

# ВПЛИВ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ЗРАЗКІВ З Ti6Al4V, ВИГОТОВЛЕНИХ ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ ВИБІРКОВОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕННЯ, НА СТРУКТУРУ ТА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ

С.В. Аджамський<sup>1</sup>, Г.А. Кононенко<sup>1,2</sup>, В.Р. Подольський<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>LLC «Additive Laser Technology of Ukraine». 49000, м. Дніпро, вул. Сергія Подолинського, 31 в.

E-mail: [info@alt-print.com](mailto:info@alt-print.com)

<sup>2</sup>Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України. 49000, м. Дніпро, пл. Академіка Стародубова, 1.

E-mail: [office.isi@nas.gov.ua](mailto:office.isi@nas.gov.ua)

<sup>3</sup>Український державний університет науки і технологій. 49000, м. Дніпро, просп. Гагарина,

4. E-mail: [kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua](mailto:kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua)

Аддитивне виробництво, зокрема, вибіркоче лазерне плавлення (ВЛП) – сучасний метод виготовлення деталей та вузлів складної геометрії з металевих порошків, які складно або неможливо відтворити в умовах традиційного виробництва. Особливістю даної технології є залишкові напруження, що утворюються на етапі виробництва деталей. Оскільки титанові сплави характеризуються низькою теплопровідністю, то проблема формування залишкових напружень для них є особливо актуальною, а термічна обробка для їх зняття – обов'язковою для виробів, виготовлених за ВЛП-технологією. Оскільки структурний стан виробів, отриманих за ВЛП-технологією, відрізняється від такого, що формується при застосуванні традиційних технологій, то необхідні дослідження впливу відпалу для зняття залишкових напружень на механічні властивості та мікроструктуру сплаву Ti6Al4V, отриманого за ВЛП технологією. Досліджували зразки після відпалу з тривалістю витримки 1...5 год при 800 °С. Встановлено, що тимчасовий опір після термічної обробки протягом 1...5 год зазнає зменшення в порівнянні з вихідним станом після виготовлення на 20,55...–23,03 %, відносно подовження – збільшення 31,33...35,57 %. При цьому характер зміни значень відносного звуження нерівномірний: відпал з витримкою 1 год не завдає значних змін; зі збільшенням часу витримки до 2, 3 та 4 год спостерігається зменшення даної характеристики відповідно на 9,03; 45,97; 62,56 % порівняно з вихідним станом; після витримки 5 год значення відносного звуження зазнає приросту даної характеристики в порівнянні зі значеннями після витримки 4 год на ~26,12 %. За результатами кореляційного аналізу значень механічних властивостей та параметрів мікроструктури встановлено, що коефіцієнт форми пластин  $\alpha$ -фази має високу кореляцію зі значеннями тимчасового опору, а кількість  $\alpha$ -фази найбільше корелює зі значеннями відносного звуження при статичному розтягуванні. Бібліогр. 7, табл. 2, рис. 11.

*Ключові слова:* вибіркоче лазерне плавлення, термічна обробка, титановий сплав Ti6Al4V, механічні властивості, мікроструктура

**Вступ.** Технології адитивного виробництва (additive manufacturing – AM), також відомі як 3D-друк, останнім часом все більше застосовуються, а також розширюється кількість матеріалів та методів, які можна використати.

Оскільки виробничі процеси продовжують удосконалюватися і розвиватися, попит на більш швидкі і менш дорогі виробничі процеси дозволив розробити ряд процесів швидкого прототипування (rapid prototyping – RP). З використанням адитивного виробництва практично будь-яка геометрія з варіаціями розміру та складності може бути виготовлена з високим ступенем точності (Simchi & Asgharzadeh, 2004). Технології RP дозволяють виготовляти деталі зі складною тривимірною геометрією за допомогою AM.

За допомогою процесу вибіркового лазерного плавлення (далі – ВЛП-технологія) можуть бути отримані зразки зі складною геометрією з металевих

порошків, які неможливо або складно виготовити іншими традиційними способами виробництва [1].

Однією з переваг AM є лише невеликий обсяг подальшої обробки (полірування, піскоструминна обробка, термообробка) виробів, таким чином дорогі процеси з доданою вартістю можуть бути зведені до мінімуму [2]. У зв'язку зі значним поширенням технологій AM виготовлення, останніми роками набула особливого значення обробка таких матеріалів [3].

Одна з особливостей технології ВЛП, як стверджують ряд авторів [1, 4–7], полягає в утворенні дефектів, що мають відмінну природу в порівнянні з традиційним методом виробництва, та можливості усунення даних дефектів на етапі процесу виготовлення, або етапі подальшої обробки. Одним з основних дефектів адитивного виробництва є залишкові напруження [5, 7], що утворюються на етапі виробництва деталей, їх величина

Аджамський С.В. – <https://orcid.org/0000-0002-6095-8646>, Кононенко Г.А. – <https://orcid.org/0000-0001-7446-4105>,

Подольський В.Р. – <https://orcid.org/0000-0002-0288-0641>

© С.В. Аджамський, Г.А. Кононенко, В.Р. Подольський, 2022

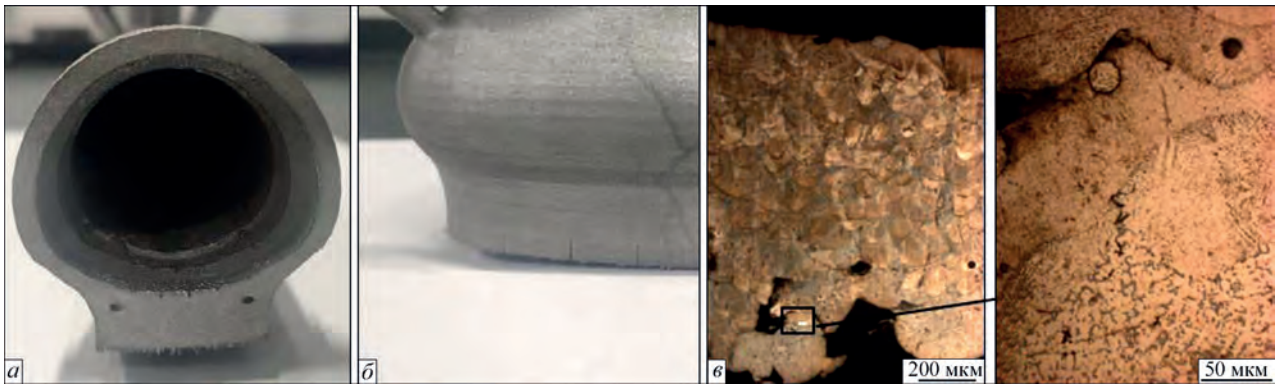


Рис. 1. Дефекти залишкових напружень: *a* – викривлення геометрії; *б* – розтріскування; *в* – ліквацийне розтріскування

залежить від параметрів технологічного процесу, вони можуть призвести до викривлення геометрії (рис. 1, *a*), розтріскування 3D виробу (рис. 1, *б*) та ліквацийного розтріскування (рис. 1, *в*).

Виникнення внутрішніх залишкових напружень в деталях, що виготовляють за допомогою ВЛП-технології пов'язане з процесом дуже швидкого затвердіння ванни розплаву, кількарязового перекристалізування та локального співіснування гарячого і холодного металу. Під час охолодження у ванні розплаву виникають напруження розтягу внаслідок усадки затвердіння та термічного стискування при фазових перетвореннях під час кристалізації. Під дією цих напружень може утворюватися система мікроскопічних стискаючих напружень, що може приводити до розтріскування. Концентрами внутрішніх залишкових напружень можуть бути і бризки рідкого сплаву на підкладці в процесі сканування порошку. Оскільки вони мають меншу температуру, то, як наслідок, виникає великий градієнт температур та утворення мікротріщин. Викривлення геометрії під час процесу сканування та подальшому нанесенні порошку може призвести до нерівномірного нанесення наступного шару порошку. В подальшому це призведе до підсилення викривлень, що спровокує аварійну зупинку процесу виготовлення деталей за ВЛП-технологією, оскільки дана технологія схильна до накопичення внутрішніх залишкових напружень.

Попередні дослідження [5, 7], спрямовані на встановлення шляхів зменшення внутрішніх напружень, дозволили встановити, що застосування раціональних енергетичних параметрів сканування порошку (швидкість руху променя та потужність лазера), певної стратегії побудови дозволяє досягти зменшення деформації під дією залишкових напружень без втрати щільності виробу.

Сплав Ti6Al4V знайшов широке застосування при виготовленні виробів різного призначення, в тому числі і з застосуванням АМ завдяки оптимальним поєднанням технологічних і механічних властивостей. Однак титанові сплави характеризуються низькою теплопровідністю, що робить

проблему формування залишкових напружень ще більш актуальною, а термічну обробку для їх зняття обов'язковою для виробів, виготовлених за ВЛП-технологією. Разом з тим необхідно зауважити, що структурний стан виробів, отриманих за ВЛП технологією відрізняється від такого, що формується при застосуванні традиційних технологій. Тому необхідні дослідження впливу відпалу для зняття залишкових напружень на механічні властивості та мікроструктуру сплаву Ti6Al4V, отриманого за ВЛП технологією.

Термічна обробка титанових сплавів переважно включає лише відпал для зняття залишкових напружень при 800 °С, який проводять в інертній атмосфері, щоб запобігти окисленню поверхні. В даній роботі буде визначено вплив різного часу витримки при термічній обробці дослідних зразків зі сплаву Ti6Al4V на механічні властивості при випробуваннях на розтягування.

Метою даної роботи є визначення та порівняння механічних властивостей зразків на розтягування до та після проведення термічної обробки з різним часом витримки.

**Матеріал та методика досліджень.** Дослідження проводилися на зразках, виготовлених з порошкового матеріалу за технологією ВЛП. Друк зразків проводився на 3D принтері Alfa-280 виробництва компанії ТОВ «АЛТ Україна» [5, 6]. Матеріалом, використаним в цьому дослідженні, був титановий сплав Ti6Al4V з розміром частинок від 5 до 40 мкм. Хімічний склад порошку Ti6Al4V в мас. %: 6,21 Al; 4,03 V; 0,04 Fe; 0,1 C; 0,02 N; Ti – база.

Вихідний матеріал був досліджений за допомогою растрового електронного мікроскопа РЕМ-106 (рис. 2, *a*) для визначення форми і розмірів частинок. На рис. 2, *б* наведено результати аналізу.

Були виготовлені дослідні зразки для випробування на розтягування за ГОСТ 1497 – пропорційні плоскі зразки з головками типу I товщиною 3 мм (рис 3). Термічна обробка проводилася при температурі 800 °С з витримкою 1...5 год з кроком 1 год, схема термічної обробки представлена

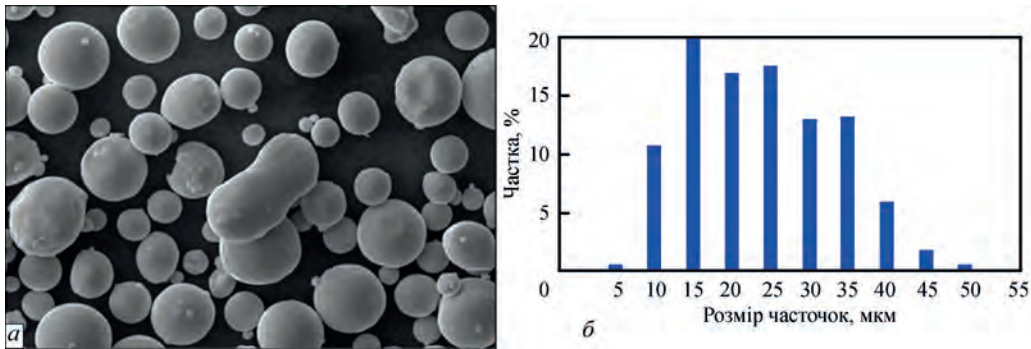


Рис. 2. Частинки вихідного матеріалу Ti6Al4V при збільшенні 500 (а) та результати гранулометричного аналізу (б)

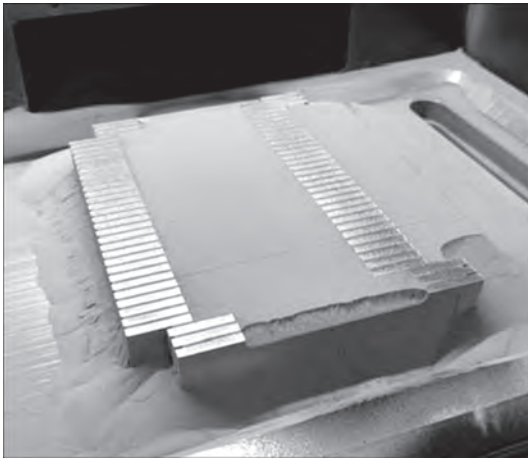


Рис. 3. Загальний вигляд виготовлених дослідних зразків

на рис. 4. Механічна обробка зразків до чистових розмірів проводилася з застосуванням токарного верстату HAAS YT4.

Термічна обробка проводилася в печі шахтного типу ШМП-27 з застосуванням захисного середовища (аргон). Механічні властивості визначали при випробуванні на розтягування за стандартною методикою на машині «РНУВЕ». Металографічні шліфи виготовляли за стандартними методиками з застосуванням алмазних паст. Дослідження мікроструктури виконували за допомогою оптичного мікроскопа Axiovert 200M.

Статистичний аналіз було проведено із застосуванням стандартного пакету аналізу даних Excel.

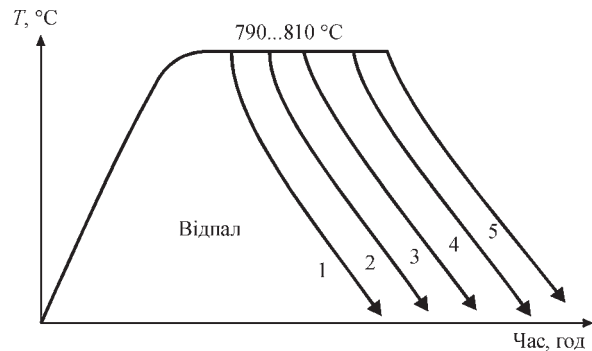


Рис. 4. Схема термічної обробки дослідних зразків

**Результати досліджень.** За результатами аналізу (табл. 1) встановлено, що значення механічних властивостей після відпалу зазнають змін в порівнянні з вихідним станом після виготовлення. Співставний аналіз значень тимчасового опору всіх дослідних зразків після відпалу при температурі 800 °C та з діапазоном тривалості витримок 1...5 год з кроком 1 год (зразки № 1...5) дозволяє встановити стабільне зменшення показників на (-20,55...-23,03 %) з невеликою розбіжністю ~2,5 % порівняно з вихідним станом (зразок № 6). Відносне подовження після відпалу зазнає стабільних змін (31,33...35,57 %) з невеликою розбіжністю близько 4 % порівняно з вихідним станом. При аналізі змін значень відносного звуження встановлено, що відпал при 800 °C з витримкою 1 год не завдає значних змін, зі збільшенням часу витримки до 2, 3 та 4 год спостерігається зменшення даної характеристики

Таблиця 1. Механічні властивості дослідних зразків, виготовлених з титанового сплаву Ti6Al4V за технологією вибіркового лазерного плавлення після термічної обробки та у вихідному стані

Номер п/п	Стан	Тимчасовий опір, МПа	$\Delta\sigma_{в6}, \%$	Відносне подовження, %	$\Delta\delta_6, \%$	Відносне звуження, %	$\Delta\psi_6, \%$
1	Відпал 800 °C, витримка 1 год	1003,73	-21,64	23,16	34,71	10,32	2,48
2	Відпал 800 °C, витримка 2 год	989,987	-22,71	23,42	35,43	9,16	-9,03
3	Відпал 800 °C, витримка 3 год	1017,65	-20,55	22,18	31,83	5,44	-45,97
4	Відпал 800 °C, витримка 4 год	1008,47	-21,27	23,47	35,57	3,77	-62,56
5	Відпал 800 °C, витримка 5 год	985,937	-23,03	22,02	31,33	6,4	-36,44
6	Вихідний стан після виготовлення	1281	-	15,12	-	10,07	-



відповідно на 9,03; 45,97; 62,56 % порівняно з вихідним станом. Після витримки 5 год значення відносного звуження зазнає приросту даної характеристики в порівнянні зі значеннями після витримки 4 год на ~26,12 %, що може вказувати на зміни в мікроструктурі сплаву Ti6Al4V.



Рис. 5. Структура дослідного зразка № 6 (вихідний стан після виготовлення)

В результаті аналізу значень механічних властивостей встановлено, що тимчасовий опір після термічної обробки зазнає зменшення в середньому в порівнянні з вихідним станом після виготовлення на ~21,84 %, відносно подовження – збільшення на ~33,7 %.

Дослідження дослідних зразків в полірованому стані показали, що всі вони мають щільність близько 99,97 %, в більшості випадків дефектами є окремі глобулярні пори діаметром 3...7 мкм. При дослідженні мікроструктури було встановлено, що дослідний зразок № 6 у стані після виготовлення має типову для процесу 3D лускату структуру, яка утворюється в результаті затвердіння окремих ванн розплаву, мікроструктура сформована  $\alpha$ - та  $\beta$ -фазами зі стовпчастими подовженими зернами, що ростуть, пересікаючи кілька шарів (рис. 5).

За результатами досліджень мікроструктури (рис. 6–11) термооброблених дослідних зразків

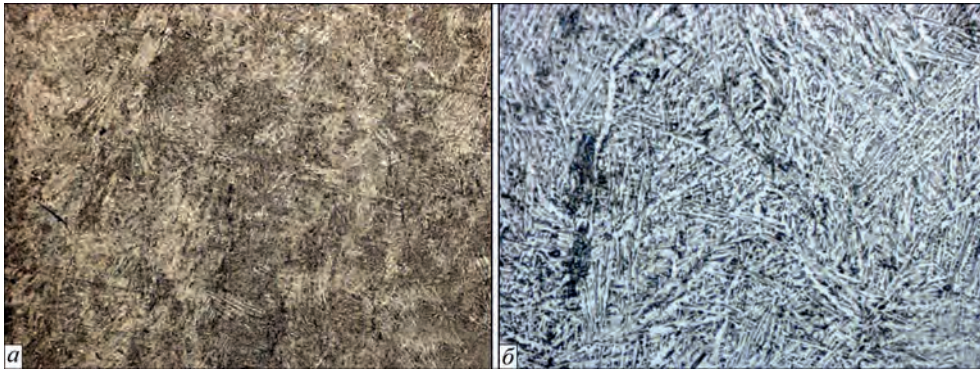


Рис. 6. Структура дослідного зразка № 1 після відпалу при 800 °C з витримкою 1 год: а –  $\times 100$ ; б –  $\times 800$

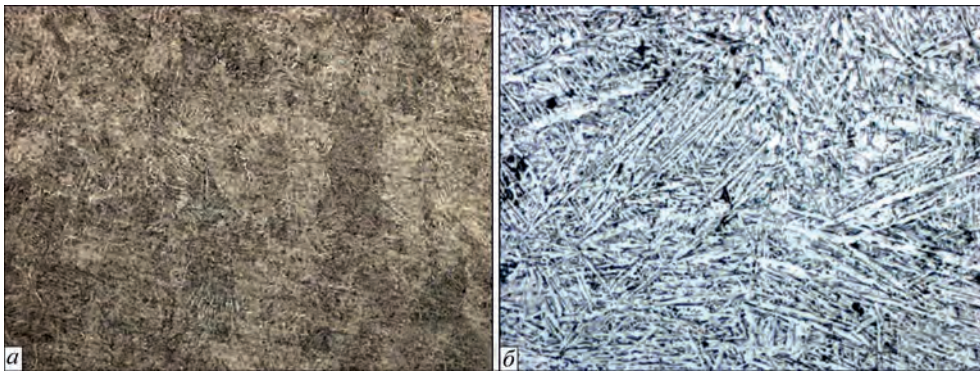


Рис. 7. Структура дослідного зразка № 2 після відпалу при 800 °C з витримкою 2 год: а –  $\times 100$ ; б –  $\times 800$

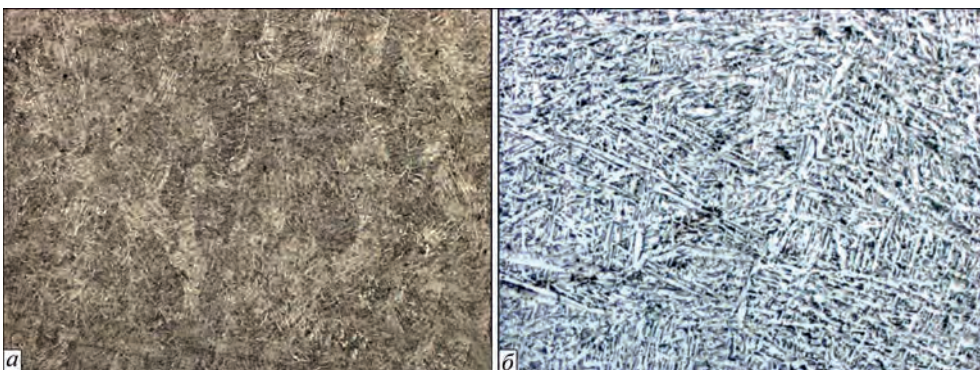
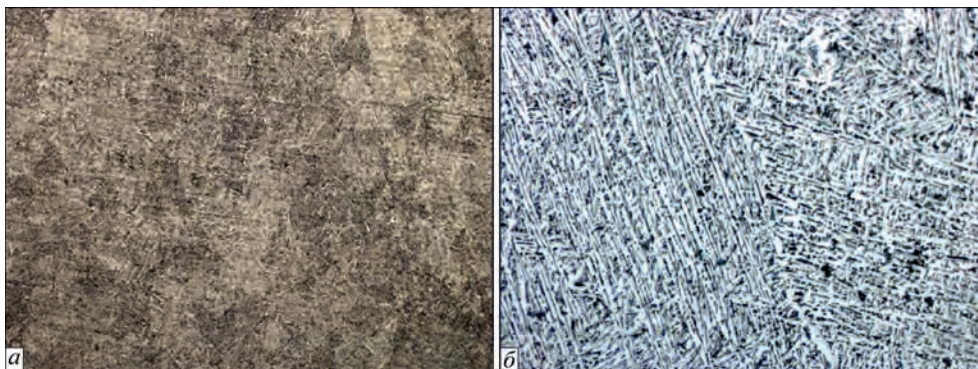
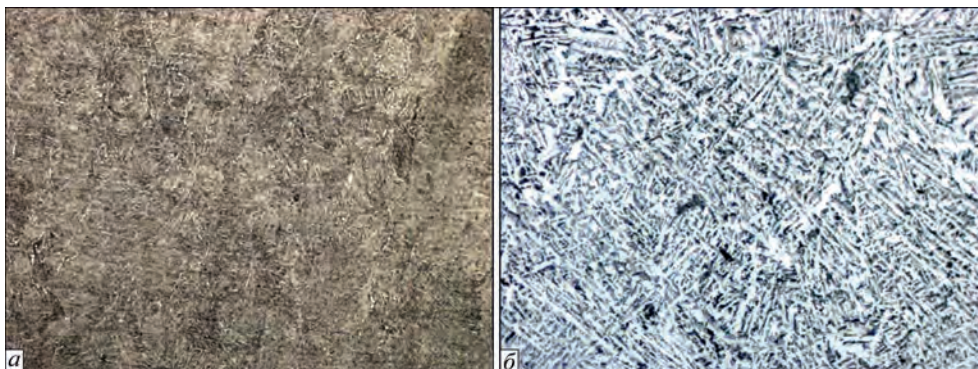
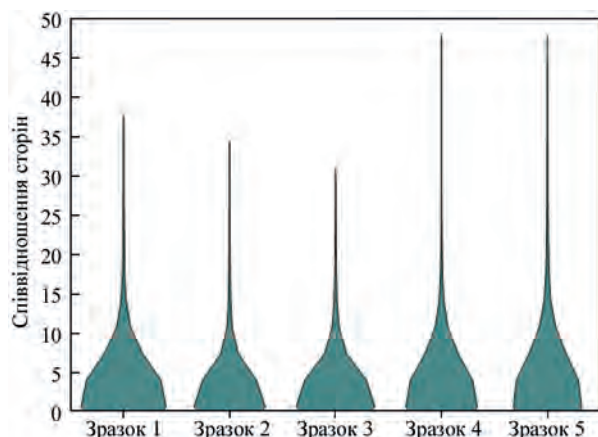


Рис. 8. Структура дослідного зразка № 3 після відпалу при 800 °C з витримкою 3 год: а –  $\times 100$ ; б –  $\times 800$



Рис. 9. Структура дослідного зразка № 4 після відпалу при 800 °С з витримкою 4 год: а –  $\times 100$ ; б –  $\times 800$ Рис. 10. Структура дослідного зразка № 5 після відпалу при 800 °С з витримкою 5 год: а –  $\times 100$ ; б –  $\times 800$ Рис. 11. Скрипковий графік розподілу розміру  $\alpha$ -фази

встановлено, що титановий сплав має  $\alpha+\beta$ -структуру. Після витримки протягом 1 год (дослідний зразок № 1) кількість  $\alpha$ -фази складала 34,06 % (рис. 6), співвідношення сторін (ширина, довжина) пластини  $\alpha$ -фази відповідало  $\sim 0,5$  (рис. 11).

При дослідженні співвідношення сторін  $\alpha$ -фази дослідних зразків № 2, 3, 4 встановлено, що  $\alpha$ -фаза має приблизно однакові геометричні параметри і їх співвідношення знаходиться в діапазоні 0,48...0,50, а її кількість складала 29,7, 31,11, 30,87 % відповідно (рис. 7–9, 11). Дослідний зразок № 5 має структуру  $\alpha+\beta$ , при дослідженні  $\alpha$ -фази встановлено співвідношення сторін – 0,46, відсоткова кількість якої складала 30,38 % (рис. 10, 11). За результатами дослідження мікроструктури встановлено, що мікроструктура являє собою  $\alpha+\beta$ -структуру з незначною зміною товщини пластинок  $\alpha$ -фази. За кількісною оцінкою встановлено, що частка  $\alpha$ -фази у всіх дослідних зразках складає 29,7...34 %. Встановлено, що термічна обробка з повільним охолодженням, що реалізується при охолодженні з пічкою, зазвичай призводить до формування  $\alpha+\beta$ -пластинчастої мікроструктури і невеликої кількості рівновісної  $\alpha$ -фази.

Таблиця 2. Коефіцієнти парної кореляції механічних властивостей та параметрів структури після термічної обробки різної тривалості

Параметр	Тривалість відпалу, год	Відносне звуження, %	Тимчасовий опір, МПа	Відносне подовження, %	Частка $\alpha$ -фази, %	Коефіцієнт форми $\alpha$ -фази
Тривалість відпалу, год	1	–	–	–	–	–
Відносне звуження, %	–0,77806	1	–	–	–	–
Тимчасовий опір, МПа	–0,20611	–0,3955	1	–	–	–
Відносне подовження, %	–0,50588	0,240275	0,014956	1	–	–
Частка $\alpha$ -фази, %	–0,58448	0,441543	0,372066	0,121644	1	–
Коефіцієнт форми $\alpha$ -фази	–0,53033	–0,09419	0,88632	0,437112	0,536141	1

Результати аналізу парної кореляції значень механічних властивостей та параметрів мікроструктури представлено в табл. 2.

Цей критерій використовується для вимірювання ступеня лінійної залежності між двома змінними. Значення коефіцієнта парної кореляції може змінюватись від  $-1$  до  $1$ . При від'ємних значеннях коефіцієнта вплив негативний, при додатних значеннях – позитивний. При значеннях в діапазоні  $1,0 \dots 0,5$  ( $-1,0 \dots -0,5$ ) кореляція вважається високою, при значеннях коефіцієнта в інтервалі  $0,5 \dots 0,3$  ( $-0,5 \dots -0,3$ ) – середня кореляція, при  $0,3 \dots 0,1$  ( $-0,3 \dots -0,1$ ) – кореляція низька, при менших значеннях – кореляція відсутня.

Встановлено, що коефіцієнт співвідношення сторін виділень  $\alpha$ -фази має високу кореляцію зі значеннями тимчасового опору, а кількість  $\alpha$ -фази найбільше корелює зі значеннями відносного звуження при статичному розтягуванні.

### Висновки

1. В результаті аналізу значень механічних властивостей встановлено, що тимчасовий опір після термічної обробки сплаву Ti6Al4V, виготовленого за технологією вибіркового лазерного плавлення, зазнає зменшення в порівнянні з вихідним станом після виготовлення за технологією вибіркового лазерного плавлення на  $\sim 21,84\%$ , відносне подовження – збільшення на  $\sim 33,7\%$ .

2. Встановлено, що термічна обробка сплаву Ti6Al4V, виготовленого за технологією вибіркового лазерного плавлення, з повільним охолодженням з пічкою, призводить до формування  $\alpha+\beta$ -пластинчастої мікроструктури і невеликої кількості рівнобісної  $\alpha$ -фази.

3. За результатами дослідження мікроструктури встановлено, що після термічної обробки відбувається зміна товщини пластинок  $\alpha$ -фази, за кількісною оцінкою встановлено, що  $\alpha$ -фаза після витримки протягом  $1 \dots 5$  год при  $800\text{ }^\circ\text{C}$  складає  $29,7 \dots 34\%$ .

4. За результатами аналізу значень механічних властивостей та параметрів мікроструктури встановлено, що кількість та розміри пластинок  $\alpha$ -фази більш значно впливає на відносне звуження ніж на інші механічні властивості, коефіцієнт форми має тісний зв'язок зі значеннями тимчасового опору.

### Список літератури/References

1. Mahoney, M.W. (1989) *Superplastic Properties of Alloy 718*. Superalloy 718 Metallurgy and Applications. Eds. E.A. Loria, TMS, 391–405.
2. Conner, B.P., Manogharan, G.P., Martof, A.N. et al. (2014) Making sense of 3-D printing: creation map of additive manufacturing products and services, *Additive Manufacturing*, **1-4**, 64–74.
3. Frazier, W.E. (2014) Metal additive manufacturing: a review. *Journal of Materials Engineering and performance*, **23**, **6**, 1917–1928.
4. Kruth, J.-P., Leu, M.-C., Nakagawa, T. (1998) Progress in additive manufacturing and rapid prototyping. *CIRP Ann.-Manuf. Technol.*, **47**, **2**, 525–540.
5. Аджамський С.В., Кононенко Г.А., Подольський Р.В. (2021) Вплив параметрів SLM-процесу на формування області кордонів деталей з жароміцного нікелевого сплаву Inconel 718. *Космічна наука і технологія*, **27**, **6** (133), 105–114. <https://doi.org/10.15407/knit2021.06.105>
6. Аджамський С.В., Кононенко Г.А., Подольський Р.В. (2020) Вплив технологічних параметрів SLM-процесу на пористість металовиробів. *Автоматичне зварювання*, **10**, 14–20. <https://doi.org/10.37434/as2020.10.03>
7. Shifeng, W., Shuai, L., Qingsong, W. et al. (2014) Effect of molten pool boundaries on the mechanical properties of selective laser melting parts. *J. Mater. Process. Tech-nol.*, **214**, **11**, 2660–2667.

## INFLUENCE OF HEAT TREATMENT OF SPECIMENS FROM Ti6Al4V MANUFACTURED BY THE TECHNOLOGY OF SELECTIVE LASER MELTING ON STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES

S.V. Adjamskiy<sup>1</sup>, G.A. Kononenko<sup>1,2</sup>, V.R. Podolskiy<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>LLC «Additive Laser Technology of Ukraine». 31 v, Serhiy Podolynskyi Str., 49000, Dnipro, Ukraine. E-mail: info@alt-print.com

<sup>2</sup>Z.I. Nekrasov Iron and Steel Institute. National Academy of Sciences of Ukraine. 1 Academician Starodubov Sq., 49000, Dnipro, Ukraine. E-mail: office.isi@nas.gov.ua

<sup>3</sup>Ukrainian State University of Science and Technologies. 4 Gagarina Ave, 49000, Dnipro, Ukraine. E-mail: kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua

Additive manufacturing, in particular, selective laser melting (SLM) is a modern method of manufacturing parts and units of a complex geometry from metal powder, which are difficult or impossible to be reproduced in the conditions of traditional manufacturing. This technology is featured by residual stresses generated at the stage of manufacturing parts. Since titanium alloys are characterized by low thermal conductivity, the problem of forming residual stresses is of particular relevance for them and heat treatment for their removal is mandatory for products manufactured using SLM technology. Since the structural state of products manufactured by SLM technology differs from that formed with the use of traditional technologies, it is necessary to study the effect of annealing for residual stresses removal on mechanical properties and microstructure of Ti6Al4V alloy manufactured by SLM technology. The specimens were studied after annealing with an exposure time of  $1 \dots 5$  h at  $800\text{ }^\circ\text{C}$ . It was found that as compared to the initial state after manufacturing, ultimate strength after heat treatment for  $1 \dots 5$  h undergoes a decrease by  $20.55 \dots 23.03\%$ , relative elongation has an increase by  $31.33 \dots 35.57\%$ . At the same time, the nature of variation in the values of relative reduction in area is non-uniform: annealing with an exposure of 1 h does not cause significant changes; with an increase in the exposure time to 2, 3, and 4 h, a decrease in this characteristics is observed, respectively, by 9.03; 45.97 and 62.56 % as compared to the initial state; after exposure for 5 h, the value of the relative reduction in area undergoes an increase in this characteristics as compared to the values after exposure for 4 h – by  $\sim 26.12\%$ . According to the results of the correlation analysis of the values of mechanical properties and microstructure parameters, it was found that the shape factor of  $\alpha$ -phase plates has a high correlation with the values of ultimate strength, and the amount of  $\alpha$ -phase is most correlated with the values of relative reduction in area during static tension. 7 Ref., 2 Tabl., 11 Fig.

*Key words: selective laser melting, heat treatment, titanium Ti6Al4V alloy, mechanical properties, microstructure*

Надійшла до редакції 30.06.2022