових сплавів до і після механічної обробки, отриманих АПДН у контрольованому середовищі в компанії Norsk Titanium, Нідерланди

У даний час до компанії Norsk у питанні 3D друку авіакосмічних виробів приєднується низка інших компаній, у тому числі британська компанія Renishaw і Stratasys.

Однією із основних проблем, яка виникає в процесі 3D друку АПДН, як практично і в усіх адитивних технологіях, є утворення значних залишкових напружень в об'ємній конструкції, які проявляються у викривленні (деформації) надрукованих елементів [27]. Для контролю впливу акумуляції тепла на масоперенесення присаджувального металу, формування стінок та стабільність дуги під час 3D друку просторових виробів із титанових сплавів в умовах локального газового захисту використовували інфрачервоний пірометр для вимірювання температури між проходами [28]. Стабільність дуги та перенесення металу контролювали за допомогою високошвидкісної камери. Такий підхід дозволяє оптимізувати режими АПДН і мінімізувати залишкові напруження.

Для виготовлення тонкостінних структур Ti6Al4V запропоновано інноваційний процес АПДН дротом з примусовим міжпрохідним охолодженням з використанням стисненого CO₂ [29]. Показано, що примусове міжпрохідне охолодження не тільки покращує властивості наплавлення, але також сприяє геометричній повторюваності та покращенню ефективності виробництва за рахунок зменшення часу між нанесенням шарів.

2. Легування, синтез нових сплавів, отримання об'ємних виробів із композиційних і градієнтних матеріалів у виробництві із застосуванням технологій АПДН. Адитивні дугові технології, такі як СМТ, використовують один присаджувальний дріт, у той час як технологія АПДН дозволяє подавати більшу кількість дротів. Таким чином, підвищення ефективності використання енергетичного потенціалу даного процесу досягається при збільшенні кількості присаджувальних дротів. При реалізації багатодрогового АПДН у даному випадку досягається підвищення продуктивності процесу 3D друку, що пропорційне кількості присаджувальних дротів, або вища стабільність процесу наплавлення та якість наплавленого матеріалу. Однак найперспективнішим результатом багатодрогового АПДН є ле-

гування об'ємного матеріалу в процесі 3D друку. Легування може бути локальним (зміна хімічного складу певних зон надрукованого матеріалу) або повним, яке є синтезом нових сплавів в процесі 3D друку об'ємного виробу.

Німецькі дослідники отримали позитивний досвід використання одночасного використання двох і більше присаджувальних дротів різного хімічного складу [30]. Так, змінюючи швидкість і діаметр присаджувальних дротів, можна регулювати хімічний склад тих чи інших елементів в наплавленому металі. Двохдротове АПДН з комбінацією різних типів низьколегованих феритних сталевих дротів, а також дротів із аустенітних сталей із вмістом Ni, Cr, Mo, Nb (табл. 5) підтвердило можливість плавної зміни хімічного складу надрукованого матеріалу під час процесу 3D друку та управління хімічним складом шляхом контролювання розташування фаз низької та високої пластичності для уникнення негативного впливу інтерметалідних фаз (рис. 15) [30].

При аргонодуговому наплавленні неплавким електродом також було підтверджено можливість регулювання хімічного складу наплавленого металу шляхом комбінації подачі різнорідних дротів із алюмінієвих сплавів 2319 (Al-Cu) і 5087 (Al-Mg) (рис. 16). Таким чином, було отримано просторові вироби із синтезованого в процесі 3D друку високоміцного сплаву 2024 (Al-Cu-Mg) [31]. Регулюванням швидкості подачі кожного дроту управляли хімічним складом надрукованого матеріалу та його властивостями, що дозволило досягти оптимального поєднання фізико-механічних властивостей отриманих просторових виробів (рис. 17) [31].

Ця сама можливість виконувати адитивне виробництво деталей з алюмінієвих дротів різного хімічного складу була підтверджена і при використанні в якості джерела нагрівання стисненою дугою різнополярного асиметричного струму. При АПДН з присаджувальним дротом формується дрібніша структура наплавленого металу у порівнянні зі звичайним аргонодуговим наплавленням вольфрамовим електродом, що покращую показники міцності у наплавлених АПДН деталей на 10...15 % у порівнянні з аналогічними показниками деталей, отриманими аргонодуговим наплавленням.

Використання технологій АПДН, у яких формування просторових виробів може здійснюватися із одночасним подаванням в плазмову дугу різних типів порошкових матеріалів (наприклад

Таблиця 5. Комбінація різних типів сталевих дротів в технології дводротового АПДН [30]

Матеріали, отримані в результаті 3D друку	Марки сталевих дротів, які поєднувались у комбінаціях багатодрогового АПДН	
	Матеріал А	Матеріал В
Комбінація 1	G3Si1	G 19 9 L Si
Комбінація 2	G 18 L Nb	G 19 9 L Si
Комбінація 3	G3Si1	G Mn4Ni2CrMo

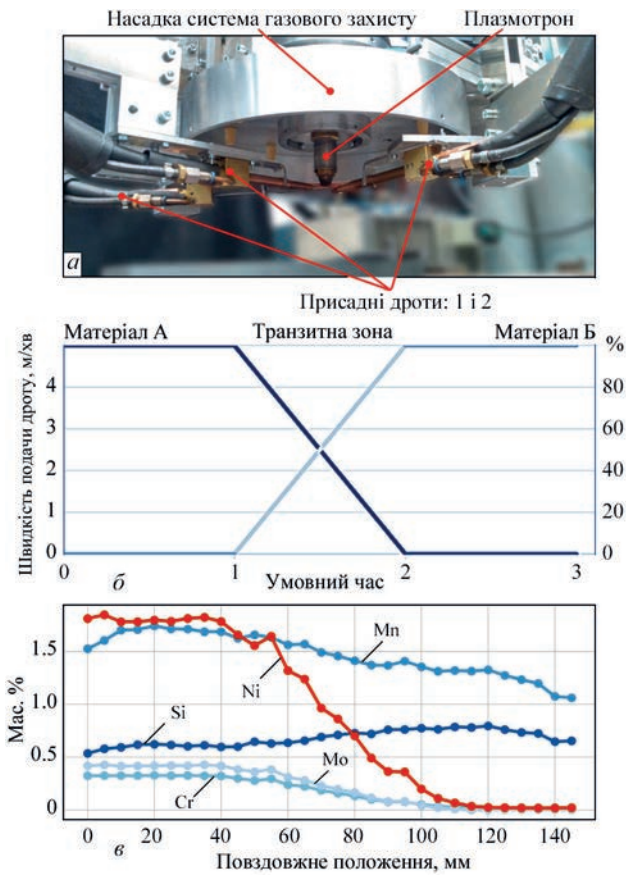


Рис. 15. Застосування чотирьохдротової системи в АПДН з подачею двох різномірних дротів (а, б) і зміна хімічного складу по об'єму зразка, отриманого по даним комбінації № 3 подачі різномірних дротів (табл. 5) (в) [30]

порошків конструкційних, зносостійких, жароміцних сплавів, карбідів, боридів, силіцидів тощо), відкриває можливості створення нових об'ємних матеріалів з унікальним поєднанням функціональних властивостей. Такі матеріали є надзвичайно перспективними для виробництва деталей та інструментів нового покоління, у яких, наприклад, певна частина об'єму забезпечує задані показники міцності, а інша – підвищену зносостійкість, корозійну стійкість, жаростійкість, спеціальні магнітні та електрофізичні властивості.

До таких матеріалів можна віднести:

- металокерамічні композити постійного складу;
- градієнтні матеріали (перемінного хімічного складу по об'єму виробу);
- багат шарові матеріали та їх поєднання із градієнтними матеріалами.

Приклади таких технологічних розробок, отриманих в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, наведено на рис.18, 19.

На рис. 18 показано процес виготовлення циліндричної заготовки інструменту для обробки металів порошковим АПДН, у якому з двох порошкових дозаторів подавали порошок зносостійкого сплаву FeNiCrBSH і карбід вольфраму WC. Шляхом автоматизованого управління пара-

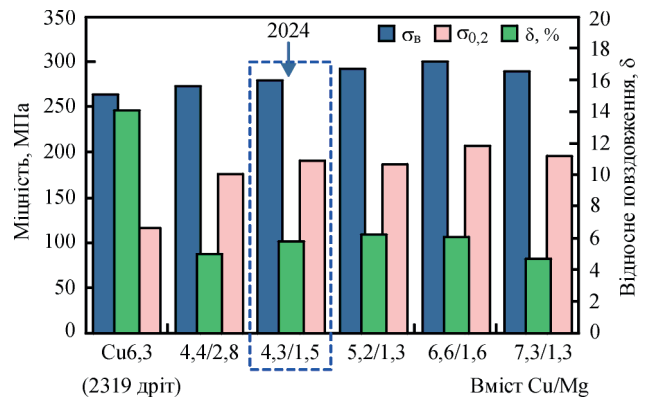


Рис. 17. Оптимізація фізико-механічних властивостей об'ємних виробів, отриманих дводротовим АПДН з подачею різномірних дротів із алюмінієвих сплавів 2319 (Al-Cu) і 5087 (Al-Mg) [31]

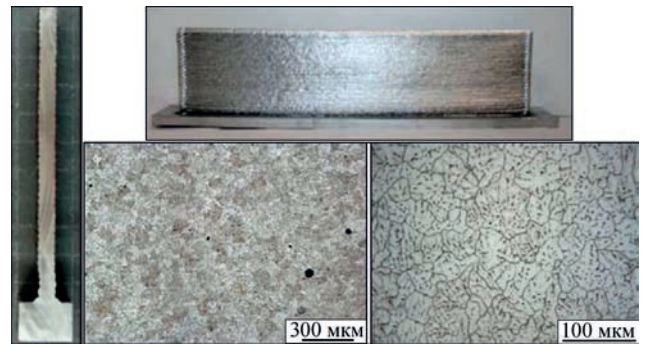


Рис. 16. Зовнішній вигляд та мікроструктура виробу типу «стінка» із синтезованого високоміцного сплаву 2024 (Al-Cu-Mg), отриманого шляхом адитивного наплавлення з подачею двох різномірних типу з алюмінієвих сплавів 2319 (Al-Cu) і 5087 (Al-Mg) [31]

метрами подачі порошків досягається регулювання вмісту WC в інтервалі 0...50 об. % в поверхневих шарах і досягнення твердості до 68...70 HRC.

На рис. 19 наведено приклад АПДН композиції титанового сплаву та сферичного карбиду вольфраму (Ti-6Al-4V + WC) за гібридною адитивною технологією «плазмове наплавлення присадкувальним дротом – плазмове-порошкове наплавлення». Така технологія дозволяє наплавляти об'ємний багат шаровий матеріал градієнтного типу (з товщиною шарів біля 2 мм) і варіювати твердість по об'єму від HRC 32 для нижніх шарів з титанового сплаву до HRC ≥ 56 до поверхневих шарів.

4. Напрями розробки обладнання для реалізації технологічних можливостей АПДН в адитивному виробництві. Створенням та використанням обладнання для реалізації процесів 3D друку методом АПДН займаються як безпосередньо компанії-виробники продукції, так і спеціалізовані компанії, які традиційно займаються зварювальними технологіями. Так, компанія Norsk для застосування процесу Rapid Plasma Deposition (RPD) створила машини 3D друку на кшталт MERKE IV RPD. Спеціалізована компанія Camarc Additive's, США розробила процеси АПДН сталей, ніобієвих, титанових та



Рис. 18. Процес виготовлення циліндричної заготовки інструменту обробки металів шляхом АПДН порошків зносостійкого сплаву FeNiCrBSi і карбиду вольфраму WC (а, б) та мікроструктура виробу в різних зонах (в)

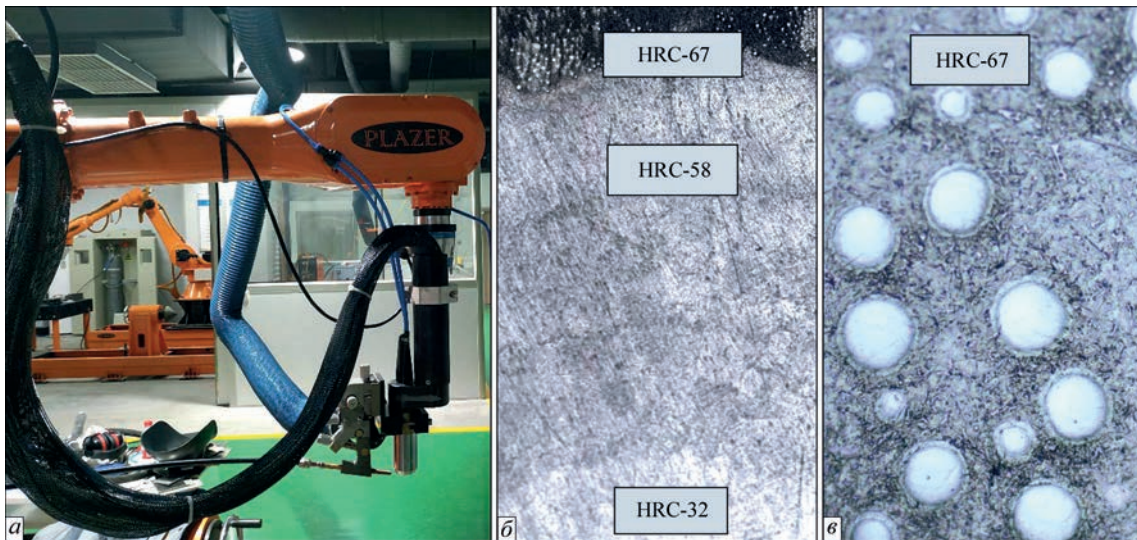


Рис. 19. Система для реалізації гібридної адитивної технології «плазмове наплавлення присаджувальним дротом – плазмово-порошкове наплавлення» (а) і структура напавленої багатшарової стінки Ti-6Al-4V + WC (б) Ч50, і верхнього напавленого шару (в), Ч200

алюмінієвих сплавів, для яких створила систему PAAWS (Plasma Arc Additive Wire System), обладнання якої пропонує чотири осі руху (X, Y, Z і обертання) разом зі столом для друку з рідинним охолодженням. Друк в робочому полі 1000×10000×600 мм може здійснюватися в закритій камері з контрольованою інертною атмосферою з контролем процесу в реальному часі. Ще однією відомою фірмою-виробником установок для 3D друку є фірма SBI, Австрія, обладнання якої призначене для виготовлення виробів з титанових і алюмінієвих сплавів, аустенітних і хромнікелевих сталей, міді, бронзи тощо, АПДН з подаванням присаджувального дроту (наприклад, установка M3DP) на постійному струмі прямої полярності або на різнополярному струмі.

В Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України в напрямку розвитку процесів АПДН основна увага приділяється розробці технологій і обладнання, які дозволяють розши-

рювати технологічні можливості адитивного виробництва, підвищувати якість напавленого матеріалу, синтезувати нові матеріали з унікальним комплексом властивостей.

Відмінності таких технологій полягають в параметрах плазмової дуги, а саме:

– АПДН здійснюється плазмовою дугою змінного асиметричного струму частотою 150 Гц на струмах від 3 А (у режимі мікроплазмового адитивного напавлення) до 320 А (у режимі високопродуктивного адитивного напавлення дротами підвищених діаметрів або багатодротового напавлення) з точністю стабілізації амплітуди зварювального струму до ± 1 А для з'єднання матеріалів з тугоплавкою оксидною плівкою на поверхні (для 3D друку виробів з алюмінієвих, магнієвих і інших легких сплавів, у тому числі таких високоміцних алюмінієвих сплавів, які відносяться до важкозварюваних – Al-Cu-Li, Al-Mg-Li, Al-Cu-Mg-Li, Al-Zn-Mg, Al-Zn-Mg-Cu тощо);

– АПДН здійснюється плазмовою дугою постійного струму прямої полярності від 3 А (у режимі мікроплазмового адитивного наплавлення) до 450 А (у режимі високопродуктивного адитивного наплавлення дротами підвищених діаметрів або багатодротового наплавлення) з накладанням модуляції струму частотою до 2000 Гц (для 3D друку виробів з легованих і високоміцних сталей, титанових і нікелевих сплавів, міді, тугоплавких металів тощо).

Дані технології мають можливості:

- незалежного вибору форми хвилі змінного струму в напівперіодах проходження струму прямої та зворотної полярності;
- застосування імпульсної подачі плазмоутворюючого газу (аргону) із заданою частотою та різницею витрат плазмоутворюючого газу, а також застосування імпульсної подачі присаджувального дроту;
- при зварюванні на постійному струмі застосування підігріву присаджувального дроту змінним асиметричним струмом, а також модуляції

зварювального струму для покращення перемішування ванни металу, що наплавляється.

Для реалізації технологій АПДН в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України розроблено різноманітні системи локального газового захисту та серія плазмотронів і відповідних установок, наприклад для:

- адитивного мікроплазмового порошкового наплавлення і наплавлення присаджувальними дротами для роботи на асиметричному змінному та постійному струмі в інтервалі струмів 3...35 А (рис. 20, а);
- порошкового АПДН і АПДН присаджувальними дротами для роботи на асиметричному змінному та постійному струмі для роботи в інтервалі струмів 50...320 (450 А) (рис. 20, б);
- для реалізації гібридного адитивного процесу «плазмове наплавлення присаджувальним дротом – плазмово-порошкове наплавлення» (рис. 18, а);
- для реалізації гібридного адитивного процесу «плазмове наплавлення з використанням плазмової дуги та дуги з плавким електродом» (рис. 20, в);



Рис. 20. Зовнішній вигляд плазмотронів, розроблених в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, для використання в адитивному виробництві

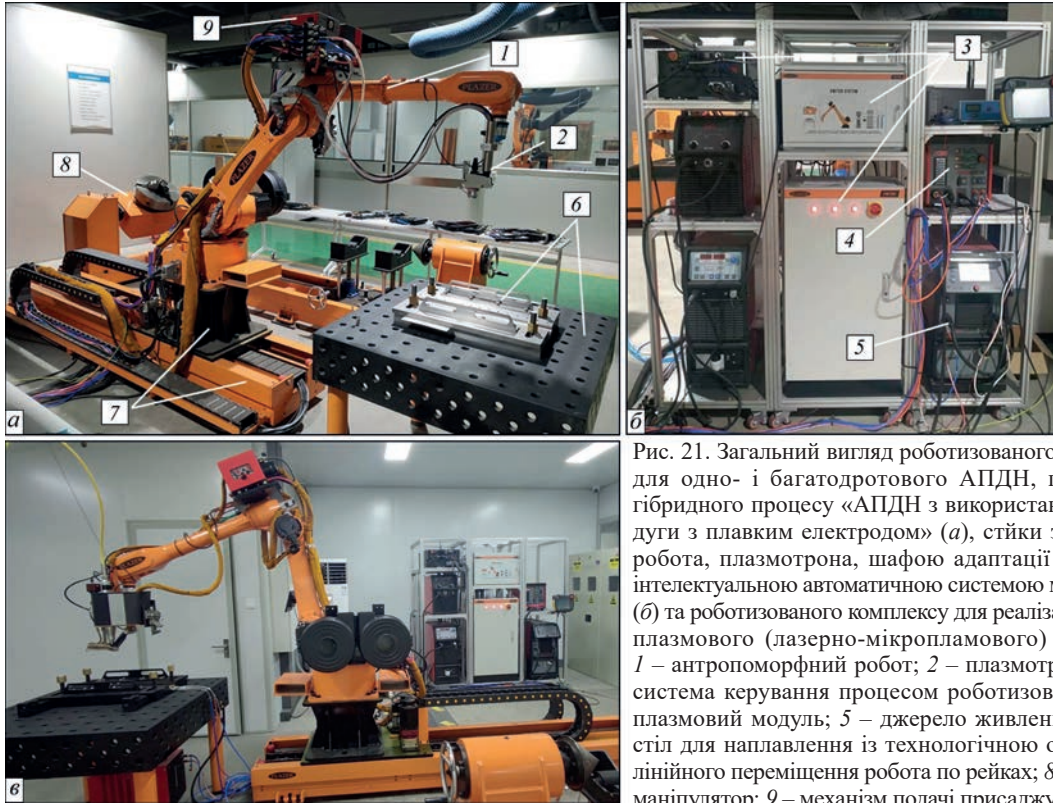


Рис. 21. Загальний вигляд роботизованого комплексу обладнання для одно- і багатодрогового АПДН, порошкового АПДН і гібридного процесу «АПДН з використанням плазмової дуги та дуги з плавким електродом» (а), стійки з джерелами живлення робота, плазмотрона, шафою адаптації команд для робота та інтелектуальною автоматичною системою моніторингу обладнання (б) та роботизованого комплексу для реалізації адитивного лазерно-плазмового (лазерно-мікроплазмового) наплавлення (в) [32]: 1 – антропоморфний робот; 2 – плазмотрон; 3 – інтелектуальна система керування процесом роботизованого зварювання; 4 – плазмовий модуль; 5 – джерело живлення плазмової дуги; 6 – стіл для наплавлення із технологічною оснасткою; 7 – система лінійного переміщення робота по рейках; 8 – двохосьовий обертач-маніпулятор; 9 – механізм подачі присаджувального дроту

– для реалізації адитивного лазерно-плазмового (лазерно-мікроплазмового) наплавлення (рис. 20, з).

Описані процеси використовуються в Науково-дослідному інституті зварювальних технологій ім. Є.О. Патона в провінції Чжецзян, м. Ханчжоу, КНР у двох роботизованих комплексах, оснащених інтелектуальною автоматичною системою управління та моніторингу (рис. 21). Вказані комплекси реалізують процеси 3D друку крупногабаритних деталей і тіл обертання завдовжки до 3000 мм, діаметром до 600 мм, завширшки 600 мм і заввишки 1000 мм. Загальна вага об'ємної досягає до 1000 кг [32].

У даний час започатковано роботи зі створення в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України технологічної дільниці, яка включає три роботизовані комплекси, що використовують описані вище плазмово-дугові технології 3D друку (рис. 22) та дозволяють виготовляти:

- крупногабаритні (діаметром від 100...200 мм до 2...3 м і заввишки до кількох метрів і вище) циліндричні оболонки із алюмінієвих сплавів з елементами та внутрішніми ребрами жорсткості складної форми;

- довгомірні (до 4...12 м) конструкції складного профілю, у тому числі з алюмінієвих і титанових сплавів і коробчастих конструкцій з внутрішніми ребрами жорсткості.

Висновки

1. Розкрито та обґрунтовано потенціал і переваги АПДН у порівнянні з розповсюдженими



Рис. 22. Загальний вигляд дільниці з трьох роботизованих комплексів для 3D друку великогабаритних і циліндричних оболонок і довгомірних складнопрофільних конструкцій із алюмінієвих і титанових сплавів із використанням адитивних плазмово-дугових технологій

дуговими WAAM методами, у тому числі СМТ технологією, а саме:

- широке регулювання продуктивності 3D друку (0,02...25 кг/год.) та ступеню деталізації об'ємних елементів (завширшки від 2,5 до 10...20 мм) шляхом реалізації процесу як у режимі мікроплазмового наплавлення низькоамперною плазмовою дугою (при струмах 5...35 А), так і при струмах 50...450 А та вище;

- широкий діапазон регулювання погонної енергії, зони нагріву та глибини проплавлення попередніх наплавлених шарів шляхом АПДН з використанням прямої або дотичної плазмової дуги;

- 3D друк на постійному струмі прямої та оберненої полярності, змінному струмі, у тому числі реалізація процесу катодного очищення та руйнування оксидних плівок при наплавлення

легких металів і сплавів з тугоплавкими оксидними плівками на їх поверхні;

– 3D друк із використанням порошку або дроту, у тому числі з використанням від одного до чотирьох присаджувальних дротів, у тому числі зі струмопровідним присаджувальним дротом з підігрівом;

– реалізація гібридних технологій 3D друку – поєднання плазмової дуги з дуговим або лазерним джерелом нагріву;

– реалізація процесу 3D друку із використанням присадки, яка не рухається, разом з плазмотроном під час наплавлення шару (металева крупка, фольга, тонкі смужки металу) та накладається по чергово після наплавлення кожного шару (аналог ламінування);

– можливість застосування плазмової дуги без додавання дроту або порошку, що дозволяє виконувати попереднє нагрівання основи або наплавлених шарів перед адитивним наплавленням.

2. Підтверджено можливості використання технологій АПДН для отримання об'ємних виробів із конструкційних, легованих і високоміцних сталей, жаростійких нікелевих сплавів, алюмінієвих високоміцних сплавів, титанових сплавів з фізико-механічними характеристиками, які переважно складають 90 % і вище від показників аналогічних матеріалів, отриманих традиційними металургійними методами, що у ряді випадків задовольняють вимогам стандартів для таких матеріалів після термомеханічної обробки.

3. Показано нові можливості використання АПДН, при яких формування просторових виробів може здійснювати з одночасним подаванням у плазмову дугу різних типів різнорідних дротів порошкових матеріалів (наприклад, порошоків конструкційних, зносостійких, жароміцних сплавів, карбідів, боридів, силіцидів тощо) або з одночасним подаванням дроту та порошку (гранул). Це дозволяє здійснювати локальне або об'ємне легування матеріалу об'ємного виробу, виконувати 3D друк одночасно з синтезом нових сплавів, створювати нові матеріали з унікальним поєднанням функціональних властивостей (металокерамічні композити постійного складу, градієнтні матеріали перемінного хімічного складу по об'єму виробу, багат шарові матеріали та їх поєднання із градієнтними матеріалами). Такі матеріали є перспективними для виробництва відповідальних деталей та інструментів нового покоління, у яких, наприклад, певна частина об'єму забезпечує задані показники міцності, а інша – підвищену зносостійкість, корозійну стійкість, жаростійкість, спеціальні магнітні та електрофізичні властивості.

4. В Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України розроблено низку інноваційних технологій АПДН та створено відповідне оригінальне обладнання для 3D друку крупногабаритних виробів з алюмінієвих і титанових сплавів, у тому числі для реалізації:

– адитивного мікроплазмового порошкового наплавлення та наплавлення присаджувальними дротами для роботи на асиметричному змінному та постійному струмі в інтервалі струмів 3...35 А;

– порошкового АПДН і АПДН присаджувальними дротами для роботи на асиметричному змінному та постійному струмі для роботи в інтервалі струмів 50...320 (450 А);

– гібридного адитивного процесу «плазмове наплавлення присаджувальним дротом – плазмово-порошкове наплавлення»;

– гібридного адитивного процесу «плазмове наплавлення з використанням плазмової дуги та дуги з плавким електродом»;

– адитивного лазерно-плазмового (лазерно-мікроплазмового) наплавлення.

Список літератури/References

1. Laue, R., Colditz, P., Möckel, M., Awiszus, B. (2022) Study on the milling of additive manufactured components. *Metals*, **12**, 1167. DOI: <https://doi.org/10.3390/met12071167>
2. Antony, S.A. (2012) *Microstructure, texture and mechanical property evolution during additive manufacturing of Ti6Al4V alloy for aerospace applications: Microstructure*. University of Manchester, faculty of Engineering and Physical Sciences.
3. Peleshenko, S., Korzhyk, V., Voitenko, O. et al. (2017) Analysis of the current state of additive welding technologies for manufacturing volume metallic products (review). *Eastern European J. of Enterprise Technologies*, **3/1(87)**, 42–52. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.99666>
4. Kvasnytskyi, V., Korzhyk, V., Lahodzinkyi, I. et al. (2020) Creation of volumetric products using additive arc cladding with compact and powder filler materials. *Proceedings of the 2020 IEEE 10th International Conference on «Nanomaterials: Applications and Properties»*, 9–13 Nov, NAP 2020, 9309696. DOI: <https://doi.org/10.1109/NAP51477.2020.9309696>
5. Korzhik, V.N., Khaskin, V.Yu., Grinyuk, A.A. et al. (2016) 3D-printing of metallic volumetric parts of complex shape based on welding plasma-arc technologies (Review). *The Paton Welding J.*, **5-6**, 117–123. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2016.06.20>
6. Ge, J., Lin, J., Lei, Y., Fu, H. (2017) Location-related thermal history, microstructure, and mechanical properties of arc additively manufactured 2Cr13 steel using cold metal transfer welding. *Materials Science & Engineering: A*, **715**, 144–153. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.12.076>
7. Alberti, E.A., Bueno, B., D'Oliveira, A.S. (2015) Additive manufacturing using plasma transferred arc. *The International J. of Advanced Manufacturing Technology*, **83**, 9–12. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7697-7>
8. Colegrove, P., Williams, S. (2013) *High deposition rate high quality metal additive manufacture using wire + arc technology*. Cranfield University. Режим доступу: URL: <http://www.xyzist.com/wp-content/uploads/2013/12/Paul-Colegrove-Cranfield-Additive-manufacturing.pdf>
9. Özel, T., Shokri, H., Loizeau, R. (2023) A review on wire-fed directed energy deposition based metal additive manufacturing. *J. Manuf. Mater. Process.*, **7(1)**, 45. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmmp7010045>
10. Korzhik, V.N., Voitenko, A.N., Peleshenko, S.I. et al. (2017) Development of automated equipment for manufacturing 3D metal products based on additive technologies. *The Paton Welding J.*, **5-6**, 79–85. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2017.06.15>
11. Alhuzaim, A.F. (2014) *Investigation in the use of plasma arc welding and alternative feedstock delivery method in additive manufacture: Master of Science General Engineering*. Montana Tech. of the University of Montana.
12. Alaluss, K., Mayr, P. (2019) Additive manufacturing of complex components through 3D plasma metal deposition – A simulative approach. *Metals*, **9(5)**, 574. DOI: <https://doi.org/10.3390/met9050574>
13. Geng, H., Li, J., Xiong, J. et al. (2017) Geometric limitation and tensile properties of wire and arc additive manufacturing 5A06 aluminum alloy parts. *J. of Materials Engineering and*

- Performance*, 26, 621–629. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11665-016-2480-y>
14. Gnatenko, M., Chigileichik, S., Sakhno, S. (2021) Manufacture of aviation parts from heat-related nickel alloys by multilayer plasma surfacing. *Aerospace Technic and Technology*, 5(175), 48–52. DOI: <https://doi.org/10.32620/akt.2021.5.06> [in Ukrainian]
 15. Gnatenko, M., Zhemaniuk, P., Petrik, I. et al. (2019) Detecting the influence of heats sources on material properties when production a aviation parts by a direct energy deposition method. *Eastern–European j. of enterprise technologies*, 1(12(97)), 49–55. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.157604>
 16. Gnatenko, M., Naumyk, V., Matkovska, M. (2019) Influence of sources of heating and protective gases on the properties of the material obtained by the direct deposition. *Materials Science and Technology*, 68–74. DOI: https://doi.org/10.7449/2019/MST_2019_68_74
 17. Grinyuk, A.A., Korzhik, V.N., Shevchenko, V.E. et al. (2015) Main tendencies in development of plasma-arc welding of aluminium alloys. *The Paton Welding J.*, 11, 31–41. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2015.11.04>
 18. Bai, J.Y., Yang, C.L., Lin, S.B. et al. (2016) Mechanical properties of 2219-Al components produced by additive manufacturing with TIG. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 86, 479–485. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-015-8168-x>
 19. Qi, Z., Cong, B., Qi, B. et al. (2018) Microstructure and mechanical properties of double-wire + arc additively manufactured Al–Cu–Mg alloys. *J. of Materials Processing Technology*, 255, 347–353. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.12.019>
 20. Lin, Z., Song, K., Yu, X. (2021) A review on wire and arc additive manufacturing of titanium alloy. *J. of Manufacturing Processes*, 70, 24–45. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.08.018>
 21. Hofer, K., Mayr, P. (2018) Additive manufacturing of titanium parts using 3D plasma metal deposition. *Materials Science Forum*, 941, 2137–2141. DOI: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.941.2137>
 22. R'ios, S., Colegrove, P.A., Williams, S.W. (2019) Metal transfer modes in plasma wire + arc additive manufacture. *J. of Materials Processing Tech*, 264, 45–54. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.08.043>
 23. Lin, J.J., Lv, Y.H., Liu, Y.X. et al. (2016) Microstructural evolution and mechanical properties of Ti–6Al–4V wall deposited by pulsed plasma arc additive manufacturing. *Materials & Design*, 102, 30–40. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.04.018>
 24. Kelly, S.M., Kampe, S.L. (2004) Microstructural evolution in laser-deposited multilayer Ti–6Al–4V builds: Part II. Thermal Modeling. *Metall Mater. Trans.: A*, 35(6), 1869–1879. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-004-0095-7>
 25. Xu, F.J., Lv, Y.H., Xu, B.S., Liu, Y.X. (2013) Effect of deposition strategy on the microstructure and mechanical properties of Inconel 625 superalloy fabricated by pulsed plasma arc deposition. *Mater.*, 45, 446–455. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.07.013>
 26. Martinaa, F., Mehnen, J., Williams, S.W. et al. (2012) Investigation of the benefits of plasma deposition for the additive layer manufacture of Ti–6Al–4V. *J. of Materials Processing Technology*, 212(6), 1377–1386. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.02.002>
 27. Colegrove, P.A., Martina, F., Roy, M.J. et al. (2014) High pressure interpass rolling of wire + arc additively manufactured titanium components. *Advanced Materials Research*, 996, 694–700. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.996.694>
 28. Wu, B., Ding, D., Pan, Z. et al. (2017) Effects of heat accumulation on the arc characteristics and metal transfer behavior in wire arc additive manufacturing of Ti6Al4V. *J. of Materials Processing Technology*, 250, 304–312. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.07.037>
 29. Wua, B., Pana, Z., Dingb, D. et al. (2018) The effects of forced interpass cooling on the material properties of wire arc additively manufactured Ti6Al4V alloy. *J. of Materials Processing Technology*, 258, 97–105. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.03.024>
 30. Reisgen, U., Sharma, R., Oster, L. (2019) Plasma multiwire technology with alternating wire feed for tailor-made material properties in wire and arc additive manufacturing. *Metals*, 9(7), 745. DOI: <https://doi.org/10.3390/met9070745>
 31. Qi, Z., Cong, B.Q., Qi, B. et al. (2018) Microstructure and mechanical properties of 1 double-wire + arc additively manufactured Al–2 Cu–Mg alloys. *J. of Material Processing Technology*, 255, 347–353. DOI: <https://10.1016/j.jmatprotec.2017.12.019>
 32. Korzhik, V.M., Grynyuk, A.A., Khaskin, V.Yu. et al. (2023) Influence of the speed of plasma-arc welding at a variable polarity asymmetrical current on the formation of joints of high-strength aluminium alloys. *The Paton Welding J.*, 8, 17–28. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2023.08.02>

PLASMA-ARC TECHNOLOGIES OF ADDITIVE SURFACING (3D PRINTING) OF SPATIAL METAL PRODUCTS: APPLICATION EXPERIENCE AND NEW OPPORTUNITIES

V.M. Korzhik¹, A.A. Grynyuk¹, V.Yu. Khaskin¹, O.M. Voytenko¹, O.M. Burlachenko¹, O.O. Khuan^{2,3}

¹ E. O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., Kyiv, 03150, Ukraine.

² E.O. Paton Institute of Materials Science and Welding, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”. 37 Beresteiska Ave., Kyiv, 03056, Ukraine.

³ Paton Research Institute of Welding Technologies in Zhejiang Province: People’s Republic of China, Zhejiang Province, Hangzhou City, Xiaoshan District, St. Shixing Beilu 857, office. 426.

The growing relevance of 3D printing of finished metal products in recent years is due to the reduction of costs for manufacturing, machining, changing the standard sizes and nomenclature of parts, the possibility of obtaining solid parts with complex internal geometry. One of the most promising 3D printing processes, which provides a wide range of productivity (0.02 - 25 kg/h and more) with the possibility of surfacing a wall with a thickness of 2-20 mm, is additive plasma-arc surfacing (APDN) with wires and powder materials. The work examines the current state of research on additive manufacturing of metal parts from steels and alloys, determines the state and prospects for the development of APDN. It is shown that APDN allows performing 3D printing using a wide range of implant materials, in particular, compact and composite (powder) wires, powders of light alloys and refractory metals, composite powders and mechanical mixtures of powders of alloys, metal ceramics, carbides, borides, etc. New opportunities for the application of APDN include development of technologies for growing products from materials with gradient functional properties, from dissimilar materials, with accompanying modification of the deposited metal by additional processing, improving the properties of the deposited metal due to the use of hybrid processes. The state of innovative developments of APDN technologies and equipment carried out at the E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, and their industrial implementation is highlighted. 32 Ref., 5 Tabl., 22 Fig.

Keywords: additive manufacturing, 3D printing, plasma arc surfacing, steel, nickel, aluminum, titanium alloys, structure, mechanical properties, gradient functional properties, equipment.

Надійшла до редакції 26.10.2023