

МЕТАЛЕВО-ПОРОШКОВИЙ ДРІТ НА ОСНОВІ ТИТАНУ ЯК МАТЕРІАЛ ДЛЯ АДДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА ДЕТАЛЕЙ

С.Л. Шваб¹, Р.В. Селін¹, С.В. Ахонін¹, М.М. Ворон², Д.В. Ковальчук³

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

²ФТІМС НАН України. 03142, м. Київ, бул. Академіка Вернадського, 34

³ПрАТ «НВО «Червона Хвиля». 04114, м. Київ, вул. Дубровицька, 28. E-mail: dmytro@xbeam3d.com

У роботі показано можливість виготовлення металопорошкових дротів на основі високоміцних титанових сплавів різного складу (систем Ti–5Al–5Mo–5V–1Fe–1Cr та Ti–5Al–5Mo–5V–4Nb–1,5Cr–1Fe–2,5Zr), сплаву на основі титану медичного призначення (система Ti–13Zr–13Nb) та конструкційного титанового сплаву ВТ6 (система Ti–6Al–4V), армованого частинками TiC. Відображено технологічні моменти експериментального виробництва металопорошкових дротів методом волочіння та наступних перетяжок. Проведено дослідження із застосування цих матеріалів у якості присадного металу при WAAM технології як при аргонодуговому, так і при електронно-променевому способах наплавлення. Бібліогр. 21, табл. 1, рис. 10.

Ключові слова: високоміцні титанові сплави, металопорошковий дріт, WAAM, TIG, xBeam 3D Metal Printing

Вступ. Технології адитивного виробництва стали альтернативою звичайним методам виробництва деталей із високою доданою вартістю, включаючи ті, що стосуються аерокосмічної галузі, та біомедичних продуктів, які вимагають дуже складних та індивідуальних підходів при малих обсягах. Адитивне виробництво дозволяє виготовляти ці необхідні складні деталі за короткий час із постійною вартістю.

Серед різних матеріалів сплави на основі титану все частіше застосовуються при WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) методі завдяки їх використанню в аерокосмічній промисловості для виробництва планерних конструкцій. Міцні, як Ti–6Al–4V (ВТ6), та високоміцні двофазні титанові сплави користуються великим попитом в авіакосмічній галузі завдяки високій питомій міцності, корозійній стійкості, стійкості до пошкоджень та сумісності з композитними матеріалами з графітового волокна [1]. З різних доступних підходів процес WAAM має ряд переваг перед іншими технологіями 3D друку, включаючи: високий коефіцієнт використання матеріалу (99 % [2]) та енергоефективність (~ 70 % [3]), нижчі капітальні витрати на обладнання, високу продуктивність процесу друку [4].

На сьогоднішній день існує ряд дротів суцільного перерізу на основі титану, які випускаються промисловістю. Для TIG зварювання деталей з титанових сплавів з невисоким вмістом легуючих елементів у якості присадного матеріалу використовують промислові дроти з чистого титану. Також існують дроти суцільного перерізу на основі титану з підвищеним вмістом легуючих елементів. Межа міцності металу таких дротів не Шваб С.Л. – <https://orcid.org/0000-0002-4627-9786>, Селін Р.В. – <https://orcid.org/0000-0002-2990-1131>, Ахонін С.В. – <https://orcid.org/0000-0002-7746-2946>, Ворон М.М. <https://orcid.org/0000-0002-0804-9496>, Ковальчук Д.В. – <https://orcid.org/0000-0001-9016-097X>

© С.Л. Шваб, Р.В. Селін, С.В. Ахонін, М.М. Ворон, Д.В. Ковальчук, 2023

перевищує 870 МПа. Виробництво якісних дротів суцільного перерізу з високоміцних титанових сплавів дуже складне, так як підвищена міцність металу не дозволяє отримувати дроти без дефектів. Раніше були зроблені спроби з виробництва дроту зі сплаву Ti–5Al–5Mo–5V–1Fe–1Cr (ВТ22), міцність якого сягає понад 1000 МПа [5]. На поверхні цього дроту були виявлені тріщини та надриви, що може стати джерелом забруднень наплавленого металу і, як наслідок, зниження його якості. Тому промислове виробництво дротів з високоміцних титанових сплавів відсутнє.

Незважаючи на велику кількість досліджень з виробництва деталей методом WAAM, переважна частина досліджень прикута лише отриманню деталей із застосуванням суцільних дротів. Практично відсутні дослідження з використання порошкового дроту для отримання деталей із високоміцних титанових сплавів цим методом. Застосування порошкового дроту при отриманні деталей методом WAAM дозволяє виробляти деталі з високоміцних титанових сплавів та значно збільшити номенклатуру титанових сплавів, які можна використовувати для отримання деталей цим методом.

Одним із важливих і складних технологічних процесів при виробництві металопорошкових дротів є підготовка їх осердя – металеві складові, тобто самого порошку. Сьогодні в Україні існує два способи виробництва порошків на основі титану.

За першим способом подрібнення легуваного титану проводиться за допомогою методу термохімічного окрихчування за допомогою водню – метод гідрування-дегідрування (HDH – Hydrogenation-DeHydrogenation) [6]. При цьому

процесі металеві блоки титану піддають гідруванню для підвищення крихкості титану. Крихкий титановий блок дроблять механічним шляхом і розсіюють за фракціями. Сукупність технологічних рішень виробництва таких порошків титану дозволяє отримувати щільніший матеріал з меншим вмістом шкідливих домішок, що підвищує якість порошку та покращує його морфологію.

Другий спосіб отримання порошку на основі титанових сплавів – це метод плазмового розпилення заготовки PREP (Plasma Rotating Electrode Process) [7]. Спосіб полягає в наступному: електрод сплаву, що розпорошується, обертається навколо горизонтальної осі, а його вільний кінець розплавляють за допомогою плазмотрона. Краплі розплавленого металу зриваються з електроду, що обертається, і кристалізуються у вільному польоті до зіткнення зі стінками камери розпорошення. У камері, де обертається електрод і відбувається розпилення, повинно бути захисне від окислення середовище. Це дозволяє отримувати порошки з високою чистотою поверхні. Частинки порошку гладкі, сферичної форми, середній розмір частинок 200 мкм, вихід частинок з розмірами від 50 до 500 мкм складає 75 %. Однією з переваг порошків, отриманих цим способом – це їх висока плинність і чистота (низький вміст кисню) [8].

Метою роботи, з огляду на складність виготовлення якісних дротів суцільного перерізу на основі міцних та високоміцних титанових сплавів, було отримання та застосування металопорошкових дротів на основі цих сплавів для адитивного

виробництва деталей, де в якості осердя застосовуються порошки, які в свою чергу підготовлені способами HDH і PREP.

Результати та їх обговорення. Отримання металопорошкового дроту. Розробка та виробництво металопорошкових дротів на основі титанових сплавів відбувається методом волочіння та наступних перетяжок на установці, яка призначена для виробництва титанових порошкових дротів (рис. 1). У якості оболонки застосовується титанова фольга марки BT1-00 завтовшки 0,2 мм. У залежності від типу порошку застосовується відповідний дозатор шихти. При використанні порошку, отриманого способом PREP, гранули в середині сформованої трубки мають недостатній взаємний контакт, тому при попаданні дуги на такий дріт вони вивільняються, більша частина їх не попадає в зварювальну ванну, налипає на вольфрамовий електрод, що порушує стабільність протікання процесу. З цієї метою попередньо способом деформування змінюється їх форма.

Дозування шихти в сформовану трубку здійснюється через направляючу насадку бункера-дозатора, оснащену шибром-регулятором (рис. 2, а). Для забезпечення попереднього ущільнення шихти та необхідного значення перекриття країв стрічки використовується філь'ера, що обертається, встановлена після останньої пари формуючих роликів. Напрямок обертання філь'ери повинен співпадати з напрямом напуску стрічки закриття трубки (рис. 2, б, в). Перетяжка сформованого дроту здійснюється за допомогою набору філь'ер

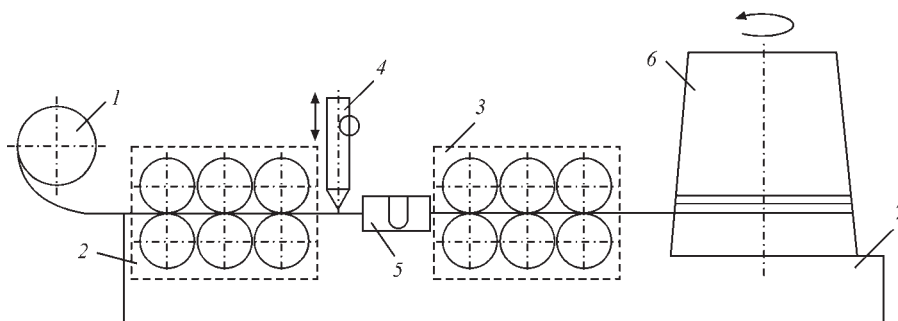


Рис. 1. Схема волочильного верстата для виробництва порошкового титанового дроту: 1 – касета; 2, 3 – роликів кліт; 4 – дозатор; 5 – U-подібна планка; 6 – барабан; 7 – станина



Рис. 2. Процес формування та перетяжки металопорошкового дроту: а – дозування шихти; б – схема закриття оболонки; в – філь'ера, що обертається

Таблиця 1. Хімічний склад титанового сплаву VT22, % мас. (ГОСТ 19807-91)

Ti	Al	V	Mo	Fe	Cr	[O]	[H]	[N]
Основа	4,4...5,7	4,0...5,5	4,0...5,5	0,5...1,5	0,5...2,0	0,18	0,015	0,05

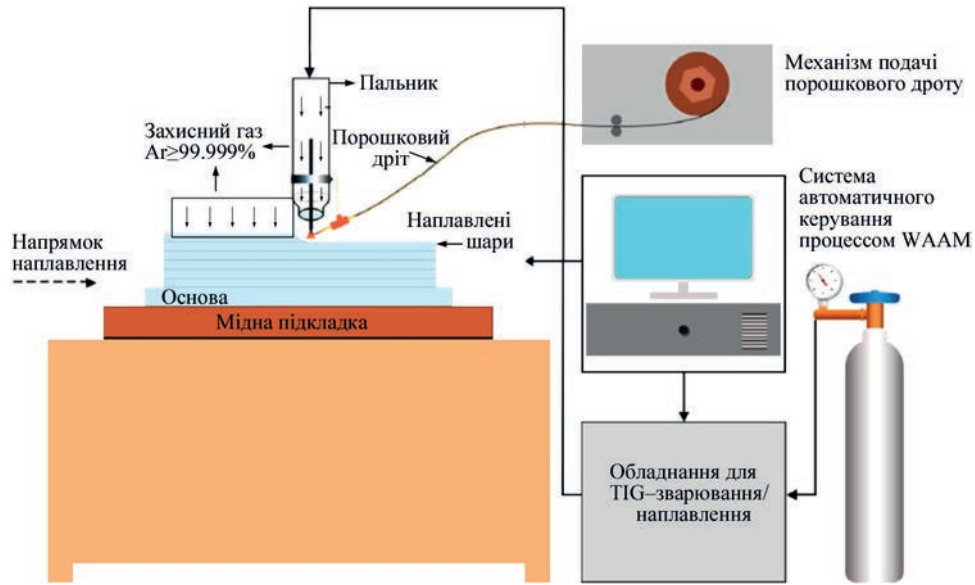


Рис. 3. Схема установки для пошарового наплавлення TIG способом із присадним металопорошковим дротом

з кроком 0,1 мм. Дріт подається в філь'єру таким чином, щоб на барабані він розміщувався швом назовні, так як розтягнення зовнішніх волокон призводить до додаткового закриття шва, а також виключає викривлення (гофр).

Застосування металопорошкового дроту на основі титанового сплаву VT22. Раніше [9] було розроблено металопорошковий дріт на основі титанового сплаву VT22 марки ППТ-22 діаметром 2,9 мм з коефіцієнтом заповнення 65 %. До складу осердя цього дроту входить порошок із високоміцного титанового сплаву VT22 і флюсу системи $\text{CaF}_2\text{-SrF}_2\text{-BaF}_2$ у кількості 7 % по відношенню до наповнювача. Даний дріт призначено для TIG зварювання та наплавлення титанового сплаву VT22.

Даний дріт також було використано в якості присадного дроту при багатошаровому напавленні. Проводилось експериментальне трьохшарове напавлення із застосування отриманого присадного дроту із гранулами високоміцного титанового сплаву VT22. Напавлення високоміцних титанових сплавів ускладнено, у першу чергу, високим вмістом в них легуючих елементів, таких як алюміній, ванадій, молібден (табл. 1). Крім того, ці сплави титану в порівнянні зі звичайними сплавами є чутливішими до домішок впровадження таких як азот та вуглець, так як розчинність останніх в ОЦК решітці β -фази титану значно нижче. Вони більш схильні до розвитку в процесі напавлення хімічної і фізичної неоднорідності в литому металі і ЗТВ в результаті чого, можливе утворення крихких прошарків. Шляхом правильного вибору режимів напавлення в більшості випадків мож-

ливе отримання якісних зварних з'єднань високоміцних титанових сплавів.

Процес напавлення проводився на установці для TIG зварювання/напавлення титанових сплавів, яку було адаптовано для процесу пошарового напавлення (рис. 3). Процес напавлення проводився на режимі: $I_{зв} = 200 \text{ А}$, $U_d = 12 \text{ В}$, $V_{зв} = 8 \text{ м/г}$, $V_{под} = 30 \text{ м/г}$, $L_d = 4 \text{ мм}$.

Експериментальне напавлення із застосуванням отриманого дроту показало стабільне протікання процесу (без висипання нерозплавлених гранул), що свідчило про достатнє ущільнення

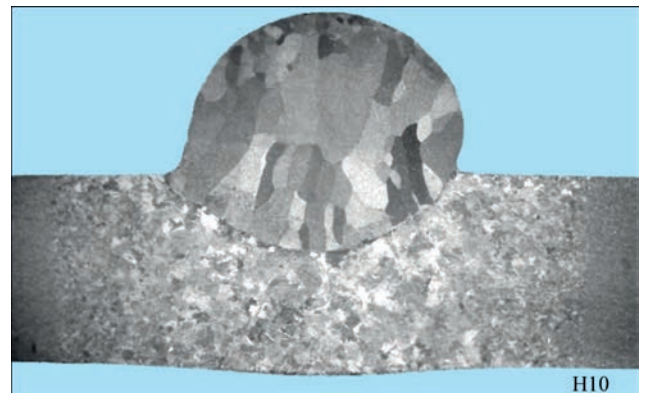


Рис. 4. Макрошліф отриманого трьохшарового зразка із застосуванням присадного порошкового дроту на основі титанового сплаву VT22

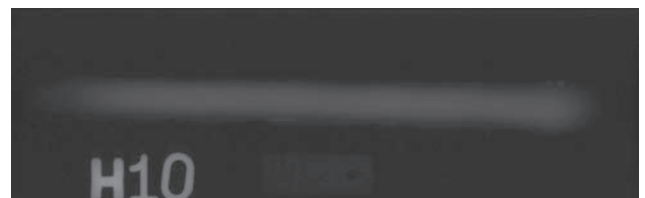


Рис. 5. Рентгенограма напавленого зразка

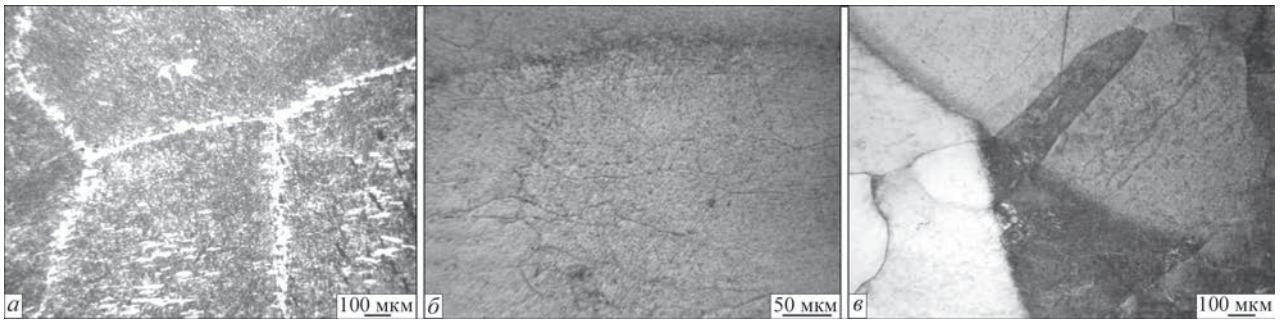


Рис. 6. Мікроструктура трьохшарового зразка із застосуванням присадного порошкового дроту на основі титанового сплаву BT22: а – основний метал; б – метал шва; в – зона сплавлення

шихти та її рівномірний розподіл по довжині дроту. У результаті отримано якісний трьохшаровий зразок (рис. 4), у якому по всій довжині відсутні пори (рис. 5).

Сплав BT22, на якому було здійснено TIG із застосуванням порошкового дроту, складається з великих полідрічних первинних β-зерен. Поряд з рівновісними зернами в структурі основного металу присутні нерівновісні зерна, коефіцієнт форми зерна (відношення довжини зерна до його ширини) знаходиться в межах 1...3, ширина зерен становить 1...2,5 мм (рис. 6, а).

У наплавленому металі ступінь легування β-стабілізуючими елементами порівняно зі сплавом BT22 трохи нижча через розведення металу шва технічним титаном оболонки порошкового дроту. Це призводить найімовірніше до виділення з β-твердого розчину дисперсних частинок α-фази. Утворення брижі в β-зернах мабуть можна пояснити розшаруванням β-твердого розчину на збагачені та збіднені певними легуючими елементами об'єми. У металі шва спостерігається утворення субструктури (рис. 6, б). Поява субструктури пояснюється полігонізацією під впливом внутрішніх напружень у зварному з'єднанні. Залишкові напруження спричинюються температурними градієнтами, фазовими перетвореннями в зоні нагріву при термічному циклі зварювання, а також процесами кристалізації рідкого металу в області зварного шва. При утворенні субструктури відбувається розворот окремих об'ємів великого β-зерна на невеликий кут один відносно іншого. Наявність субзеренної структури сприяє підвищенню міцності та зниженню пластичності. Інтенсивність розпаду β-фази в ЗТВ значно нижча, ніж у шві, що свідчить про більшу стабільність β-твердого розчину в сплаві BT22, ніж в металі шва, у зв'язку з великим вмістом β-стабілізуючих елементів (рис. 6, в).

Після механічних випробувань було встановлено межу міцності наплавленого зразка, яка складає 1025 МПа. Вміст газів в наплавленому металі не перевищує їх допустимих значень в основному металі: [O] = 0,098 мас. %, [H] = 0,0027 мас. %, [N] = 0,014 мас. %.

Застосування металопорошкового дроту на основі титанового сплаву T120. Також було отримано [10] багатошарові зразки з присадним порошковим дротом на основі високоміцного титанового сплаву T120 (система легування Ti–5Al–5Mo–5V–4Nb–1,5Cr–1Fe–2,5Zr), розробленого в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України [11]. У якості присадки було використано металопорошковий дріт діаметром 2,2 мм з коефіцієнтом заповнення 50 %. Осердя даного дроту складалося із порошку титанового сплаву T120, отриманого способом HDH. Процес наплавлення відбувався аргонодуговим способом неплавким електродом (рис. 2) на наступному режимі: $I_{зв} = 160...180$ А, $U_{д} = 12$ В, $V_{зв} = 6$ м/год, $V_{под} = 40...45$ м/год, $L_{д} = 2$ мм. У результаті проведених робіт було отримано п'ятишаровий зразок (рис. 7).

Межа міцності наплавленого металу становить 878,7 МПа, ударна в'язкість – 15,1 Дж/см², що значно нижче за значення механічних характеристик основного металу: $\sigma_{в} = 1145,8$ МПа, $KCV = 30,6$ Дж/см². Це пояснюється наявністю пористості в наплавленому металі. Задля попередження зародження пор в наплавленому металі необхідно вводити флюсову складову в метал осердя. Також високоміцні двофазні титанові сплави та отримані з ними з'єднання піддаються обов'язковій термічній обробці, що в свою чергу дозволяє підвищити рівень механічних характеристик [12].

Застосування металопорошкового дроту на основі титанового сплаву Ti–13Zr–13Nb. Використання титанових сплавів в ендопротезуванні



Рис. 7. Загальний вид п'ятишарового зразка після процесу наплавлення присадним порошковим дротом на основі титанового сплаву T120

найінтенсивніше розвивається протягом останніх тридцяти років завдяки унікальним показникам їх біосумісності та найоптимальнішого поєднання механічних і біомеханічних властивостей [13]. Серед головних вимог, які висуваються до виробництва титанових сплавів медичного призначення, є комплекс механічних властивостей: низький модуль пружності, висока міцність та високий опір втомному руйнуванню. Особливої уваги заслуговує така характеристика, як модуль пружності. Протягом останніх років важливою стала потреба отримання сплавів для ендопротезів з низьким модулем пружності, що пов'язано із застосуванням безцементної фіксації протезів і зниженням ризиків розвитку діафізарної дисплазії та руйнування кісток після тривалого використання протезів. Саме β -сплави часто мають модуль пружності нижчий за показники $(\alpha+\beta)$ -сплавів медичного призначення і при цьому характеризуються високою міцністю. Нетоксичні легуючі елементи є β -стабілізаторами титану або тими, що зміцнюють сплав. Тому можна судити про широкі можливості їх використання в різних концентраційних інтервалах саме для створення біосумісних титанових сплавів [14, 15]. Сплави титану з цирконієм і потрійні сплави Ti–Zr–Nb мають найперспективніше поєднання міцності та модуля пружності. Подвійні сплави Ti–Zr характеризуються міцністю в діапазоні 600...1450 МПа та модуля пружності 72...110 ГПа, а композиції Ti–Zr–Nb мають міцність у діапазоні 600...1000 МПа та модуль пружності в межах 58...80 ГПа, що значно краще, ніж поєднання цих же параметрів у сплаві ВТ6 [16].

Проаналізувавши актуальність використання низькомодульних титанових сплавів для ендопротезування та технології виготовлення з них готових виробів, які передбачають наявність стрижнів для фіксації, або інших навантажених і масивних елементів, було зроблено висновок про доцільність методу WAAM як альтернативи існуючим адитивним способам виробництва. Задля поставленої мети було розроблено металопорошковий дріт (діаметром 3,0 мм, коефіцієнт заповнення 62%), осердя якого являє собою порошок розмірністю 50...70 мкм із титанового сплаву системи

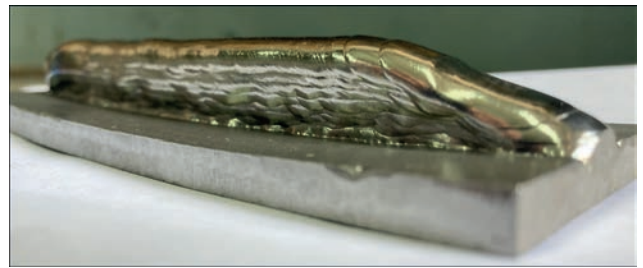


Рис. 8. Загальний вигляд дев'ятишарового зразка після процесу наплавлення присадним металопорошковим дротом на основі титанового сплаву системи Ti–Zr–Nb

Ti–13Zr–13Nb. Порошок попередньо було отримано способом HDH.

З отриманим металопорошковим дротом на основі титанового сплаву медичного призначення було проведено багат шарове TIG наплавлення на попередньо встановленому режимі: $I_{зв} = 210$ А, $U_{д} = 12,7$ В, $V_{зв} = 8$ м/г, $V_{под} = 34$ м/г, $L_{д} = 3,5$ мм. У результаті було отримано дев'ятишаровий зразок (рис. 8).

Висота напавленого з'єднання – 15,2 мм, ширина – 11,8 мм. Наразі проходить аналіз металографії отриманого зразка, оцінка його механічних властивостей (межа міцності та модуль пружності), визначення кількості газів у напавленому металі.

Застосування металопорошкового дроту на основі порошку Ti–6Al–4V–40%TiC. Одними з небагатьох недоліків титанових сплавів є їх невисока твердість та недостатня зносостійкість під час експлуатації конструкцій з них. Такі недоліки можна подолати створенням металоматричних композитів на основі титану, армованих твердими високомодульними фазами. Одним із таких прикладів є зміцнення матриці титанового сплаву високомодульними та легкими частинками карбїду титану (TiC) [17]. Задля отримання кращої дисперсності та однорідності порошоків карбїду титану їх виготовляють методом порошкової металургії [18].

Як у випадку з високоміцними титановими сплавами, так і зі сплавами, армованими твердими частинками, є проблема з отриманням дротів суцільного перерізу. Тому стояло завдання отримати металопорошковий дріт на основі міцного сплаву ВТ6 (система Ti–6Al–4V), армованого частинками TiC. У результаті експериментів було

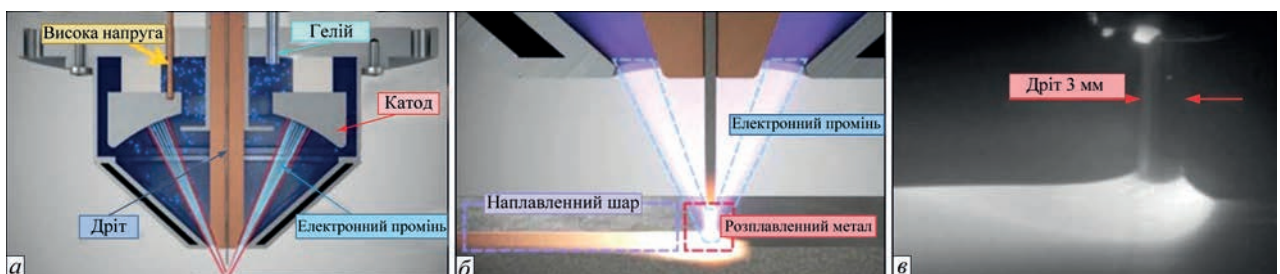


Рис. 9. Конфігурація процесу xBeam® 3D Metal Printing: схематичний дизайн xGun (а); конфігурація нагрітої зони в точці подачі під час осадження (б); фото реального процесу осадження (в) [21]

отримано дослідний дріт діаметром 3,0 мм (коефіцієнт заповнення 62 %) з осердям із порошку Ti-6Al-4V+40%TiC.

Технологія передового адитивного виробництва під назвою xBeam 3D Metal Printing (рис. 9), розроблена компанією «Червона хвиля» [19], продемонструвала можливість виготовлення виробів із титанових сплавів з контрольованою мікроструктурою, стехіометричним хімічним складом, а, отже, з бажаними механічними характеристиками [20]. Наплавлення дослідним дротом відбувалося способом за цією технологією.

За результатами експериментів з 3D друку із використанням металопорошкового дроту було отримано одношарові та багатошарові зразки (рис. 10).

Однією із істотних переваг процесу xBeam є можливість одночасного плавлення присадного дроту та підкладки завдяки особливостям електронного променя. Однак при застосування в якості присадки металопорошкового дроту частина електронного променя, яка падала на дріт, миттєво розплавляла його тонку оболонку, внаслідок чого вивільнявся порошок, розлітався та не попадав у зварювальну ванну. З цієї причини в метал шва потрапляв не весь порошок, а лише його частина, що призводить до відхилень від прогнозованого хімічного складу металу наплавленого валика. Крім того, розсипаний порошок частково потрапляв у розрядну камеру електронної гармати та на катод, спричиняючи поломки, що значно погіршувало стабільність процесу осадження, внаслідок чого ще більше погіршувалася рівномірність розподілу компонентів TiC в наплавленому металі.

Задля попередження уникнення вищевказаних проблем конфігурація взаємного розміщення елементів процесу (профільний електронний промінь, дріт і підкладка) було налаштовано таким чином, щоб електронний промінь не потрапляв безпосередньо на дріт. Для цього підкладку розміщували ближче до гармати. У цій конфігурації вся енергія електронного променя потрапляла на підкладку, створюючи ширшу та глибшу ванну розплаву, ніж це зазвичай робиться за допомо-

гою дроту суцільного перерізу. Таким чином, порошковий дріт занурювався у розплавлену ванну та розплавлявся там, зберігаючи оболонку в твердому стані над ванною протягом усього процесу плавлення. Завдяки цьому оболонка запобігала вивільненню порошку до того, як він потрапив у рідкий метал зварювальної ванни. Це рішення дозволило забезпечити досить стабільний процес плавлення дроту. Правда таке рішення стало можливим за умови надмірного вкладення тепла в підкладку. Проте вплив такого перегріву на структуру ще потребує вивчення.

Висновки

Створення металопорошкових дротів на основі титанових сплавів різного призначення вирішує актуальну проблему в області сучасних адитивних технологій, а саме, їх застосування дозволяє отримувати якісні багатошарові зразки. Запропоновані присадні металопорошкові дроти на основі високоміцних титанових сплавів, а також сплавів медичного призначення можуть застосовуватись в якості присадних матеріалів при адитивному виробництві деталей із титанових сплавів як при TIG, так і при електронно-променевому способах 3D друку.

Список літератури/References

- Martina, F., Colegrove, P.A., Williams, S.W., Meyer, J. (2015) Microstructure of interpass rolled wire + arc additive manufacturing Ti-6Al-4V components. *Metall. Mater. Trans. A*, 46(12), 6103–6118. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-015-3172-1>
- Rios, S., Colegrove, P.A., Martina, F., Williams, S.W. (2018) Analytical process model for wire + arc additive manufacturing. *Addit. Manuf.*, 21, 651–657. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.04.003>
- Bekker, A.C.M., Verlinden, J.C. (2018) Life cycle assessment of wire + arc additive manufacturing compared to green sand casting and CNC milling in stainless steel. *J. Clean. Prod.*, 177, 438–447. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.148>
- Lütjering, G., Williams, J.C. (2007) *Titanium*. 2nd ed.; Springer, Berlin/Heidelberg, Germany.
- Akhonin, S.V., Schwab, S.L. (2019) Filler flux-cored wire for tig welding and surfacing of VT22 titanium alloy. *The Paton Welding J.*, 6, 34–37. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwg2019.06.06>
- Yanko, T.B., Ovchinnikov, A.V., Lyutyk, N.P., Korzhyk, V.N. (2018) Technology for obtaining of plasma spheroidised HDH titanium alloy powders used in 3D printing. *Technological systems*, 85(4), 36–41. DOI: <http://dx.doi.org/10.29010/085.7>
- Sun, P., Fang, Z.Z., Zhang, Y., Xia, Y. (2017) Review of the methods for production of spherical Ti and Ti alloy powder. *Jom*, 69(10), 1853–1860. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11837-017-2513-5>
- Кошелев, В.Я., Кузнецов, В.А., Сухов, Д. И. (2010) К вопросу о производстве гранул крупностью менее 200 мкм из титановых сплавов методом плазменной плавки и центробежного распыления литой заготовки. *Технология легких сплавов*, 2, 44–48. Koshelev, V.Ya., Kuznetsov, V.A., Sukhov, D.I. (2010) To problem of manufacturing of granules of less than 200 μm coarseness from titanium alloys by plasma melting method and centrifugal spraying of cast billet. *Tekhnologiya Lyogkikh Splavov*, 2, 44–48 [in Russian].

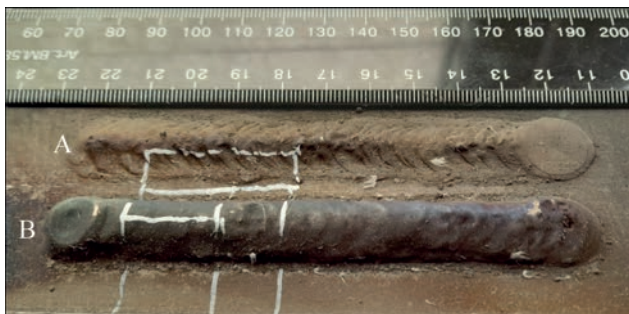


Рис. 10. Загальний вигляд зразків: А – одношаровий; В – багатошаровий

9. Schwab, S., Selin, R., Voron, M. (2023) Welding materials for TIG welding, surfacing, and WAAM technology of titanium alloys. *Welding in the World*, 67(4), 981–986. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40194-023-01464-z>
10. Шваб С.Л., Селін Р.В., Руханський С.Б. (2023) Розробка металопорошкового дроту на основі титанового сплаву Ti20. *Автоматичне зварювання*, 3, 10–14. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2023.03.02>
Schwab, S., Selin, R., Voron, M. (2023) Welding materials for TIG welding, surfacing, and WAAM technology of titanium alloys. *Автоматичне Зварювання*, 3, 10–14. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40194-023-01464-z>
11. Ахонин С.В., Селін Р.В., Березос В.А. и др. (2016) Разработка нового высокопрочного титанового сплава. *Современная электротехнология*, 4, 22–27. DOI: <https://doi.org/10.15407/sem2016.04.04>
Akhonin, S.V., Selin, R.V., Brzezoz, V.A. et al. (2016) Development of new high-strength titanium alloy. *Sovrem. Elektrometall.*, 4, 22–27. DOI: <https://doi.org/10.15407/sem2016.04.04>
12. Prilutsky, V.P., Akhonin, S.V., Schwab, S.L., Petrychenko, I.K. (2018) Effect of heat treatment on the structure and properties of titanium alloy VT22 welded joints produced by TIG-welding with flux-cored wire. *Materials Science Forum*, 927, 119–125. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.927.119>
13. Shunxing, L. (2020) Review of the design of titanium alloys with low elastic modulus as implant materials. *Advanced Engineering Materials*, 22(11). DOI: <https://doi.org/10.1002/adem.202000555>
14. Niinomi, M. (2011) *Low modulus titanium alloys for inhibiting bone atrophy*. In: *Biomaterials Science and Engineering* (Book). Edited by Prof. R. Pignatello, pp. 249–268.
15. Ворон М., Шваб С., Селін Р. (2022) Сучасні підходи в розробці біосумісних титанових сплавів з підвищеним рівнем експлуатаційних властивостей. *Метал та луття України*, 30(2), 88–95. DOI: <https://doi.org/10.15407/scin15.04.005>
Voron, M., Shvab, S., Selin, R. (2022) Modern approaches in development of biocompatible titanium alloys with higher level of service properties. *Metal ta Luttya Ukrainy*, 30(2), 88–95. DOI: <https://doi.org/10.15407/scin15.04.005>
16. Xiatong, B. et al. (2022) Exploring the limits of mechanical properties of Ti–Zr binary alloys. *Materials Letters*, 318, 132091. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.132091>
17. Miracle, D. (2005) Metal matrix composites – From science to technological significance. *Composites Science and Technology*, 65(15–16), 2526–2540. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2005.05.027>
18. Ivasishin, O.M., Markovsky, P.E., Savvakina, D.G. et al. (2019) Multi-Layered structures of Ti–6Al–4V alloy and TiC and TiB composites on its base fabricated using blended elemental powder metallurgy. *J. Mater. Proc. Technol.*, 269, 172–181. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.02.006>
19. Kovalchuk, D., Melnyk, V., Melnyk, I., Tugai, B. (2016) Prospects of application of gas-discharge electron beam guns in additive manufacturing. *J. of Elektrotechnika & Elektronika (E+E)*, 51(5–6), 37–43.
20. Kovalchuk, D., Melnyk, V., Melnyk, I. et al. (2021) Microstructure and properties of Ti–6Al–4V articles 3D-printed with co-axial electron beam & wire technology. *J. of Materials Engineering and Performance*, 30(7), 5307–5322. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11665-021-05770-9>
21. Kovalchuk, D., Melnyk, V., Melnyk, I. (2022) A coaxial wire-feed additive manufacturing of metal components using a profile electron beam in space application. *J. of Materials Engineering and Performance*, 31(8), 6069–6082. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11665-022-06994-z>

TITANIUM-BASED METAL POWDER WIRES AS MATERIALS FOR ADDITIVE MANUFACTURING

S.L. Schwab¹, R.V. Selin¹, S.V. Akhonin¹, M.M. Voron², D.V. Kovalchuk³

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

E-mail: serg.schwab@gmail.com

^{2,3}Physico-Technological Institute of Metals and Alloys of the NAS of Ukraine. 34/1 Vemadskyi Blvd., 03142, Kyiv, Ukraine.

³PJSC «NVO «Chervona Khvylya», 28 Dubrovynska Str., 04114, Kyiv, Ukraine. E-mail: dmytro@xbeam3d.com

The paper shows the possibility of manufacturing metal flux-cored wires based on high-strength titanium alloys of different compositions (Ti–5Al–5Mo–5V–1Fe–1Cr and Ti–5Al–5Mo–5V–4Nb–1.5Cr–1Fe–2.5Zr systems), alloy based on medical grade titanium (Ti–13Zr–13Nb system) and structural titanium VT6 alloy (Ti–6Al–4V system), reinforced with TiC particles. The technological moments of the experimental production of metal flux-cored wires by the method of drawing and subsequent pulling are shown. The study was conducted on using these materials as a filler metal in WAAM technology both in the methods of argon arc as well as electron beam surfacing. Ref. 21, Tab. 1, Fig. 10.

Keywords: high-strength titanium alloys, metal flux-cored wire, WAAM, TIG, xBeam 3D Metal Printing

Надійшла до редакції 20.10.2023

