

# ОТРИМАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНО-ГРАДІЄНТНИХ МЕТАЛОМАТРИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ «Ti-6Al-4V + WC» МЕТОДОМ АДИТИВНОГО ПЛАЗМОВО-ДУГОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ

В.М. Коржик<sup>1</sup>, А.А. Гринюк<sup>2</sup>, О.А. Бабич<sup>2</sup>, О.М. Берднікова<sup>1</sup>, Є.В. Ілляшенко<sup>1</sup>, О.І. Бушма<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>Чжецзянський науково-дослідний інститут зварювальних технологій, КНР.

Експериментально підтверджена можливість 3D друку методом адитивного плазово-дугового наплавлення об'ємних виробів із композиційних функціонально-градієнтних металоматричних матеріалів, в яких матрицею є титановий сплав Ti-6Al-4V, а армуючою фазою – карбід вольфраму. Технологія адитивного плазово-дугового наплавлення з одночасним подаванням у плазову дугу порошку або присаджувального дроту титанового сплаву Ti6Al4V Grade 5 та сферичного порошку WC дозволяє отримувати об'ємні зразки із функціонально-градієнтних металоматричних матеріалів типу «стінка», в яких вміст карбиду вольфраму за їх висотою змінюється від 0 до 50 об. % із відповідною зміною показника твердості від HRC 32 для нижніх (глибинних) шарів і до HRC 56...66 і вище в напрямку до поверхневих шарів. Шляхом вибору режимів плазового наплення та погонної енергії можна змінювати твердість, мікроструктуру та мікротвердість матриці матеріалу наплавлених шарів, у тому числі ступінь розплавлення частинок сферичного порошку WC, а саме – зберігати їх сферичну форму із мікротвердістю  $HV_{0,1} = 2172...3796$  або досягати їх часткового та повного розплавлення. У випадку збереження сферичної форми частинок WC, які знаходяться в матриці із титанового сплаву Ti-6Al-4V, характерною є наявність металургійного зв'язку їх із цією матрицею. Встановлено, що границя міцності отриманих матеріалів для випадку адитивного наплавлення присадним дротом Ti-6Al-4V з добавкою порошку WC до 50 об. %, досягає показника  $\sigma_b = 666,8$  МПа, що відповідає 75 % границі міцності ідентичного за хімічним складом сплаву Ti6Al4V Grade 5 (лист відпалений), який виступає в якості матриці досліджуваного композиційного матеріалу. Значення ударної в'язкості зразків з'єднань типу «стінка» з наплавленими шарами композиційного матеріалу «сплав Ti6Al4V Grade 5 + порошок WC» досягає до 70...80 % рівня цього показника листового титанового сплаву Ti-6Al-4V Grade 5. Бібліогр. 36, табл. 2, рис. 8.

*Ключові слова:* 3D друк, адитивне плазово-дугове наплавлення, титанові сплави, карбід вольфраму, функціонально-градієнтні матеріали, структура, механічні властивості

**Вступ.** У сучасному адитивному виробництві для отримання готового металевого виробу переважно використовують два основні підходи [1–18]: пошарове селективне плавлення порошку або пряме пошарове вирощування стінки деталі із матеріалу у вигляді порошку або дроту. Для процесів селективного плавлення порошку використовують енергію лазерного (SLM) або електронного променя (EBSM). Обидва ці процеси забезпечують формування деталей згідно із заданими в 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: обмежені розміри деталей; необхідність використання дрібнодисперсних порошоків (переважно 20...63, 20...105 мкм) з високим коефіцієнтом сферичності форми; необхідність використання в рази більшу кількість порошку, ніж об'єм готової деталі; при вирощуванні деталі з градієнтними відмінностями механічних властивостей при поступовому використанні порошоків різного хімічного складу відбувається їх змішування поза зоною сплавлення, що зумовлює

необхідність відбракування порошку, який лишається в установці після завершення друку.

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, в які входять дугові процеси із використанням неплавкого та плавкого електрода, а також процеси із коротким замиканням дугового проміжку (типу CMT – Cold Metal Transfer) [19, 20]. Особлива увага приділяється процесу Plasma Metal Deposition (PMD) або адитивному плазово-дуговому наплавленню (АПДН), який використовує енергію плазової дуги та має значний потенціал, як з точки зору реалізації широких технологічних можливостей, так і отримання нових матеріалів у процесі 3D друку [20].

Потрібно зазначити такі переваги та ширші технологічні можливості PMD перед методами WAAM [20]:

– широке регулювання продуктивності 3D друку (0,02...25 кг/год) та ступеня деталізації об'єм-

Коржик В.М. – <https://orcid.org/0000-0001-9106-8593>, Гринюк А.А. – <https://orcid.org/0000-0002-6088-7980>, Бабич О.А. – <https://orcid.org/0000-0001-5633-5721>, Берднікова О.М. – <https://orcid.org/0000-0001-9754-9478>, Ілляшенко Є.В. – <https://orcid.org/0000-0001-9876-0320>, Бушма О.І. – <https://orcid.org/0009-0005-6611-4507>

© В.М. Коржик, А.А. Гринюк, О.А. Бабич, О.М. Берднікова, Є.В. Ілляшенко, О.І. Бушма, 2025

них елементів (завширшки від 2,0...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 (у залежності від потужності джерела живлення зварювального струму установки плазмового наплавлення);

– великий діапазон регулювання погонної енергії, зони нагріву та глибини проплавлення попередніх наплавлених шарів шляхом АПДН із 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 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, порошків легких сплавів і тугоплавких металів, композиційних порошків і механічних сумішей порошків 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), що 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.

**Метою роботи** є підтвердження можливості процесу адитивного плазмово-дугового наплавлення для отримання в процесі 3D друку просторових виробів із функціонально-градієнтних металоматричних матеріалів, в яких у металевій матриці містяться армуючі зерна тугоплавких сполук (карбідів, боридів тощо) змінного складу.

Для досягнення цієї мети необхідно:

– шляхом адитивного плазмово-дугового наплавлення з одночасним подаванням у плазмову дугу порошку або присаджувального дроту титанового сплаву Ti-6Al-4V Grade 5 та сферичного порошку WC отримати композиційні функціонально-градієнтні матеріали, в яких матрицею є титановий сплав Ti-6Al-4V, а армувальною фазою зі змінним вмістом – карбід вольфраму;

– дослідити структуру отриманих композиційних матеріалів і можливість управління ступенем

розплавлення сферичних частинок порошку карбіду вольфраму в матриці із титанового сплаву;

– визначити основні фізико-механічні властивості отриманих композиційних матеріалів «Ti-6Al-4V + WC» у порівнянні з характеристиками матричного сплаву Ti-6Al-4V.

**Матеріали та методики досліджень.** Експерименти виконували на обладнанні, розробленому в рамках співробітництва ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України та ТОВ «НВЦ «ПЛАЗЕР» (Україна) [20] (рис. 1, а, б). Для проведення досліджень отримували просторові вироби типу «стінка» розмірами від 8×4 до 8×50 мм із використанням спеціально розробленого універсального плазмотрона (рис. 1, в), який дозволяє реалізувати процес адитивного наплавлення при одночасній подачі одного та кількох порошків або при одночасній подачі порошку та присаджувального дроту [20–23]. Досліджували можливість отримання композиційного об'ємного функціонально-градієнтного матеріалу «сплав Ti-6Al-4V Grade 5 + порошок WC» шляхом реалізації наступних технологій адитивного плазмово-дугового наплавлення: шляхом одночасної подачі різнорідних порошків із двох порошкових дозаторів; шляхом подавання механічної суміші порошків з одного живильника; шляхом одночасного подавання дроту титанового сплаву та порошку карбіду вольфраму.

На першому етапі досліджень виконували плазмове наплавлення із використанням суміші порошків Ti6-Al-4V та WC. З-за різної густини порошків механічна суміш починала сепаруватися на окремі компоненти в бункері живильника подавання порошку, при цьому важко було прогнозувати наявність тієї чи іншої кількості порошку WC у наплавці.

З метою підвищення стабільності надходження порошку WC у наплавлений метал було прийнято рішення або подавати порошки WC та Ti-6Al-4V окремо з різних живильників, або подавати WC у вигляді порошку, а сплав Ti6Al4V – у вигляді дроту. Враховуючи те, що коефіцієнт використання матеріалу у вигляді дроту буде вищий, ніж такий коефіцієнт у порошку, було вирішено подавати сплав Ti6Al4V у вигляді дроту. Використовували дріт титанового сплаву Ti6Al4V діаметром 1,2 мм, а розмір частинок порошку сферичної форми карбіду вольфраму складав 50...150 мкм. Зразки типу «стінка» вирощували в процесі 3D друку на підкладці зі сплаву Ti6Al4V Grade 5 завтовшки 8 мм. Наплавлення виконували на торець зразка завширшки 8 мм і завдовжки 60 мм.

Структурні характеристики отриманих матеріалів досліджували із застосуванням комплексних методів, що включають вимірювання твердості, мікротвердості, металографічні дослідження

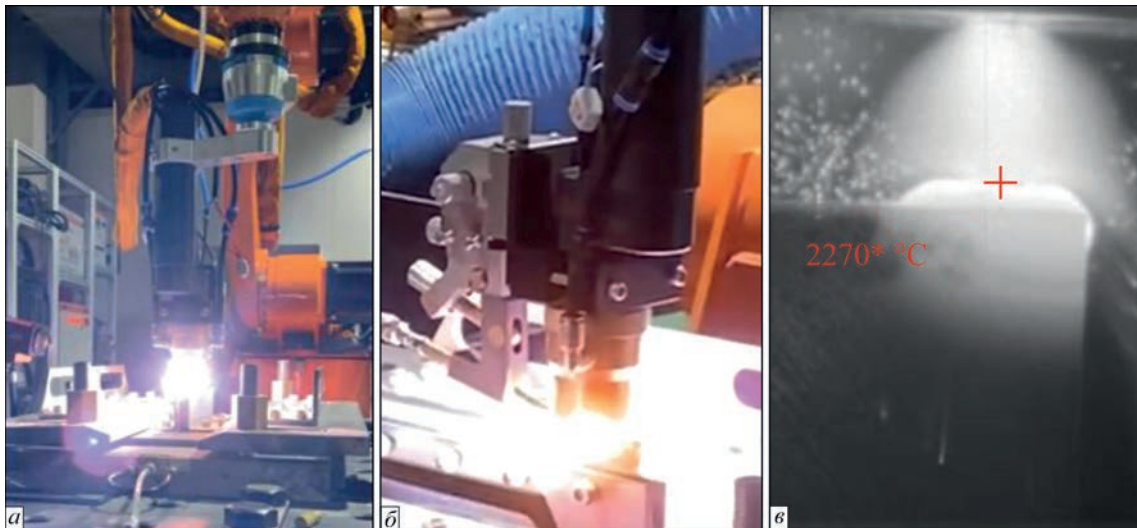


Рис. 1. Роботизований комплекс (а) і плазмотрон (б), за допомогою якого отримували об'ємні зразки типу «стінка», та процес плазово-дугового наплавлення (в) одиночного шару завтовшки 2 мм при формуванні «стінки» із композиційного матеріалу з одночасною подачею дроту Ti-6Al-4V і сферичного порошку WC

структури, рентгеноструктурний фазовий аналіз та аналіз хімічного складу, використовуючи методику, описану в [24–29]. Твердість за Роквеллом (*HRC*) вимірювали на приладі Laizhou Weiyi HRS-150S, мікротвердість за Віккерсом (*HV*) – на приладі VH1102 (США) при навантаженні 100 г. Дослідження мікроструктури матеріалів проводили із застосуванням світлового мікроскопа Zeiss Axio Imager M2m, растрового електронного мікроскопа SEM-515 (фірми Philips, Нідерланди).

Для визначення міцності наплавленого металу на розрив було виконано зварювання листів завтовшки 4 мм зі сплаву Ti6Al4V на підкладці зі сплаву Ti6Al4V. Листи завтовшки 4 мм збирались із гарантованим зазором 4 мм (рис. 2, а) з метою формування зварного шва переважно із присадного матеріалу, а саме з дроту із титанового дроту Ti6Al4V і порошку WC. При цьому швидкість подавання титанового дроту залишалася незмінною, а змінювалось кількість порошку WC з метою його вмісту в шві у кількості 30 та 50 % від загального об'єму шва. Механічні випробування на міцність на розрив і на відносно видовження досліджуваних зразків з наплавленнями проводили на електронному універсальному приладі Instron-5988. Розмір зразків для випробувань згідно зі стандартом 12,5×3,22×128,5 мм, місце розриву всіх зразків – наплавлений матеріал. Зразки для випробувань вирізали електроіскровим різанням у вигляді «лопаток» (рис. 2, а) з титаном на краях і смужкою наплавленого матеріалу посередині з наплавленого матеріалу в зазор між двох титанових пластин (рис. 2, б). Це дозволило отримати дані щодо композиційних об'ємних зразків «сплав Ti6Al4V Grade 5 + наплавлений шар + сплав Ti6Al4V Grade 5».

Випробування зразків із отриманих матеріалів на ударну в'язкість проводили на приладі

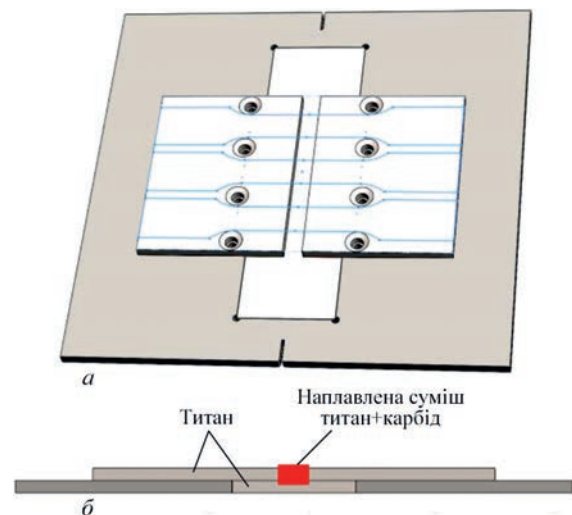


Рис. 2. Схеми розташування зразків при виконанні зварювання листів завтовшки 4 мм з метою визначення міцності металу шва на розрив

Steel Research Nake NI300C за методологією, описаною в [29–32]. Розмір зразків для випробувань 10,0×10,0×55,0 мм. З метою вимірювання ударної в'язкості зразків з наплавленнями з урахуванням зони сплавлення наплавленого матеріалу з основою випробування проводили за двома варіантами схем – із застосуванням «фронтального удару» (рис. 3, а) та «бокового удару» (рис. 3, б) з надрізом завглибшки 2 мм. Зразки для випробувань вирізали заввишки 10 мм, з яких 5 мм – підкладка і 5 мм – наплавлений шар. Це дозволило отримати дані щодо двошарових зразків «підкладка + наплавлений шар», а саме композиційного матеріалу «сплав Ti6Al4V Grade 5 + наплавлений шар».

**Результати досліджень.** Процес формування наплавленого одиночного шару завтовшки 2 мм при формуванні просторового виробу типу «стінка» з одночасною подачею дроту Ti-6Al-4V і карбиду вольфраму показано на рис. 1, в. Результати

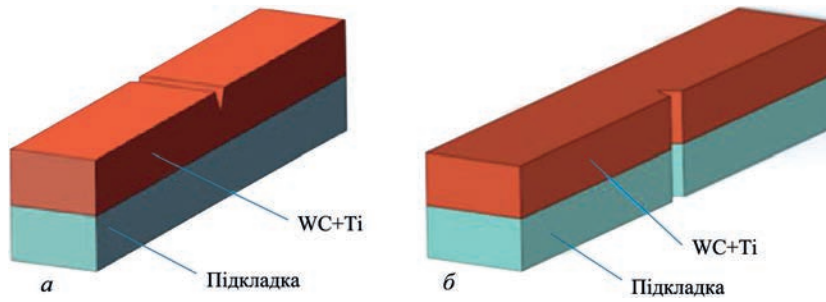


Рис. 3. Схематичні зображення варіантів випробувань на удару в'язкість зразків з наплавленнями: а – із застосуванням «фронтального удару»; б – із застосуванням «бокового удару»

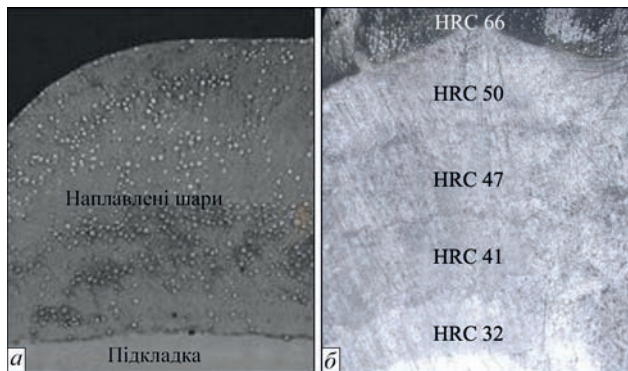


Рис. 4. Загальний вигляд зразків (а) і структура фрагменту зразка (б, ×10) типу «стінка» із функціонально-градієнтного матеріалу «Ti-6Al-4V + WC» зі змінним по висоті вмістом WC технологічних досліджень підтвердили можливість отримання об'ємних виробів із композиційних матеріалів «Ti-6Al-4V + WC» з регулюванням вмісту карбиду вольфраму (рис. 4, а).

Підтверджено, що розроблена технологія дозволяє отримувати об'ємний багатшаровий матеріал градієнтного типу та варіювати вміст карбиду вольфраму від 0 до 50 % і, відповідно, твердість по об'єму (висоті) від HRC 32 для нижніх (глибинних) шарів із титанового сплаву Ti-6Al-4V до HRC 56...66 і вище в напрямку до поверхневих шарів (рис. 4, б).

У матеріалі наплавлених шарів отриманих зразків пор та інших дефектів не виявлено. Лінії сплавлення наплавлених шарів однорідні (рис. 5, а). Лінія сплавлення з титановою підкладкою, на якій вирощували зразки типу «стінка», також однорідна (рис. 5, б). Для сферичних частинок WC з мікротвердістю  $HV_{0,1} = 2172...3796$ , які знаходяться в «матриці» із титанового сплаву Ti-6Al-4V, характерною є наявність металургійного зв'язку з матрицею при їх відносно рівномірному розподілі у матеріалі цієї матриці (рис. 5, в, з).

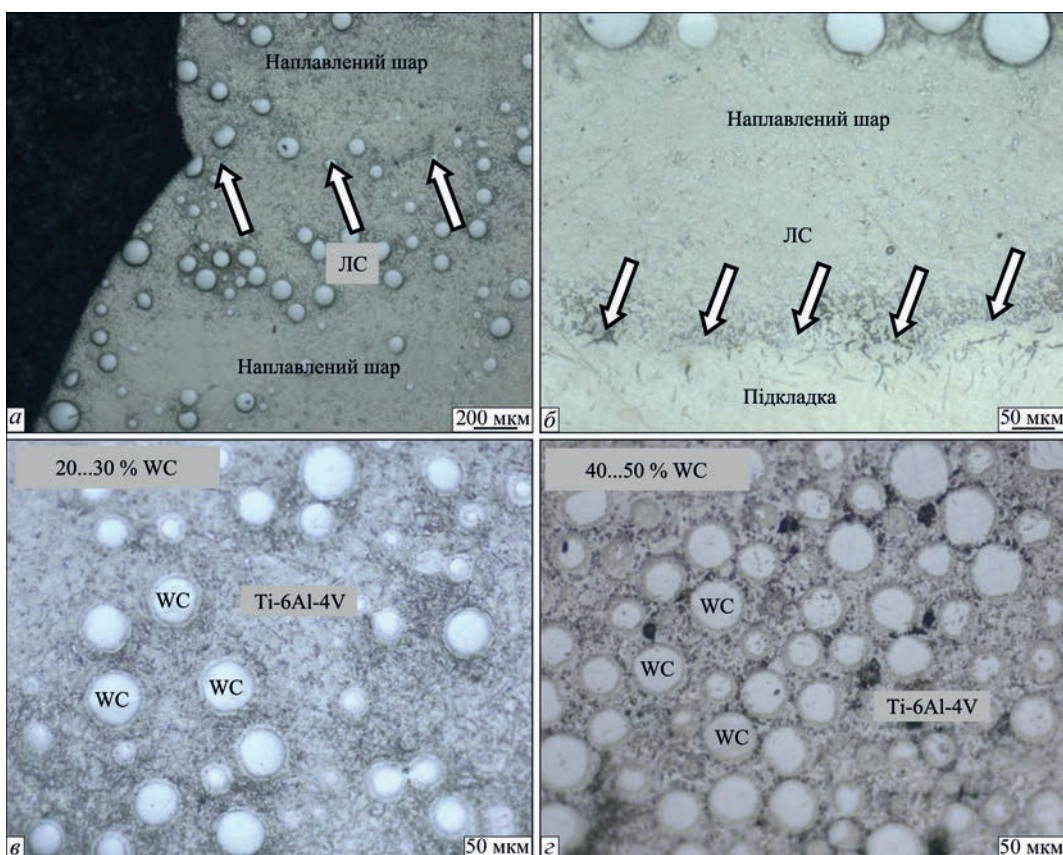


Рис. 5. Мікроструктура фрагментів наплавлених шарів зразка типу «стінка» із функціонально-градієнтного матеріалу «Ti-6Al-4V + WC»: а, б – лінії сплавлення (ЛС); в, з – наплавлені шари зі змінним по висоті вмістом WC (а ×50; б-з, ×200)

Шляхом вибору режимів плазмового напилення та погонної енергії можна змінювати твердість, мікроструктуру та мікротвердість матриці матеріалу наплавлених шарів, у тому числі ступінь розплавлення частинок сферичного порошку WC, а саме досягати їх часткового (рис. 6, а, б) або повного (рис. 6, в) розплавлення.

Так, наприклад, по границях частинка – WC/«матриця» у наплавлених шарах можна досягати часткового розплавлення карбідної фази (рис. 6, а, б). У даному випадку частинки WC вже втратили сферичну форму, навколо них спостерігається прошарок, збагачений вольфрамом і вуглецем, в якому формується нова структура зі складовою стехіометричного складу (W,Ti)C<sub>x</sub>. Деякі частинки WC майже розплавившись, але їх первинні границі частинка – WC/«матриця» ще спостерігаються (рис. 6, а). Деякі частинки розчинилися повністю. Їх структура відповідає структурі розплавлених прошарків по границях частинка – WC/«матриця» у наплавлених шарах (рис. 6, в).

Для детальнішого аналізу фізико-механічних властивостей отриманих матеріалів досліджено декілька типів зразків, отриманих адитивним наплавленням із використанням порошку або дроту сплаву Ti-6Al-4V з додаванням порошку WC у процесі адитивного наплавлення (табл. 1).

Детальний аналіз хімічного складу матеріалу наплавлення підтвердив розчин порошку WC (табл. 2, рис. 7, а, локальний аналіз №№ 1–6) в «матриці» Ti-6Al-4V та вміст W до 55 % (табл. 2, рис. 7, а, б, фрагменти №№ 7, 8). Можна припустити, що в об'ємі «матриці» наплавлених шарів

спостерігається формування саме дисперсних частинок карбідних фаз (рис. 7, б).

Рентгеноструктурним фазовим аналізом матеріалу наплавлених шарів виявлено наявність наступних фаз: (α + β) – Ti; WC та WC + W<sub>2</sub>C. Можна припустити, що утворення карбіду W<sub>2</sub>C призводить до додаткового зміцнення матеріалу «матриці» наплавлення.

У результаті механічних випробувань на розрив встановлено, що максимальні значення σ<sub>в</sub> = 641,8 МПа та σ<sub>в</sub> = 666,8 МПа характерні для зразків № 6 та № 4 (місце розриву – наплавлений матеріал), відповідно із вмістом WC до 30 та 50 %, отриманих адитивним наплавленням із використанням присадного дроту Ti-6Al-4V з додаванням порошку WC (див. табл. 1). Такі показники міцності композиційних об'ємних зразків «сплав Ti6Al4V Grade 5 + наплавлений шар + сплав Ti6Al4V Grade 5» відповідають 72...75 % границі міцності сплаву Ti6Al4V Grade 5 (лист відпалений), ідентичного за хімічним складом досліджуваному титановому сплаву, який виступає в якості матриці досліджуваного композиційного матеріалу [33–36]. У наплавлених шарах зразка № 4 об'ємна частка (V<sub>v</sub>) частинок WC у нижньому шарі складає 50 %. Мікроструктура верхнього шару наплавлення однорідна з мікротвердістю HV = 706,0...1055,8. У верхній зоні другого шару наплавлення частинки WC присутні у невеликій кількості. Мікротвердість нижнього шару складає HV = 479,4...859,0. Таким чином, при переході від нижнього шару до верхнього HV зростає в середньому на 30 %. Мікроструктурі наплавленого матеріалу двошарового зразка № 6 характерна об'ємна

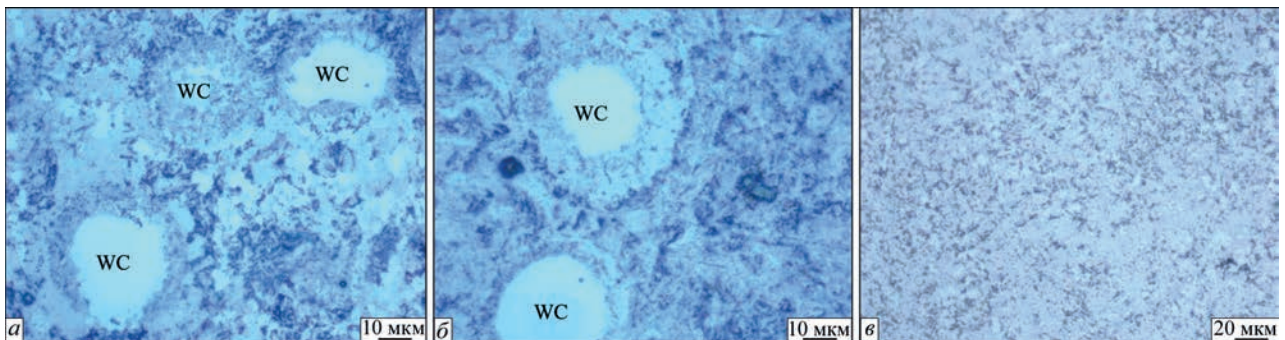


Рис. 6. Мікроструктура матеріалу наплавлень «Ti-6Al-4V + WC» (а, б, ×1000; в, ×500)

Таблиця 1. Механічні та структурні параметри наплавлених шарів

Номер	Тип наплавленого матеріалу	n	δ, мм	HRC	HV <sub>0,1</sub>		V <sub>v</sub> , %	σ <sub>в</sub> , МПа
					Нижній шар	Верхній шар		
1	Порошки Ti-6Al-4V + WC	2	3,1	61	317,2...346,5	373,3...468,7	30	586,4
2		2	3,6	58	348,4...360,2	377,3...380,0	25	605,4
3	Дріт Ti-6Al-4V + порошок WC	6	15	53	410,7...550,5	465,2...1187,4	40	611,4
4		2	8	66	479,4...859,0	706,0...1055,8	50	666,8
5		1	3,4	54,6	321,4...473,0	-	30	584,5
6		2	6,7	55,2	346,2...408,9	400,6...541,9	30	641,8

Примітки. n – кількість наплавлених шарів; δ – загальна товщина наплавлення; HRC – максимальна твердість з поверхні наплавлення; HV – мікротвердість у поперечному перерізі; V<sub>v</sub> – максимальний вміст частинок WC в матеріалі наплавлення; σ<sub>в</sub> – міцність на розрив.

Таблиця 2. Результати елементного аналізу (мас. %) матеріалу наплавлення зразка № 6 (дріт Ti-6Al-4V + порошок WC)

№	1	2	3	4	5	6	7	8
Ti	23,7...21,3	37,1...39,4	53,4...68,9	43,5...79,2	44,7...59,1	50,9...70,7	57,8...68,3	44,9...51,3
W	76,4...78,7	60,6...62,9	31,1...46,6	20,8...56,5	40,9...55,3	29,3...49,5	31,7...42,23	48,7...55,1

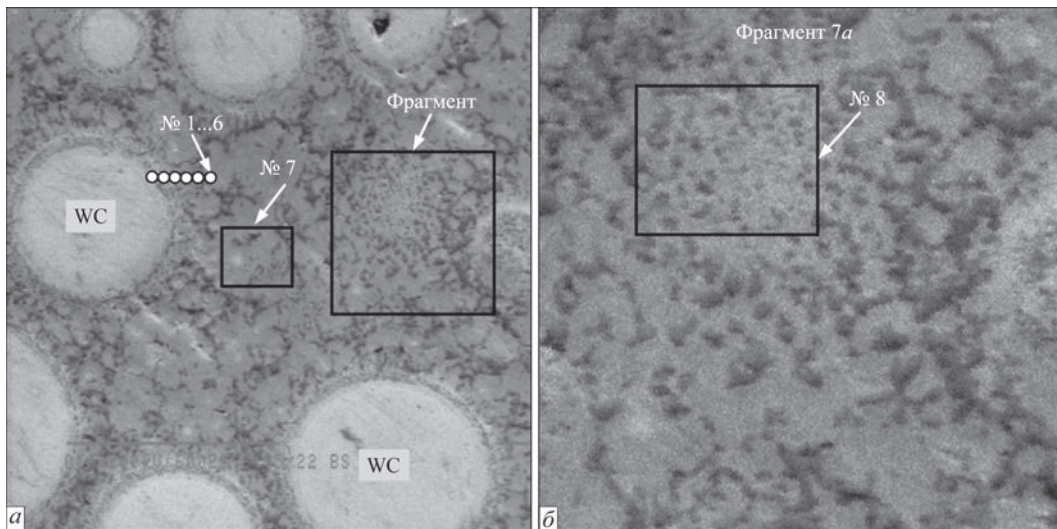


Рис. 7. Мікроструктура матеріалу наплавлення зразка № 6 (дріт Ti6Al4V + порошок WC), *a*×600; *б* – збільшення фрагменту рис. 7, *a* у 10 разів

частка частинок WC 30 % при рівномірному їх розподілі у першому та другому шарах та безградієнтному рівні мікротвердості (див. табл. 1).

У результаті випробувань на ударну в'язкість зразків з'єднань типу «стінка» з наплавленими шарами композиційного матеріалу «сплав Ti6Al4V Grade 5 + порошок WC» встановлено наступне. Для досліджуваних зразків із вмістом частинок карбиду вольфраму у «матриці» матеріалу наплавлення з об'ємною часткою  $V_v = 30\%$  цей показник складає 10,75...17,375 Дж/см<sup>2</sup>. При цьому значення ударної в'язкості сплаву Ti6Al4V Grade 5, який використовували в якості підкладки для вирощування стінки з матеріалу «Ti-6Al-4V + WC», знаходиться в інтервалі 19,5...21 Дж/см<sup>2</sup>. Таким чином, об'ємні зразки (заввишки 10 мм, з яких 5 мм – підкладка і

5 мм – наплавлений шар) із різних типів композиційного матеріалу «Ti-6Al-4V + WC», отриманого адитивним плазмовим наплавленням, характеризуються загальним рівнем ударної в'язкості, який може досягати до 70...80 % рівня цього показника листового титанового сплаву Ti6Al4V Grade 5.

Фрактографічними дослідженнями поверхні руйнування матеріалу наплавлення (дріт Ti6Al4V + порошок WC) встановлено наступне. Для нерозплавлених частинок WC характерним є крихке руйнування (рис. 8).

Характер руйнування матеріалу «матриці» наплавлення переважно змішаний квазікрихкий з розміром фасеток 3...8 мкм та в'язкою складовою з дисперсними ямками розміром 1...3 мкм. Такі структурні особливості характеру мікрорельєфу

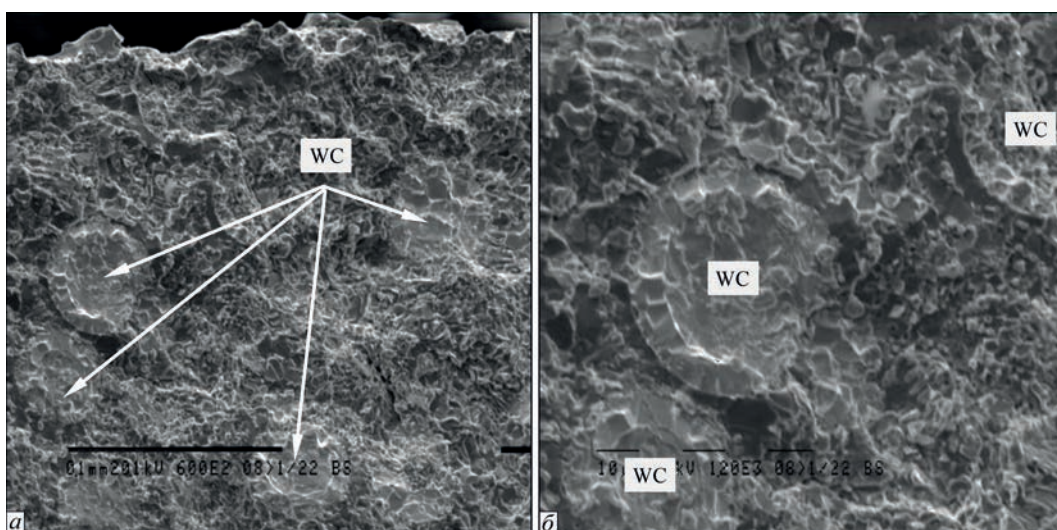


Рис. 8. Фрактограми поверхні руйнування матеріалу наплавлення зразка № 6 (дріт Ti6Al4V + порошок WC), *a*×600, *б*×1200

поверхні руйнування «матриці» наплавлення свідчать про високий комплекс властивостей міцності та в'язкості матеріалу наплавлень.

### Висновки

1. Підтверджено, що технологія плазово-дугового адитивного наплавлення з одночасним подаванням у плазову дугу порошку або присаджувального дроту титанового сплаву Ti-6Al-4V та сферичного порошку WC дозволяє отримувати об'ємні зразки із функціонально-градієнтних металоматричних матеріалів, в яких матрицею є титановий сплав з армуючою фазою WC. Технологія реалізує можливість змінювати по об'єму (висоті зразка) карбиду вольфраму від 0 до 50 об. %, відповідно змінювати твердість від HRC 32 для нижніх (глибинних) шарів і до HRC 56...66 і вище в напрямку до поверхневих шарів.

2. Отримані матеріали характеризуються бездефектною структурою, лінії сплавлення наплавлених шарів однорідні. Шляхом вибору режимів плазового наплення та погонної енергії можна змінювати твердість, мікроструктуру та мікротвердість матриці матеріалу наплавлених шарів, у тому числі ступінь розплавлення частинок сферичного порошку WC, а саме – зберігати їх сферичну форму із мікротвердістю  $HV_{0,1} = 2172...3796$  або досягати їх часткового та повного розплавлення. У випадку збереження сферичної форми частинок WC, які знаходяться в матриці із титанового сплаву Ti-6Al-4V, характерною є наявність металургійного зв'язку їх з цією матрицею.

3. Встановлено, що границя міцності отриманих матеріалів при випробуваннях композиційних зразків типу «сплав Ti6Al4V Grade 5 + наплавлений шар + сплав Ti6Al4V Grade 5» для випадку адитивного наплавлення присаджувальним дротом Ti-6Al-4V з добавкою порошку WC до 50 об. %, досягає показника  $\sigma_b = 641,8...666,8$  МПа (місце розриву – наплавлений матеріал). Це відповідає 72...75 % границі міцності ідентичного за хімічним складом сплаву Ti6Al4V Grade 5 (лист відпалений), що виступає в якості матриці наплавленого композиційного матеріалу. Значення ударної в'язкості зразків композиційного матеріалу «сплав Ti6Al4V Grade 5 + наплавлений шар» заввишки 10 мм, з яких 5 мм – підкладка і 5 мм – наплавлений шар, при об'ємній частці частинок WC 30 % у «матриці» матеріалу наплавлення досягає до 70...80 % рівня цього показника листового титанового сплаву Ti6Al4V Grade 5.

### Список літератури/References

1. Zafar, F., Emadinia, O., Conceição, J. et al. (2023) A review on direct laser deposition of Inconel 625 and Inconel 625-based composites. *Challenges and Prospects. Metals.*, **13**, 787. DOI: <https://doi.org/10.3390/met13040787>

2. Preis, J., Wang, Z., Howard, J. et al. (2024) Effect of laser power and deposition sequence on microstructure of GR-Cop42 – Inconel 625 joints fabricated using laser directed energy deposition. *Materials and Design*, **241**, 112944. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2024.112944>

3. Zhukov, V., Grigorenko, G., Shapovalov V. (2016) Additive manufacturing of metal components (Review). *The Paton Welding J.*, **5–6**, 137–142. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2016.06.24>

4. Su, G., Shi, Y., Li, G. et al. (2023) Improving the deposition efficiency and mechanical properties of additive manufactured Inconel 625 through hot wire laser metal deposition. *J. of Materials Processing Technology*, **322**, 118175. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2023.118175>

5. Danielewski, H., Radek, N., Orman, L. et al. (2023) Laser metal deposition of Inconel 625 alloy – comparison of powder and filler wire methods. *Materials Research Proceedings*, **34**, 154–160. DOI: <https://doi.org/10.21741/9781644902691-19>

6. Gu, Y., Xu, Y., Shi, Y. et al. (2022) Corrosion resistance of 316 stainless steel in a simulated pressurized water reactor improved by laser cladding with chromium. *Surface and Coatings Technology*, **441**, 128534. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128534>

7. Ahn, D. (2021) Directed energy deposition (DED) Process: State of the art. *Int. J. of Precis. Eng. and Manuf.-Green Tech.*, **8**, 703–742. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40684-020-00302-7>

8. Svetlizky, D., Das, M., Zheng, B. et al. (2021) Directed energy deposition (DED) additive manufacturing: Physical characteristics, defects, challenges and applications. *Materials Today*, **49**, 271–295. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2021.03.020>

9. King, W., Anderson, A., Ferencz, R. et al. (2015) Laser powder bed fusion additive manufacturing of metals; physics, computational, and materials challenges. *Applied Physics Reviews*, **2**, 041304. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4937809>

10. Hassila C., Paschalidou, M., Harlin, P. et al. (2022) Potential of nitrogen atomized alloy 625 in the powder bed fusion laser beam process. *Materials and Design*, **221**, 110928. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110928>

11. Rehman, A., Karakas, B., Mahmood, M. et al. (2023) Additive manufacturing of Inconel-625: from powder production to bulk samples printing. *Rapid Prototyping J.*, **9(23)**, 1788–1799. DOI: <https://doi.org/10.1108/RPJ-11-2022-0373>

12. Chen, G., Zhao S., Tan P. et al. (2018) A comparative study of Ti-6Al-4V powders for additive manufacturing by gas atomization, plasma rotating electrode process and plasma atomization. *Powder Technology*, **333**, 38–46. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.04.013>

13. Yurtukan, E., Unal, R. (2022) Theoretical and experimental investigation of Ti alloy powder production using low-power plasma torches. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, **32**, 175–191. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(21\)65786-2](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(21)65786-2)

14. Prokopov, V., Fialko, N., Sherenkovskaya, G. et al. (1993) Effect of the coating porosity on the processes of heat transfer under, gas-thermal atomization. *Powder Metall. Met. Ceram.*, **32**, 118–121. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00560034>

15. Yin, Z., Yu, D., Zhang, Q. et al. (2021) Experimental and numerical analysis of a reverse-polarity plasma torch for plasma atomization. *Plasma Chem Plasma Process.*, **41**, 1471–1495. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11090-021-10181-8>

16. Bobzin, K., Ernst, F., Richardt, K. et al. (2008) Thermal spraying of cylinder bores with the plasma transferred wire arc process. *Surface and Coatings Technology*, **202(18)**, 4438–4443. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2008.04.023>

17. Fan, H., Kovacevic, R. (2004) A unified model of transport phenomena in gas metal arc welding including electrode, arc plasma and molten pool. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **37**, 2531–2544. DOI: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/37/18/009>

18. Sun, P., Fang, Z., Zhang, Y., Xia, Y. (2017) Review of the methods for the production of spherical Ti and Ti alloy powder. *JOM*, **69**, 1853–1860. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11837-017-2513-5>

19. Korzyk, V., Khaskin, V., Grynyuk, A. et al. (2021) Comparing features in metallurgical interaction when applying different techniques of arc and plasma surfacing of steel wire on titanium. *Eastern-European J. of Enterprise Technologies*, **12(112)**, 6–17. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.238634>

20. Korzyk, V.M., Grynyuk, A.A., Khaskin, V.Yu. et al. (2023) Plasma-arc technologies of additive surfacing (3D printing) of spatial metal products: application experience and new op-

- opportunities. *The Paton Welding J.*, **11**, 3–20. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2023.11.01>
21. Korzhik, V. (1992) Theoretical analysis of the conditions required for rendering metallic alloys amorphous during gas-thermal spraying. III. Transformations in the amorphous layer during the growth process of the coating. *Powder Metall. Met. Ceram.*, **31(11)**, 943–948. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00797621>
  22. Fialko, N., Prokopov, V., Meranova, N. et al. (1993) Thermal physics of gas thermal coatings formation processes. State of investigations. *Fizika i Khimiya Obrabotki Materialov*, **4**, 83–93 [in Russian].
  23. Fialko, N., Prokopov, V., Meranova, N. et al. (1994) Temperature conditions of particle-substrate systems in a gas thermal deposition process. *Fizika i Khimiya Obrabotki Materialov*, **2**, 59–67 [in Russian].
  24. Jing, H., Yu, Shi, Gang, Zh. et al. (2022) Minimizing defects and controlling the morphology of laser welded aluminum alloys using power modulation-based laser beam oscillation. *J. Manufacturing Processes*, **83**, 49–59. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.08.031>
  25. Fialko, N., Dinzhos, R., Sherenkovskii, J. (2021) Establishing patterns in the effect of temperature regime when manufacturing nanocomposites on their heat-conducting properties. *Eastern-European J. of Enterprise Technologies*, **4(5(112))**, 21–26. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.236915>
  26. Li, X., Cui, L., Shonkwiler, S. et al. (2023) Automatic characterization of spherical metal powders by microscope image analysis: a parallel computing approach. *J. Iron Steel Res.*, **30**, 2293–2300. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42243-022-00907-z>
  27. Appa Rao, G., Srinivas, M., Sarma, D. (2006) Effect of oxygen content of powder on microstructure and mechanical properties of hot isotatically pressed superalloy Inconel 718. *Materials Science and Engineering A*, **435(3)**, 84–99. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.07.053>
  28. Liu, Y., Zhang, S., Zhang, L. et al. (2024) Effects of oxygen content on microstructure and creep property of powder metallurgy superalloy. *Crystals*, **14(4)**, 358. DOI: <https://doi.org/10.3390/cryst14040358>
  29. Kvasnytskyi, V., Korzhyk, V., Kvasnytskyi, V. et al. (2020) Designing brazing filler metal for heat-resistant alloys based on Ni3Al intermetallic. *Eastern-European J. of Enterprise Technologies*, **6(12(108))**, 6–19. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.217819>
  30. Skorokhod, A., Sviridova, I., Korzhik, V. (1994) Structural and mechanical properties of polyethylene terephthalate coatings as affected by mechanical pretreatment of powder in the course of preparation. *Mekhanika Kompozitnykh Materialov*, **30(4)**, 455–463 [in Russian].
  31. Gu, Y., Zhang, W., Xu, Y. et al. (2022) Stress-assisted corrosion behaviour of Hastelloy N in FLiNaK molten salt environment. *Npj Mater. Degrad.*, **6**, 90. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41529-022-00300-x>
  32. Yongxian Huang (2024) Strength-ductility materials by engineering coherent interface at incoherent precipitates. *Materials Horizons*, **11(14)**, 3408–3419. DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3436553/v1>
  33. Ren, X.P., Li, H.Q., Guo, H. et al. (2021) A comparative study on mechanical properties of Ti–6Al–4V alloy processed by additive manufacturing vs. traditional processing. *Materials Science and Engineering: A*, **817**, 141384. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141384>
  34. Mulay, R.P., Moore, J.A., Florando, J.N. et al. (2016) Microstructure and mechanical properties of Ti–6Al–4V: mill-annealed versus direct metal laser melted alloys. *Materials Science and Engineering*, **666**, 43–47. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.04.012>
  35. Gargi Roya, Raj Narayan Hajraa, Woo Hyeok Kima et al. (2024) Microstructural evolution and mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy through selective laser melting: comprehensive study on the effect of hot isostatic pressing (HIP). *J. of Powder Materials*, **31(1)**, 1–7. DOI: <https://doi.org/10.4150/KPMI.2024.31.1.1>
  36. Gupta, R.K., Anil Kumar, V., Mathew, C., Sudarshan Rao, G. (2016) Strain hardening of titanium alloy Ti6Al4V sheets with prior heat treatment and cold working. *Materials Science and Engineering*, **662**, 537–550. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.03.094>

## OBTAINING FUNCTIONALLY-GRADED METAL-MATRIX MATERIALS Ti–6Al–4V + WC BY THE METHOD OF ADDITIVE PLASMA-ARC DEPOSITION

V.M. Korzhyk<sup>1</sup>, A.A. Grynyuk<sup>2</sup>, O.A. Babych<sup>2</sup>, O.M. Berdnikova<sup>1</sup>, Ye.V. Illiashenko<sup>1</sup>, O.I. Bushma<sup>1</sup>

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

E-mail: [omberdnikova@gmail.com](mailto:omberdnikova@gmail.com)

<sup>2</sup>Scientific-Research Institute of Welding Technologies in Zhenjiang Province. 233 Yonghui Road, Xiaoshan District, Hangzhou City, Zhejiang Province, China

The possibility of 3D printing by additive plasma-arc surfacing of three-dimensional products from composite functionally-graded metal-matrix materials, in which the matrix is the titanium alloy Ti–6Al–4V and the reinforcing phase is tungsten carbide, has been experimentally confirmed. The technology of additive plasma-arc deposition with simultaneous feeding of powder or filler wire of titanium alloy Ti–6Al–4V Grade 5 and spherical WC powder into the plasma arc allows obtaining three-dimensional samples from functionally-graded metal-matrix materials of the «wall» type, in which the content of tungsten carbide along their height varies from 0 to 50 vol.% with a corresponding change in the hardness index from HRC 32 for the lower (deep) layers and up to HRC 56–66 and higher towards the surface layers. By selecting plasma spraying modes and energy input, it is possible to change the hardness, microstructure, and microhardness of the matrix of the material of the deposited layers, including the degree of melting of spherical WC powder particles, namely, to preserve their spherical shape with a microhardness of  $HV0.1 = 2172\text{--}3796$  or to achieve their partial and complete melting. In the case of preserving the spherical shape of WC particles in a matrix of titanium alloy Ti–6Al–4V, the presence of a metallurgical bond between them and this matrix is characteristic. It has been established that the tensile strength of the obtained materials for the case of additive deposition with Ti–6Al–4V filler wire with the addition of WC powder up to 50 vol.% reaches  $\sigma_t = 666.8$  MPa, which corresponds to 75 % of the tensile strength of the Ti–6Al–4VBT6 Grade 5 alloy of identical chemical composition (annealed sheet), which acts as the matrix of the studied composite material. The impact strength of the samples of wall-type joints with welded layers of the composite material Ti–6Al–4V Grade 5 alloy + WC powder reaches up to 70–80 % of the level of this parameter of the Ti–6Al–4V Grade 5 titanium alloy sheet. 36 Ref., 2 Tabl., 8 Fig.

*Keywords:* 3D printing, additive plasma-arc deposition, titanium alloys, tungsten carbide, functionally-graded materials, structure, mechanical properties

Отримано 12.05.2025

Отримано у переглянутому вигляді 27.08.2025

Прийнято 30.09.2025