

МІКРОСТРУКТУРА ЗРАЗКІВ ТИТАНОВОГО СПЛАВУ МАРКИ Ti6Al4V, ОТРИМАНИХ МЕТОДОМ ПОШАРОВОГО ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОГО НАПЛАВЛЕННЯ ДРОТОМ

В.М. Нестеренков, М.О. Русиник, О.М. Берднікова, В.А. Матвійчук, В.Р. Страшко

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Методом електронно-променевого наплавлення отримані зразки виробів різної форми з використанням дроту титанового сплаву Ti6Al4V. Дефектів в наплавлених шарах не виявлено. У процесі роботи проводилися дослідження мікроструктури, фазового складу та мікротвердості зразків. Для наплавленого металу характерна структура, що складається переважно з пластинчасто-голчастої α' -фази. Структура містить незначну кількість β -фази, яка залягає у вигляді тонких прошарків між голчастими виділеннями α' -фази і не виявлена оптичним мікроскопом, а виявляється методами електронної мікроскопії та рентгенівськими дослідженнями. Мікроструктура наплавленого металу переважно рівносна та зерниста, градієнтна за розмірами та за мікротвердістю. Мікротвердість біля межі зон відрізняється від мікротвердості матриці зерна, що, можливо, пов'язано з різницею за вмістом легуючих елементів. У напрямку до верхівки побудованого зразка твердість незначно зменшується. Бібліогр. 8, табл. 1, рис. 9.

Ключові слова: адитивні технології, електронно-променева гармата, електронно-променеве наплавлення, сплав титану, металографія, мікроструктура, мікротвердість

На теперішній час одним з перспективних напрямків, які швидко розвиваються в промисловому виробництві, є адитивні технології. Ринок адитивних технологій складається з виробництва обладнання та його обслуговування, розробки програмного забезпечення, моделей майбутніх деталей та створенні продукції по кресленнях замовника.

До адитивного обладнання відносяться програмні та апаратні машини, які виконують різні завдання і функції. Загальним залишається виготовлення виробів за цифровою моделлю, методом пошарового нанесення витратного матеріалу [1].

Найбільш широкого розповсюдження набули лазерні адитивні технології. Однак для створення великих, матеріаломістких виробів типу корпусів потрібна збільшена продуктивність пошарового наплавлення. У цьому випадку найбільш доцільно використовувати енергію електронного променя, яка фокусується і подається безпосередньо в зону сплаву електронно-оптичною системою електронно-променевої гармати (ЕПГ).

Особливо актуальним є використання електронно-променевих адитивних технологій в авіа- та турбінобудуванні, де застосовуються легкі, хімічно активні матеріали на основі алюмінію та титану. Процес відбувається у вакуумному середовищі, що дозволяє наплавити деталь без додаткових захисних газів, зберігаючи при цьому чистоту вихідного матеріалу.

У даній роботі матеріалом для дослідження був титановий сплав Ti6Al4V, отриманий методом електронно-променевого наплавлення.

Титанові сплави є одними з основних конструкційних матеріалів, що застосовуються в даний час в різних галузях промисловості.

Сплав Ti6Al4V поширений серед титанових сплавів, який широко використовується в аерокосмічній та медичній сферах. Саме в цих галузях стоїть завдання швидкого і простого створення великого спектру номенклатурних виробів зі сплаву Ti6Al4V [2, 3].

Метою роботи було вивчення мікроструктур та мікротвердості зразків, отриманих зі сплаву Ti6Al4V, виготовлених пошаровим вирощуванням за допомогою електронно-променевої адитивної технології із застосуванням присадного дроту.

Для досягнення даної мети в роботі були поставлені наступні завдання:

- отримання зразків, наплавлених у вакуумі з використанням дроту марки Ti6Al4V;
- дослідження мікроструктури наплавлених зразків;
- вимірювання мікротвердості зразків.

Електронно-променеве наплавлення з використанням металевго дроту. Технологія наплавлення полягає в пошаровому нанесенні металу з використанням дроту, який розплавляють, використовуючи ЕПГ, до отримання заготовки, максимально наближеної за геометричними розмірами до кінцевого виробу. Перевагою технології є продуктивність виробництва, що складає до 12 кг/год. Технологія дозволяє отримувати великорозмірні металеві вироби, у тому числі з тугоплавких і жа-

В.М. Нестеренков – <http://orcid.org/0000-0002-7973-1986>, М.О. Русиник – <https://orcid.org/0000-0002-7591-7169>, О.М. Берднікова – <http://orcid.org/0000-0001-9754-9478>, В.А. Матвійчук – <https://orcid.org/0000-0002-9304-6862>, В.Р. Страшко – <https://orcid.org/0000-0001-6852-3551>

© В.М. Нестеренков, М.О. Русиник, О.М. Берднікова, В.А. Матвійчук, В.Р. Страшко, 2020

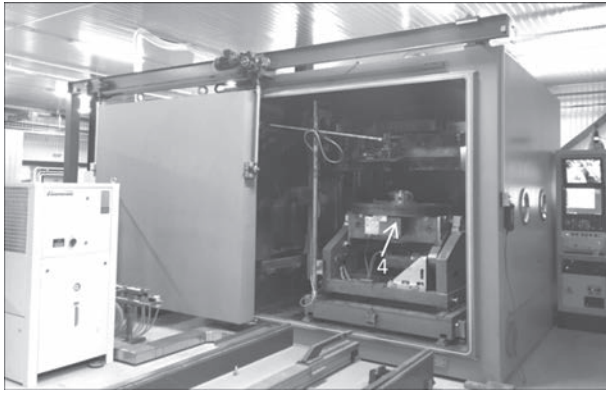


Рис. 1. Електронно-променева установка KL-197 з механізмом подачі дроту для наплавлення

ромісних сплавів, з високою щільністю та однорідністю [4].

Повторюваність результатів технології електронно-променевого наплавлення у сукупності з гнучкістю управління технологічним процесом дозволяє формувати деталі з необхідною структурою і заданими властивостями. Під час процесу наплавлення електронний промінь створює на поверхні деталі ванну розплавленого металу. Деталь, що наплавляється, переміщується відносно нерухомої ЕПГ та механізму подачі присадного дроту за координатами $X-X$, $Y-Y$, в горизонтальній площині, або електронна гармата з пристроєм подачі дроту переміщуються відносно нерухомої основи за координатами $X-X$, $Y-Y$, $Z-Z$ [5, 6].

Для виготовлення зразків виробів застосовували дріт діаметром 2 мм із титанового сплаву марки Ti6Al4V виробництва підприємства Sino-Euro Materials Technologies of Xian Co., LTD, Китай. Наплавлення велося на промисловому устаткуванні для електронно-променевого зварювання KL-197, яке оснащено механізмом переміщення та подачі дроту (рис. 1, 2).

Для досліджень були наплавлені зразки лінійної та циліндричної форми.

Процес електронно-променевого наплавлення відбувається у вакуумній камері (рис. 1). Дріт з котушки подається електричним двигуном з редуктором крізь направляючий канал 1 та мундштук 2 у зону наплавлення (рис. 2). У процесі наплавлення змінними параметрами є, швидкість подачі дроту та струм пучка. Наплавлення відбувається пошарово, після кожного проходу маніпулятор разом з ЕПГ піднімається на задану величину по координаті $Z-Z$, у вертикальній площині. Так, циліндричний зразок був отриманий шляхом обертання поверхні, що наплавляється, 3 за допомогою вертикального обертача 4 (рис. 2, а) відносно ЕПГ 5. Лінійний зразок отриманий шляхом переміщення ЕПГ 5 з маніпулятором подачі дроту відносно жорстко закріпленої пластини 6 (рис. 2, б).

Таким чином, були отримані зразки: циліндричний – діаметром 70 мм, висотою 30 мм, з товщиною стінки 9...10 мм. Та лінійний – довжиною 100 мм, висотою 40 мм з товщиною стінки 7...8 мм.

Металографічні дослідження. Хімічний склад дроту сплаву Ti6Al4V наведено у таблиці.

Аналіз поперечних шліфів показує отримання щільної литої структури наплавленого металу.

Для виявлення мікроструктури поліровані зрізи наплавлених зразків були протравлені у спеціальному реактиві для травлення титану та його сплавів наступного складу:

- плавикова кислота – 1 частина;
- азотна кислота – 1 частина;
- вода – 1 частина.

Хімічний склад дроту Ti6Al4V, мас. %

| V | Al | Fe | N | O | H | C |
|-----------|------------|-----|------|-----|--------|------|
| 3,5...4,5 | 5,5...6,75 | 0,4 | 0,05 | 0,2 | ≤0,015 | 0,08 |

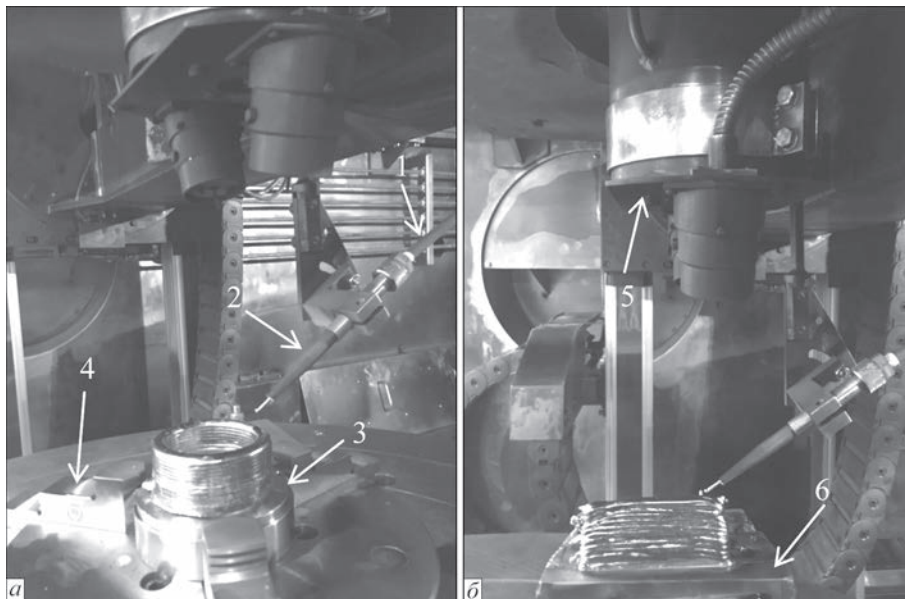


Рис. 2. Зразки, що наплавлені за електронно-променевою технологією: а – циліндричний; б – лінійний (опис 1–6 див. у тексті)

Металографічні дослідження проводили на мікроскопі «Neophot-32» при різних збільшеннях. Цифрові зображення мікроструктур отримані за допомогою фотокамери «Olympus». Твердість по Вікерсу досліджуваного металу вимірювали на мікротвердометрі М-400 фірми «Лесо» при навантаженнях 1,0 кг ($HV10$) по всій висоті шліфів з кроком 500 мкм та 0,1 кг ($HV1$) для детальних досліджень структури.

Циліндричний зразок. Зразок складається з 14-ти шарів наплавленого металу (рис. 2, а). Металографічними дослідженнями наплавленого металу встановлено, що структура в основному складається з перекристалізованих зерен різних розмірів з різним ступенем травимості. У ділянках наплавленого металу мікрodefektів не виявлено.

У нижній частині зразка (рис. 3, шари 1-4,) зеренна структура має переважно рівноосний ха-

рактер, проте за розміром зерен структура градієнтна: D_3 (min) = 500...700 мкм; D_3 (max) = 1800...2000 мкм. На (рис. 4, а) показано змінювання у наплавлених шарах мінімальних і максимальних розмірів зерен (D_3) та довжини кристалітів ($L_{кр}$) по висоті зразка.

При цьому розподіл твердості має нерівномірний характер. Значення твердості ($HV10$) та її змінювання по всій висоті циліндричного зразка графічно наведені на (рис. 4, б).

При переході до наступних шарів спостерігається формування великих кристалітів по всій висоті зразка і незначне зменшення твердості при її відносно рівномірному розподілі і характерних значеннях $HV10$ – 2750...2820 МПа (рис. 4, б). Встановлено, що в перекристалізованих ділянках наплавленого металу твердість знаходиться в межах від $HV10$ – 2600 до $HV10$ – 3130 МПа (рис. 5).

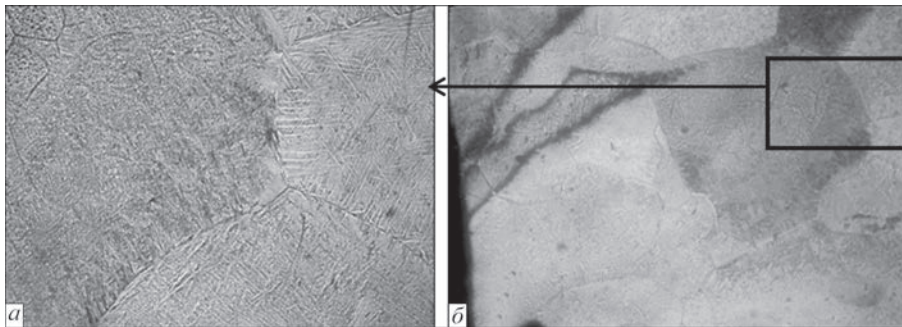


Рис. 3. Мікроструктура металу у нижній зоні зразка: а, б – фрагменти мікроструктури: а – $\times 100$; б – $\times 25$
Наплавлені шари (1–14)

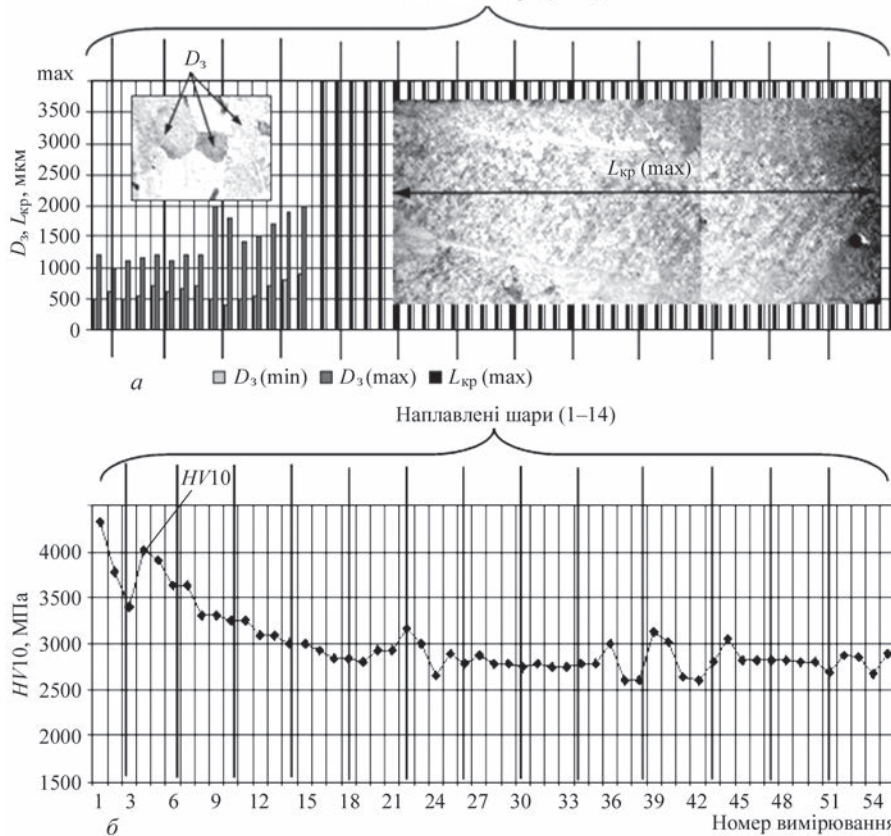


Рис. 4. Зміна структурних параметрів у наплавлених шарах: а – величини зерна D_3 ; б – твердості $HV10$

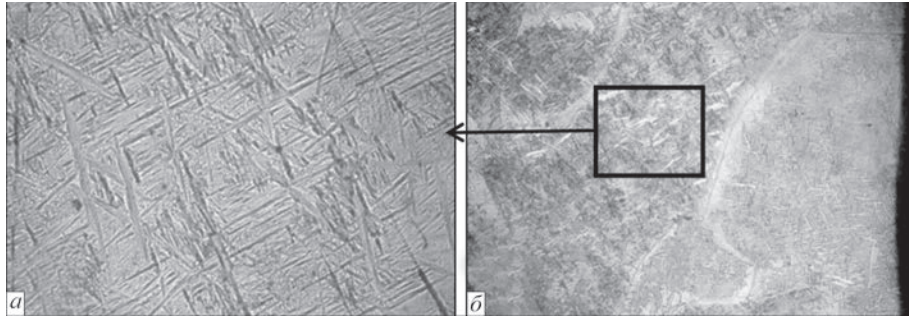


Рис. 5. Мікроструктура металу у середній частині зразка: *a, б* – фрагменти мікроструктури: *a* – $\times 100$; *б* – $\times 25$

При більш детальному дослідженні структури (при збільшенні $\times 100$) встановлено, що для наплавленого металу характерна структура, що складається переважно з пластинчасто-голчастої α' -фази (рис. 5, б).

В пограничних зонах α' -фази, шавлення якої слабше, ніж матриця зерна, твердість складає $HV1 - 2870 \dots 3660$ МПа. Мікротвердість на межі зон відрізняється від мікротвердості матриці зерна, що, можливо, пов'язано з різницею у складі легуючих елементів [4].

За даними [7] структура містить незначну кількість β -фази, яка залягає у вигляді тонких прошарків між голчастими виділеннями α' -фази і не виявлена оптичним мікроскопом, а визначається методами електронної мікроскопії та рентгенівськими дослідженнями.

По висоті зразка, при накладанні шарів наплавлення, в результаті термічної обробки, вплив від наплавлення наступного шару, структура являє собою великі кристаліти з однорідною пластинчасто-голчастою структурою α' -фази при мікротвердості $HV1 - 2830 \dots 3220$ МПа. Розміри і форма го-

лок та пластин залежать від чистоти та швидкості охолодження металу [8]. Для середніх шарів наплавленого металу характерне потовщення голчастої складової α' -фази (рис. 5). Відомо, що зі зменшенням швидкості охолодження голчасті виділення α' -фази товстішають [6].

Лінійний зразок. Наплавлення складається з 12 шарів (рис. 2, б). Дефектів структури не виявлено. Металографічними дослідженнями наплавленого металу встановлено, що структура, так само, як і в циліндричному зразку, складається з перекристалізованих зерен різних розмірів з різним ступенем травимості.

У нижній частині зразка (рис. 7, шари 1-8) зеренна структура має змішаний характер: відносно рівноосні зерна та зерна неправильної форми.

Величина зерна (D_3) в цій зоні становить близько $D_3 = 500 \dots 1600 \times 700 \dots 4000$ мкм (рис. 9). При цьому розподіл мікротвердості має відносно рівномірний характер. При переході в наступні шари (9-12) спостерігається формування великих кристалітів розміром до $h \times L_{кр} = 2000 \times 7000$ мкм (рис. 8, 9, а).

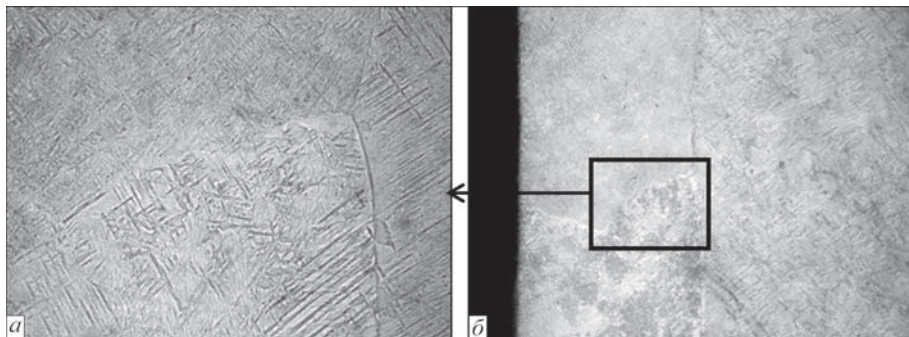


Рис. 6. Мікроструктура металу у верхній зоні зразка: *a, б* – фрагменти мікроструктури: *a* – $\times 100$; *б* – $\times 25$

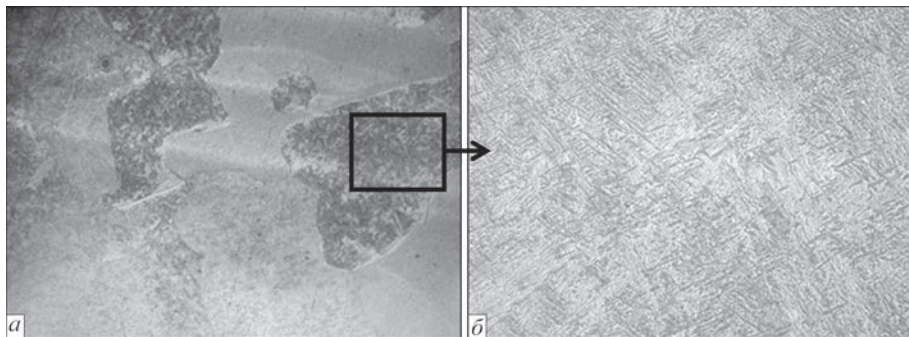


Рис. 7. Мікроструктура металу у нижній зоні лінійного зразка: *a, б* – фрагменти мікроструктури: *a* – $\times 25$; *б* – $\times 200$

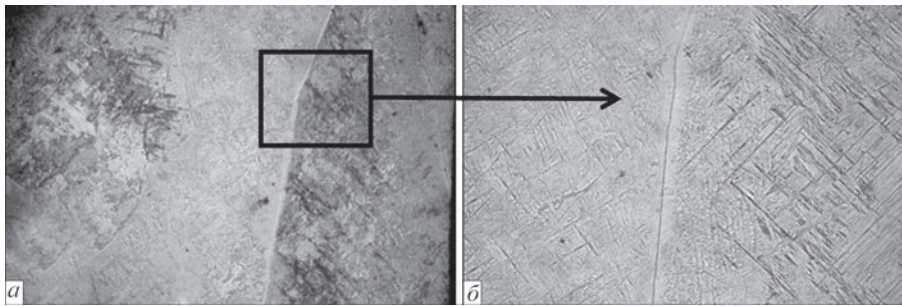


Рис. 8. Мікроструктура металу лінійного зразка у верхній зоні: *a*, *б* – фрагменти мікроструктури: *a* – $\times 25$; *б* – $\times 100$

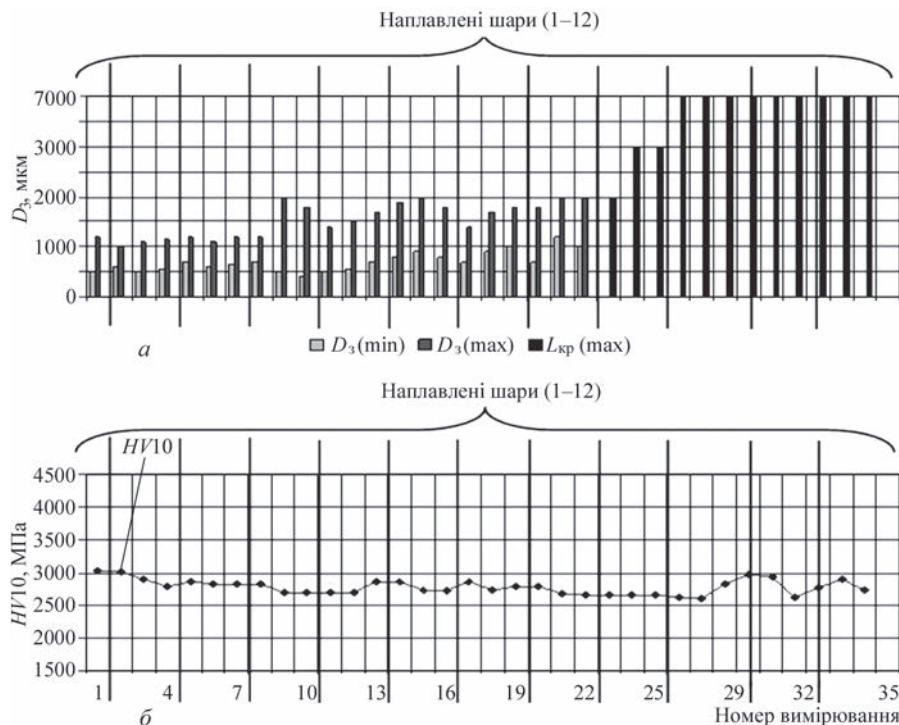


Рис. 9. Зміна структурних параметрів у наплавлених шарах: *a* – величини зерна (D_3); *б* – твердості ($HV10$)

Значення твердості ($HV10$) та її змінювання по всій висоті лінійного зразка наведено на (рис. 9, б). У нижньому шарі твердість становить $HV10 - 3030$ МПа. При переході в наступні шари твердість незначно зменшується до $HV10 - 2790...3010$ МПа. Встановлено, що по всій висоті напавленого металу твердість знаходиться в межах від $HV10 - 2630$ до $HV10 - 2930$ МПа.

При детальному дослідженні напавленого металу (збільшення $\times 100$) встановлено, що структура складається з пластинчасто-голчастої α' -фази (див. рис. 7, 8). Мікротвердість у внутрішніх обсягах зеренної структури становить $HV1 - 2210...2970$ МПа. У зонах на межі зерен не спостерігається ділянок зі слабкою травимістю. Їх структура така ж, як і матриці зерен. Це свідчить про відсутність хімічної неоднорідності у локальних зонах структурних складових [7].

Висновки

1. Застосована технологія багат шарового напавлення дозволяє отримувати структуру подіб-

ну до структури литого металу без дефектів у напавлених шарах.

2. Були проведені дослідження мікроструктури напавлених зразків різного типу. Структура являє собою великі кристаліти з однорідною пластинчасто-голчастою структурою α' -фази. Розміри і форма голок та пластин залежать від чистоти та швидкості охолодження металу.

3. Були проведені дослідження на визначення мікротвердості отриманих зразків. Мікротвердість на межі зон відрізняється від мікротвердості матриці зерна, що, можливо, пов'язано з різницею у складі легуючих елементів. Розподіл мікротвердості має відносно рівномірний характер.

Список літератури

1. Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. (2009) *Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. Справочник.* Москва, ВИЛС-МАТИ.
2. Al-Bermani S.S., Blackmore M.L., Zhang W., Todd I. (2010) The origin of microstructural diversity, texture, and mechanical properties in electron beam melted Ti-6Al-4V. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 41, 13, 3422-3434. Doi: 10.1007/s11661-010-0397-x.

3. Попов А.А., Илларионов А.Г., Россина Н.Г., Гриб С.В. (2013) *Металловедение и термообработка сплавов титана. Структура и свойства: учебное пособие*. Екатеринбург, УрФУ.
4. Жуков В.В., Григоренко Г.М., Шаповалов В.А. (2016) Аддитивное производство металлических изделий. *Автоматическая сварка*, **5-6**, 148–153.
5. Matviichuk V.A., Nesterenkov V.M., Rusynik M.O. (2018) Application of additive electron-beam technologies for manufacture of metal products. *Electrotechnica & Electronica E+E*, **3-4**, 69–73.
6. Нестеренков В.М., Матвейчук В.А., Русыник М.О. (2017) Принципы получения промышленных изделий методом быстрого прототипирования с применением электронно-лучевых технологий. *Сб. тр. VIII Международной конференции «Лучевые технологии в сварке и обработке материалов» LTWMP г. Одесса 11–15 сентября 2017 г.*, сс. 73–77.
7. Грабин В.Ф. (1975) *Основы металловедения и термической обработки сварных соединений из титановых сплавов*. Киев, Наукова думка, 263.
8. Замков В.Н. (1986) *Металлургия и технология сварки титана и его сплавов*. Киев, Наукова думка.
2. Al-Bermami, S.S., Blackmore, M.L., Zhang, W, Todd, I. (2010) The origin of microstructural diversity, texture, and mechanical properties in electron beam melted Ti–6Al–4V. *Metallurg. and Mater. Transact. A.*, **41(13)**, 3422–3434. doi: 10.1007/s11661-010-0397-x.
3. Popov, A.A., Illarionov, A.G., Rossina, N.G., Grib, S.V. (2013) *Physical metallurgy and heat treatment of titanium alloys. Structure and properties: Manual*. Ekaterinburg, UrFU [in Russian].
4. Zhukov, V.V., Grigorenko, G.M., Shapovalov, V.A. (2016) Additive manufacturing of metal products (Review). *The Paton Welding J.*, **5-6**, 137-142.
5. Matviichuk, V.A., Nesterenkov, V.M., Rusynik, M.O. (2013) Application of additive electron-beam technologies for manufacture of metal products. *Electrotechnica & Electronica E+E*, **3-4**, 69–73.
6. Nesterenkov, V.M., Matviichuk, V.A., Rusynik, M.O. (2017) Principles of production of commercial items by rapid prototyping using electron beam technologies. *In: Proc. of 8th Int. Conf. on Beam Technologies in Welding and Materials Processing LTWMP (Odessa, 11-15 September, 2017)*, 73-77.
7. Grabin, V.F. (1975) *Principles of physical metallurgy and heat treatment of welded joints of titanium alloys*. Kiev, Naukova Dumka, 263 [in Russian].
8. Zamkov, V.N. (1986) *Metallurgy and technology of welding*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].

References

MICROSTRUCTURE OF TITANIUM ALLOYS PRODUCED BY THE METHOD OF LAYERED ELECTRON BEAM SURFACING USING THE WIRE OF GRADE Ti6Al4V

V.M. Nesterenkov, M.O. Rusynyk, O.M. Berdnikova, V.A. Matviychuk, V.R. Strashko

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

Using electron beam surfacing, the specimens of products of titanium alloy of various shapes using the wire of grade Ti6Al4V were produced. In the deposited layers no defects were detected. In the course of the work, the investigations of microstructure, phase composition and mechanical properties of the specimens were carried out. For the weld metal, the structure consisting mainly of lamellar-acicular α' -phase is typical. The structure contains a small amount of β -phase, which lies in the form of thin layers between the acicular precipitations of α' -phase. It is not detected using the optical microscope, however can be detected applying electron microscopy and X-ray examinations. The microstructure of the deposited metal is mostly equilibrium and granular, gradient in sizes and microhardness. The microhardness of the boundary zones differs from the microhardness of the grain matrix, which may be associated with the difference in the content of alloying elements. Towards the top of the built specimen, the hardness decreases slightly. 8 Ref., 1 Tabl., 9 Fig.

Keywords: additive technologies, electron beam gun, electron beam surfacing, titanium alloy, metallography, microstructure, microhardness

Надійшла до редакції
02.04.2020



ЗАПОРІЗЬКИЙ ПРОМИСЛОВИЙ ФОРУМ – 2020

8-10 вересня 2020 р.

Щорічна міжнародна спеціалізована виставка «Запорізький Промисловий Форум – 2020» відбудеться у нові строки – з 8 по 10 вересня 2020 р. у виставковому центрі «Козак-Палац».

Запорізький форум – ефективна платформа для успішних презентацій технічних новинок, захід об'єднує спеціалізовані виставки: «Машинобудування. Металургія», «Литво», «Зварювання», «Електротехніка та автоматизація», «Композити та склопластики».

Виставка-2019 р. в цифрах: 118 експонентів, представники 8 країн світу (Польща, Німеччина, Туреччина, Швейцарія, Чехія, Італія, Швеція, США), представлено понад 300 торговельних марок, 6000 кв. м виставкової площі, спеціалізовані конференції та семінари, близько 3000 відвідувачів.

www.expo.zp.ua

