МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 669.187.826.002.6 https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.14(45).146-154

І. М. Погрелюк, проф., д-р техн. наук, **С. М. Лаврись,** ст. дослідник, канд. техн. наук, **М.-О. М. Даниляк,** ст. дослідник, канд. техн. наук, **О. В. Ткачук,** ст. дослідник, канд. техн. наук, **Г. Г. Веселівська,** ст. дослідник, канд. техн. наук, **Р. В. Проскурняк,** канд. техн. наук
Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, м. Львів, Україна
e-mail: irynapohrelyuk@gmail.com

Вплив термічної обробки на структуру і властивості титанового сплаву ВТ6, отриманого 3D друком

Адитивне виробництво, або 3D друк, – це процес, під час якого деталь створюється пошарово, і є перспективним підходом до проектування деталей, що мають форму, близьку до кінцевої. Титанові сплави, виготовлені методом адитивного виробництва, знаходять застосування в різних галузях промисловості. У цій статті розглядаються особливості формування мікроструктури та властивостей сплаву титану, синтезованого із використанням порошкової лазерної адитивної технологій 3D друку – метод селективного лазерного плавлення (SLM – Selective Laser Melting). З'ясовано вплив термічної обробки, як основного підходу для нівелювання негативного впливу анізотропії та залишкових напружень в синтезованих титанових заготовках, на мікроструктуру, мікромеханічні характеристики та корозійну тривкість сплаву ВТ6, отриманого 3D друком.

титановий сплав ВТ6, 3D друк, термічна обробка, структура, мікромеханічні характеристики, корозійна тривкість

Постановка проблеми. Титан та його сплави є затребуваним конструкційним матеріалом у багатьох галузях промисловості (авіакосмічній, суднобудівній, оборонній, атомній), зокрема в медицині, завдяки відмінним механічні властивостям у поєднанні з низькою щільністю, хорошою корозійною тривкістю, біосумісністю та зварюваністю [1]. Наразі висока собівартість виробництва титанової продукції, використовуючи традиційну технологію її отримання, є головною проблемою, що обмежує застосування титанових сплавів так широко, як сталь та алюмінієві сплави. Для розширення сфери використання дороговартісних титанових сплавів актуальним є застосування нових методів отримання виробів, які б забезпечили формування структурних станів з високими фізико-механічними характеристиками за відносно простими технологічними підходами і низьким рівнем відходів сировини. Як тільки їх вартість знизиться, тоді деякі матеріали, які використовують в багатьох галузях, можна буде замінити на титанові сплави. Відтак актуальними на сьогодні є технології порошкової металургії, що дозволяють суттєво здешевити титанову продукцію завдяки майже безвідходному виробництву, коли коефіцієнт використання матеріалу досягає ~ 99% [2-6]. Це, зокрема, адитивна технологія 3D друку. Проте, при одержанні виробів 3D друком, неможливо повністю уникнути термічних залишкових напружень чи хімічної та структурної неоднорідності готової деталі за рахунок швидкого нагрівання та охолодження нанесених шарів порошку в процесі сплавлення, що загалом знижує експлуатаційні характеристики матеріалу, в тому числі антикорозійні, порівно з традиційним виготовленням. Тому, для усунення вищезазначених недоліків, титанові вироби, надруковані на 3D-принтері, необхідно додатково термічно обробляти, тим самим досягаючи їх оптимальних експлуатаційних характеристик.

© І. М. Погрелюк, С. М. Лаврись, О. М. Даниляк, О. В. Ткачук, Г. Г. Веселівська, Р. В. Проскурняк, 2026

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Іноваційною технологією в порошковій металургії є метод селективного лазерного плавлення (SLM – Selective Laser Melting) [7-9] – це адитивна технологія 3D друку, що створює високощільні металеві деталі шляхом повного розплавлення порошкового матеріалу потужним лазером. Перевагою цього методу є можливість виготовляти деталі точних розмірів за короткий період часу.

На даний час багато дослідницьких груп зосередили свою увагу на дослідженнях формування структурного стану титанових сплавів залежно від технологічних умов та способів друку, а також їх після термічній обробці, для нівелювання негативного впливу анізотропії та залишкових напружень [10-15]. Однак така обробка не завжди покращує антикорозійні та трибологічні характеристики сплаву, а інформація про такі дослідження є обмеженою.

Постановка завдання. Таким чином, метою роботи було з'ясувати вплив термічної обробки на структуру, мікромеханічні та антикорозійні властивості титанового сплаву ВТ6, отриманого 3D друком, а також порівняти його з властивостями сплаву, отриманого традиційно.

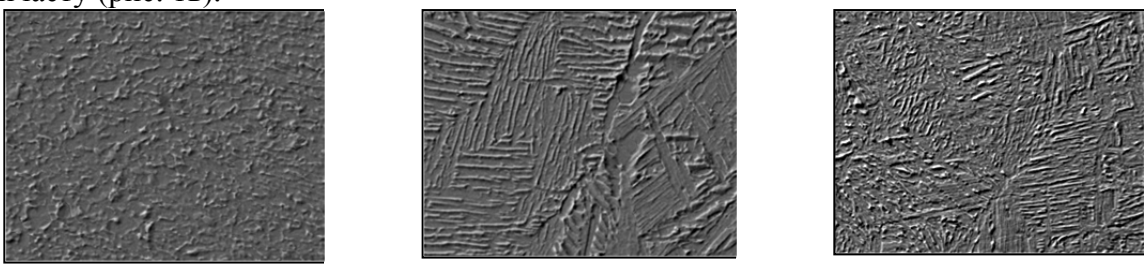
Виклад основного матеріалу. Досліджували зразки аналогічного хімічного складу зі сплаву ВТ6, отримані:

– за традиційною технологією магнієтермічного відновлення, переплаву та деформування;

– методом 3D-друку з використанням обладнання Concept Laser M2 (ТОВ «3D Metal Tech», Київ, Україна) та порошку титанового сплаву ВТ6 (CL 41TI ELI) компанії GE Additive Concept-Laser GmbH (Ліхтенфельс, Німеччина).

Титановий сплав ВТ6, отриманий традиційно, згідно з металографічним аналізом здійсненим за допомогою сканувального електронного мікроскопа (СЕМ) ZEISS EVO 40XVP, має типову рівновісну структуру (рис. 1а). Натомість, отриманий 3D друком, характеризується голчастою мартенситною структурою (рис. 1б), що, очевидно, пов'язано з високими швидкостями нагрівання та охолодження під час отримання сплаву [16, 17].

Термічну обробку сплаву ВТ6, отриманого 3D друком, проводили в кілька етапів: нагрів до 800°С, витримка впродовж 2 год → охолодження до 500°С, витримка впродовж 0,5 год → охолодження з пічкою до кімнатної температури. Обробку проводили у вакуумі (P = 10^{-3} Па). Двофазні (α+β)-титанові сплави чутливі до швидкості зміни температури, при цьому критерієм допустимих швидкостей нагрівання і охолодження є відсутність короблення деталей [18]. Для досліджуваного сплаву нагрівання і охолодження при відпалі до температури 500°С проводили зі швидкістю ≤ 150 °С/год, а при вищих температурах – зі швидкістю ≤ 80 °С/год. Внаслідок термічної обробки метастабільна мартенситна мікроструктура перетворилася на (α+β) двофазну пластинчасту (рис. 1в).



а б в

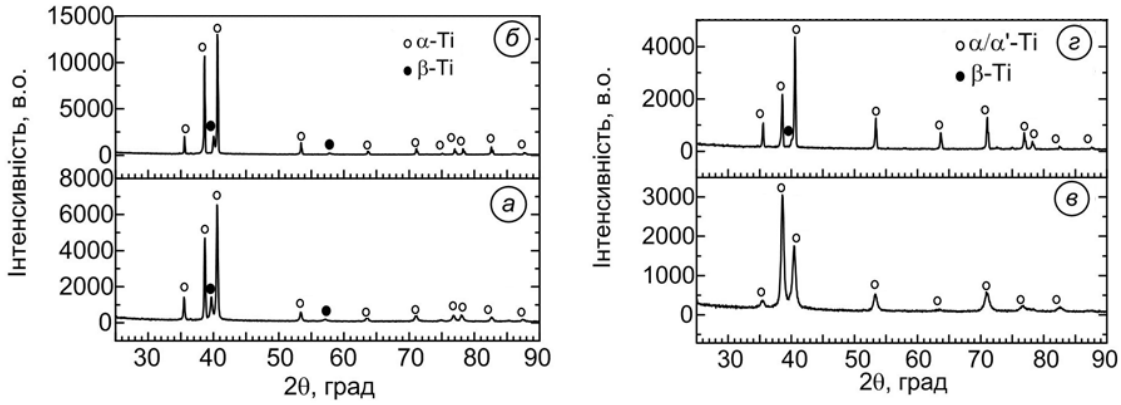
а – традиційно у вихідному стані; б – 3D друком у вихідному стані;
в – 3D друком з наступною термічною обробкою

Рисунок 1 – Структура сплаву ВТ6, отриманого за різними технологіями

Джерело: розроблено автором

Фазовий склад поверхневих шарів визначали рентґенівським фазовим аналізом на дифрактометрі ДРОН-3.0 у монохроматичному CuK_α-випромінюванні з фокусуванням за схемою Брегґа–Брентано. Дифрактограми знімали методом крокового сканування в інтервалі кутів 2θ = 25°–90°. Крок сканування – 0,05°, тривалість експозиції в точці – 5 с. Використовували пакети програмного забезпечення Sietronix і Powder Cell 2.4.

Згідно рентгенівського фазового аналізу, на дифрактограмі титанового сплаву ВТ6, отриманому традиційно, у вихідному стані α-фаза титану представлена широким спектром рефлексів. Наявність β-фази підтверджується рефлексами (110) і (200) (рис. 2а). В результаті термічної обробки змінюється кількісний фазовий склад сплаву в бік збільшення β-фази. На дифракційних спектрах сплаву це відображається у збільшенні інтенсивності рефлексів β-фази титану (рис. 2б*)*.

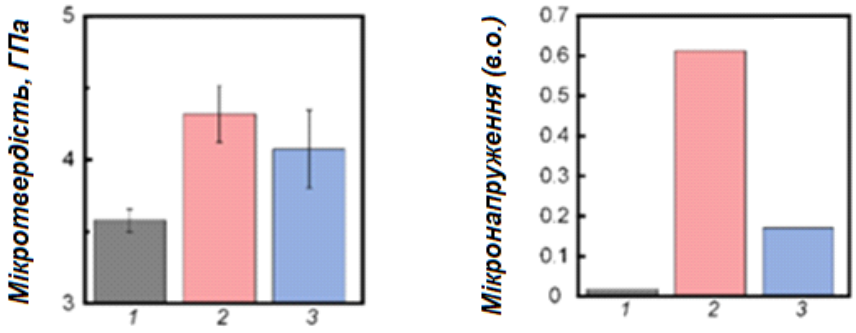


а – традиційно у вихідному стані; б – традиційно після термічної обробки;
в – 3D друком у вихідному стані; г – 3D друком після термічної обробки
Рисунок 2 – Дифрактограми титанового сплаву ВТ6, отриманого за різними технологіями, без та після термічної обробки

Джерело: розроблено автором

Формування мартенситної структури у сплаві, отриманому 3D друком, також підтверджується результатами рентгенівського фазового аналізу. У дифракційному спектрі сплаву, на відміну від деформованого, фіксується лише фаза α/α', без слідів β-фази (рис. 2в). Очевидно, що під час селективного лазерного плавлення утворюється нерівноважна мартенситна α'-фаза зі структурою ГПУ, подібна до α-фази, що створює труднощі при її ідентифікації. Однак на наявність α'-мартенситної структури вказують протяжні піки α/α'-фази. Формування нерівноважної α'-мартенситної фази зумовлене швидким недифузійним затвердінням під час 3D друку. Такі умови перешкоджають дифузії β-легувальних елементів (ванадію), і в результаті утворюється перенасичений твердий розчин ванадію в α'-фазі [17]. Це призводить до збільшення напружень у кристалічній ґратці та збільшення мікротвердості (рис. 3). Дюрометричний аналіз зміцненої поверхні здійснювали за навантаження на індентор 0,49 Н за допомогою мікротвердоміра ПМТ–3М використовуючи, як індентор, наконечник Віккерса з робочою частиною у формі чотиригранної піраміди з квадратною основою.

Термічна обробка сприяє появі піків β-фази та зменшенню ширини піків α/α' фази (рис. 2г). Тобто, внаслідок впливу температури відбуваються процеси дифузії, що супроводжуються перерозподілом легувальних елементів, а саме β-стабілізаторів (ванадію) з α/α' до β-фази, яка може розчиняти більше ванадію. Також, утворення стабільних α та β-фаз та зменшення α'-фази в титановому сплаві після 3D друку свідчить про зменшення напружень у ґратці та мікротвердості (рис. 3).



а б

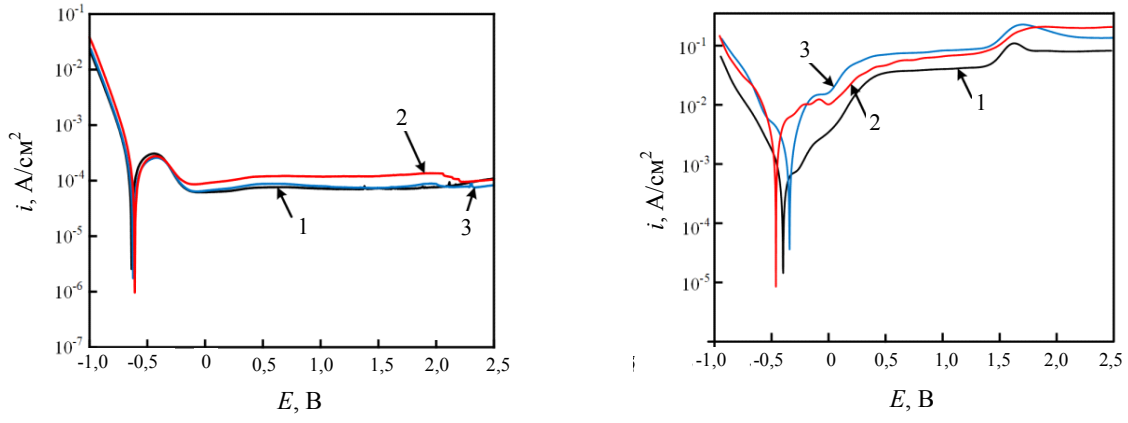
а – мікротвердість; б – мікронапруження у кристалічній ґратці; 1 – традиційно у вихідному стані; 2 – 3D друком у вихідному стані; 3 – 3D друком після термічної обробки

Рисунок 3 – Мікромеханічні характеристики титанового сплаву ВТ6, отриманого за різними технологіями та після його термічної обробки

Джерело: розроблено автором

Для з'ясування впливу технології виготовлення зразків зі сплаву ВТ6 та термічної обробки на їх корозійну поведінку у 20%-му водному розчині хлоридної кислоти, а також у розчині Рінгера ((в г/л): NaCl – 9,0; KCl – 0,43; $CaCl_2$ – 0,24; $NaHCO_3$ – 0,20), який моделює середовище людського організму, проводили електрохімічні випробування зразків, за допомогою потенціостата-гальваностата VersaSTAT 3, шляхом зняття потенціодинамічних поляризаційних кривих в діапазоні потенціалів – 1,0...+2,5 В відносно Ag/AgCl електроду порівняння зі швидкістю сканування 2 мВ/с, а також вимірювання електрохімічної імпедансної спектроскопії в діапазоні частот 10^{-2} ...10^4 Гц зі збуренням потенціалу 10 мВ від піку до піку. Результати аналізували за допомогою програмного забезпечення Zview.

На рисунку 4а приведено результати потенціодинамічних досліджень зразків з титанового сплаву ВТ6, виготовленого за різними технологіями, у 20%-му водному розчині хлоридної кислоти. Характер поляризаційних кривих для всіх зразків є типовим для пасивних матеріалів, що пов'язано з розчиненням поверхневої природної оксидної плівки з наступною самопасивацією поверхні за потенціалу понад -0,5 В.



а б

а – 20%-ий розчин хлоридної кислоти; б – розчин Рінгера; 1 – традиційно у вихідному стані; 2 – 3D друком у вихідному стані; 3 – 3D друком після термічної обробки

Рисунок 4 – Потенціодинамічні криві титанового сплаву ВТ6, виготовленого за різними технологіями та після його термічної обробки

Джерело: розроблено автором

Потенціал корозії усіх зразків сплаву практично однаковий (таблиця). Натомість струм корозії сплаву, отриманого 3D друком, є вищим, ніж традиційно отриманого, що вказує на його нижчу корозійну тривкість. Також для сплаву, отриманого цим методом, найвищим є і струм пасивації (таблиця), що вказує на утруднену пасивацію і, як наслідок, вищу швидкість корозії навіть у пасивній області. Слід відзначити, що термічна обробка цього зразка дозволяє покращити електрохімічні характеристики сплаву та наблизити їх до характеристик традиційно отриманого (таблиця 1).

Таблиця 1 – Електрохімічні характеристики в корозійних середовищах традиційно виготовленого сплаву ВТ6 та після 3D друку і наступної термічної обробки

Технологія виготовлення	$E_{кор}$, В	$i_{кор}$, А/см^2	$i_{пас}$, А/см^2
	20%-ий водний розчин хлоридної кислоти		
Традиційна	-0,63	$8{,}13\cdot10^{-5}$	$6{,}16\cdot10^{-5}$
3D друк	-0,62	$9{,}07\cdot10^{-5}$	$8{,}71\cdot10^{-5}$
3D друк + термічна обробка	-0,61	$8{,}47\cdot10^{-5}$	$6{,}53\cdot10^{-5}$
	Розчин Рінгера		
Традиційна	-0,333	$1{,}2\cdot10^{-7}$	–
3D друк	-0,507	$3{,}8\cdot10^{-7}$	–
3D друк + термічна обробка	-0,388	$0{,}6\cdot10^{-7}$	–

Джерело: розроблено автором

На рис. 4б приведені потенціодинамічні криві сплаву ВТ6 у розчині Рінгера. У цьому розчині на анодній кривій сплаву, отриманого традиційно, спостерігаються дві пасивні області, що вказує на пасивацію та репасивацію поверхні. Потенціал корозії та густина струму корозії представлені в таблиці.

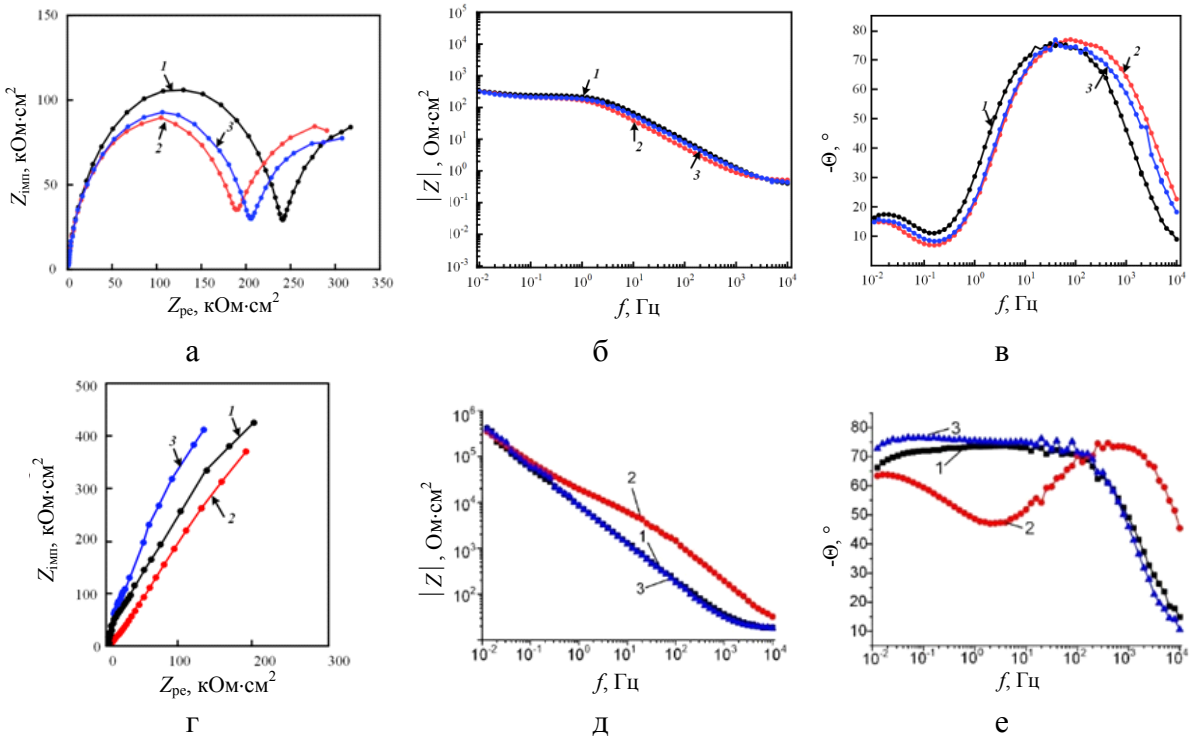
Пасивація та репасивація поверхні сплаву, отриманому 3D друком, відбувається майже при тих самих анодних струмах, що й для отриманого традиційно (рис. 4б), але густина струму корозії збільшується приблизно в 3 рази (таблиця). Це вказує на слабшу корозійну тривкість сплаву, отриманого 3D друком, що може бути пов’язано з наявністю метастабільної α′-фази у сплаві.

Термообробка сплаву, отриманому 3D друком, сприяє покращенню корозійної тривкості, оскільки густина струму корозії зменшується приблизно в 6 разів (таблиця), що може бути наслідком збільшення вмісту β-фази та зменшенням α′ мартенситу у сплаві.

Результати імпедансної спектроскопії представлено у вигляді графіків Найквіста та Боде (рис. 5). На графіках Найквіста для усіх досліджуваних титанових зразків у 20%-му розчині хлоридної кислоти спостерігаємо добре виражанні дві ємнісні петлі (рис. 5а). Очевидно, що високочастотну ємнісну петлю можна характеризувати як петлю поверхневої поруватої оксидної плівки (плівки продуктів корозії), тоді як другу низькочастотну слід пов’язувати з подвійним електричним шаром на межі поділу хлоридна кислота/титановий сплав (електроліт/матриця). Про зниження опірності до корозії отриманого 3D друком титанового сплаву свідчить менший діаметр петель порівняно з традиційно виготовленим матеріалом. Як максимальний фазовий кут, так і модуль імпедансу у зоні низьких частот для отриманого 3D друком сплаву є нижчими, ніж для отриманого традиційно, що вказує на поруватішу поверхневу оксидну плівку та вищу інтенсивність протікання корозійних процесів (рис. 5б, в).

Графіки Найквіста (рис. 5г) для усіх досліджуваних титанових зразків у розчині Рінгера демонструють знижену ємнісну петлю, яка може бути пов’язана з процесом переносу заряду на межі поділу робочий електрод (сплав ВТ6)/розчин. Найбільший

діаметр має ємнісна петля сплаву, виготовленого 3D друком після термічної обробки, що вказує на найнижчу швидкість корозії. Дані з графіків Боде (рис. 5д, е) добре корелюють з графіком Найквіста (рис. 5г). Термічна обробка підвищує корозійну тривкість сплаву, отриманого 3D друком, оскільки забезпечує вищу величину імпедансу |Z| на найнижчій частоті.



а, г – Графіки Найквіста; б, в, д, е – Боде; а-в – 20%-ий розчин хлоридної кислоти; г-е –розчин Рінгера; 1 – традиційно у вихідному стані; 2 – 3D друком у вихідному стані; 3 – 3D друком після термічної обробки

Рисунок 5 – Імпедансна спектроскопія титанового сплаву ВТ6, виготовленого за різними технологіями та після його термічної обробки, у різних корозивних середовищах

Джерело: розроблено автором

Відтак, титановий сплав ВТ6, отриманий 3D друком, має гіршу корозійну тривкість, ніж отриманий традиційно. Очевидно, що таке погіршення його корозійної тривкості пов’язано зі структурними особливостями, а також з присутністю залишкових напружень, що негативно впливатимуть на стійкість до розчинення за рахунок пришвидшення дифузійних процесів. Проведення термічної обробки дозволяє покращити корозійну тривкість титанового сплаву за рахунок зниження у матеріалі як метастабільної α'-фази, так і залишкових напружень. Під час термічного оброблення відбувається виділення β-фази, яка є стабільнішою, ніж α- або α'-фази, і, як наслідок, покращує корозійну тривкість.

Висновки. Титановий сплав, отриманий 3D друком, забезпечує нижчу корозійну тривкість в досліджуваних середовищах порівняно з традиційно отриманим, що зумовлено наявністю метастабільної мартенситної структури та залишкових напружень у структурі. Досліджено вплив термічної обробки, проведеної за температури нижче температури поліморфного перетворення α→β, на мікроструктуру та корозійну тривкість сплаву ВТ6, отриманого 3D друком, у 20%-му водному розчині хлоридної кислоти та у розчині Рінгера. Було встановлено, що така термічна обробка призводить до покращення втричі показників корозійної тривкості сплаву в розчині Рінгера, порівняно з традиційно отриманим сплавом, і наближує до рівня традиційно

отриманого у 20%-му розчині хлоридної кислоти завдяки зменшенню нерівноважної фази мартенситу α′ та росту β-фази, а також зменшенню мікродеформації в α/α′ ґратці.

Роботу виконано за часткової фінансової підтримки Національного фонду досліджень України в рамках проєкту 2025.07/0035 за конкурсом «Передова наука в Україні 2026-2028».

Список літератури

1. Titanium for consumer applications / In: F. Froes and M. Qian, M. Niinomi (Eds). An introduction to titanium in consumer applications / F.H. (Sam) Froes, M. Qian, and M. Niinomi. Elsevier, 2019. P. 1-12. DOI: 10.1016/B978-0-12-815820-3.00001-0
2. Comparative study on the densification process of different titanium powders / S. Dong, G. Ma, P. Lei, T. Cheng, D. Savvakin, O. Ivasishin . *Advanced Powder Technology.* 2021. 32. P. 2300-2310. DOI: 10.1016/j.apt.2021.05.009
3. Chen T., Suryanarayana C., Yang C. Advanced titanium materials processed from titanium hydride powder. *Powder Technol.* 2023. 423. Article number 118504. DOI: 10.1016/j.powtec.2023.118504
4. Titanium powder metallurgy / In: M. Qian, and F.H. (Sam) Froes (Eds). Low-cost titanium hydride powder metallurgy / O. Ivasishin and V. Moxson. Butterworth-Heinemann, 2015. P. 117-148. DOI: 10.1016/B978-0-12-800054-0.00008-3
5. Corrosion behavior of near-alpha titanium alloy fabricated by additive manufacturing / S. Lavrys, I. Pohrelyuk, H. Veselivska, A. Skrebtsov, J. Kononenko, and Y. Marchenko . *Materials and Corrosion.* 2022. 73. P. 2063-2070. DOI: 10.1002/maco.202213105
6. Additive manufacturing of titanium-based alloys. A review of methods, properties, challenges, and prospects / T.S. Tshephe, S.O. Akinwamide, E. Olevsky, and P.A. Olubambi . *Heliyon.* 2022. 8. e09041. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e09041
7. Mechanism of corrosion protection in reinforced Ti-6Al-4V alloy by wire arc additive manufacturing using magnetic arc oscillation / Z. Shao, B. Wu, P. Li, W. Ma, H. Tan, H. Li . *Materials Characterization*. 2023. 199. 112844. DOI: 10.1016/j.matchar.2023.112844.
8. Dutta B. and (Sam) Froes F.H.. The additive manufacturing (AM) of titanium alloys . *Metal Powder Report.* 2017. 72. P. 96-106. DOI: 10.1016/j.mprp.2016.12.062
9. Additive manufacturing of Ti-6Al-4V parts through laser metal deposition (LMD): Process, microstructure, and mechanical properties / A. Azarniya, X.G. Colera, M.J. Mirzaali, S. Sovizi, F. Bartolomeu, M.S. Weglowski, W.W. Wits, C.Y. Yap, J. Ahn, G. Miranda, F.S. Silva, H.R.M. Hosseini, S. Ramakrishna, and A.A. Zadpoor. . *Journal of Alloys and Compounds.* 2019. 804. P. 163-191. DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.04.255
10. Impact of additive manufacturing on titanium supply chain: Case of titanium alloys in automotive and aerospace industries / P. Nyamekye, S. Rahimpour Golroudbary, H. Piili, P. Luukka, A. Kraslawski . *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*. 2023. 6. 100112. DOI: 10.1016/j.aime.2023.100112
11. Wire-Based Additive Manufacturing of Ti-6Al-4V Using Electron Beam Technique / F. Pixner, F. Warchomicka, P. Peter, A. Steuwer, M. Colliander, R. Pederson, and N. Enzinger . *Materials*. 2020. 13(15). 3310. DOI: 10.3390/ma13153310
12. Review on Electron Beam Based Additive Manufacturing / S. Negi, A.A. Nambolan, S. Kapil, P.S. Joshi, R. Manivannan, K.P. Karunakaran, P. Bhargava . *Rapid Prototyping Journal*. 2020. 26(3). P. 485-498. DOI: 10.1108/RPJ-07-2019-0182
13. Microstructure and Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Cruciform Structure Fabricated by Coaxial Electron Beam Wire-Feed Additive Manufacturing / M. Wang, J. Hu, J. Zhu, K. Zhang, D. Kovalchuk, Y. Yang, H. Wang, L. Zhang, A. Huang . *Journal of Alloys and Compounds.* 2023. 960. 170943. DOI: 10.1016/j.jallcom.2023.170943
14. Additive Manufacturing of Ti6Al4V Alloy: A review / S. Liu, Y.C. Shin . *Materials & Design*. 2019. 164. 107552. DOI: 10.1016/j.matdes.2018.107552
15. Yumak N. Post-processing heat treatment of titanium alloys manufactured by additive manufacturing technologies. In: Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. Elsevier. 2024. DOI: 10.1016/B978-0-323-96020-5.00257-0
16. Титановые сплавы для авиационной промышленности Украины / С.Л. Антонюк, А.Г. Моляр, А.Н. Калинюк, В.Н. Замков . *Sovremennaya elektrometallurgiya*. 2003. №1. С. 10-14. https://nasplib.isofts.kiev.ua/handle/123456789/94055

17. Corrosion resistance characteristics of a Ti-6Al-4V ELI alloy fabricated by electron beam melting after the applied post-process treatment methods. / P. Szymczyk-Ziółkowska, V. Hoppe, J. Gąsiorek, M. Rusińska, D. Kęszycki, Ł. Szczepański, R. Dudek-Wicher, J. Detyna . *Biocybernetics and Biomedical Engineering*. 2021. 41. P. 1575-1588. DOI: 10.1016/j.bbe.2021.10.002
18. Corrosion behavior of additively manufactured Ti-6Al-4V parts and the effect of post annealing / A.H. Ettefagh, C. Zeng, S. Guo, J. Raush . *Additive Manufacturing*. 2019. 28. P. 252-258. DOI: 10.1016/j.addma.2019.05.011

References

1. Froes, F., Qian, M., & Niinomi, M. (Eds). 2019. Titanium for consumer applications / An introduction to titanium in consumer applications . Elsevier, P. 1-12. DOI: 10.1016/B978-0-12-815820-3.00001-0
2. Dong, S., Ma, G., Lei, P., Cheng, T., Savvakin, D., & Ivasishin, O. (2021). Comparative study on the densification process of different titanium powders . *Advanced Powder Technology,* 32, pp. 2300-2310. DOI: 10.1016/j.apt.2021.05.009
3. Chen T., Suryanarayana C., &Yang C. (2023). Advanced titanium materials processed from titanium hydride powder. *Powder Technol,* 423. Article number 118504. DOI: 10.1016/j.powtec.2023.118504
4. Ivasishin, O., & Moxson, V. (2015). *Titanium powder metallurgy* . M. Qian, & F.H. (Sam) Froes (Eds). Low-cost titanium hydride powder metallurgy . Butterworth-Heinemann, P. 117-148. DOI: 10.1016/B978-0-12-800054-0.00008-3
5. Lavrys, S., Pohrelyuk, I., Veselivska, H., Skrebtsov, A., Kononenko, J., & Marchenko, Y. (2022). Corrosion behavior of near-alpha titanium alloy fabricated by additive manufacturing . *Materials and Corrosion,* 73, P. 2063-2070. DOI: 10.1002/maco.202213105
6. Tshephe, T.S., Akinwamide, S.O., Olevsky, E., & Olubambi, P.A. (2022). Additive manufacturing of titanium-based alloys. A review of methods, properties, challenges, and prospects . *Heliyon,* 8, e09041. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e09041
7. Shao, Z., Wu, B., Li, P., Ma, W., Tan, H. & Li, H. (2023). Mechanism of corrosion protection in reinforced Ti-6Al-4V alloy by wire arc additive manufacturing using magnetic arc oscillation . *Materials Characterization,* 199, 112844. DOI: 10.1016/j.matchar.2023.112844.
8. Dutta, B., & (Sam) Froes, F.H. (2017). The additive manufacturing (AM) of titanium alloys . *Metal Powder Report,* 72, P. 96-106. DOI: 10.1016/j.mprp.2016.12.062
9. Azarniya, A., Colera, X.G., Mirzaali, M.J., Sovizi, S., Bartolomeu, F., Weglowski, M.S., Wits, W.W., et al. (2019). Additive manufacturing of Ti-6Al-4V parts through laser metal deposition (LMD): Process, microstructure, and mechanical properties . *Journal of Alloys and Compounds,* 804, P. 163-191. DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.04.255
10. Nyamekye, P., Rahimpour Golroudbary, S., Piili, H., Luukka, P., & Kraslawski, A. (2023). Impact of additive manufacturing on titanium supply chain: Case of titanium alloys in automotive and aerospace industries . *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering,* 6, 100112. DOI: 10.1016/j.aime.2023.100112
11. F. Pixner, F. Warchomicka, P. Peter, A. Steuwer, M. Colliander, R. Pederson, and N. Enzinger (2020). Wire-Based Additive Manufacturing of Ti-6Al-4V Using Electron Beam Technique. *Materials,* 13(15). 3310. DOI: 10.3390/ma13153310
12. Negi, S., Nambolan, A.A., Kapil, S., Joshi, P.S., Manivannan, R., Karunakaran, K.P., & Bhargava, P. (2020). Review on Electron Beam Based Additive Manufacturing *Rapid Prototyping Journal*, 26(3), P. 485-498. DOI: 10.1108/RPJ-07-2019-0182
13. Wang, M., Hu, J., Zhu, J., Zhang, K., Kovalchuk, D., Yang, Y., Wang, H., Zhang, L., & Huang, A. (2023). Microstructure and Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Cruciform Structure Fabricated by Coaxial Electron Beam Wire-Feed Additive Manufacturing . *Journal of Alloys and Compounds,* 960, 170943. DOI: 10.1016/j.jallcom.2023.170943
14. Liu, S., & Shin, Y.C. (2019). Additive Manufacturing of Ti6Al4V Alloy: A review . *Materials & Design,* 164, 107552. DOI: 10.1016/j.matdes.2018.107552
15. Yumak, N. (2024). Post-processing heat treatment of titanium alloys manufactured by additive manufacturing technologies. In: Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. Elsevier. DOI: 10.1016/B978-0-323-96020-5.00257-0
16. Antoniuk, S.L., Molyar, A.G., Kalinyuk, A.N., & Zamkov, V.N. (2003). Titanium Alloys for the Ukrainian Aviation Industry . *Modern Electrometallurgy*, 1, 10-14.
17. Szymczyk-Ziółkowska, P., Hoppe, V., Gąsiorek, J., Rusińska, M., Kęszycki, D., Szczepański, Ł., Dudek-Wicher, R., & Detyna, J. (2021). Corrosion resistance characteristics of a Ti-6Al-4V ELI alloy fabricated

by electron beam melting after the applied post-process treatment methods . *Biocybernetics and Biomedical Engineering,* 41, P. 1575-1588. DOI: 10.1016/j.bbe.2021.10.002

18. Ettefagh, A.H., Zeng, C., Guo, S., & Raush, J. (2019). Corrosion behavior of additively manufactured Ti-6Al-4V parts and the effect of post annealing . *Additive Manufacturing*, 28, P. 252-258. DOI: 10.1016/j.addma.2019.05.011

Iryna Pohrelyuk, Prof., D. tech. sci., **Serhii Lavrys,** Senior research fellow, PhD tech. sci., **Olena-Mariia Danyliak,** Senior research fellow, PhD chem. sci., **Oleh Tkachuk,** Senior research fellow, PhD tech. sci., **Halyna Veselivs'ka,** Senior research fellow, PhD tech. sci., **Roman Proskurnyak,** PhD tech. sci.
Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, Lviv, Ukraine

The Effect of Heat Treatment on the Microstructure and Properties of a 3D-Printed VT6 Titanium Alloy

The article aims to investigate the effect of heat treatment on the structure, micromechanical properties, and corrosion resistance of the 3D-printed VT6 titanium alloy, compared to those of the conventionally produced alloy.

This study examined samples of VT6 titanium alloy with identical chemical compositions, produced using selective laser melting (SLM) and conventional magnesium-thermal reduction, remelting, and deformation processes. The heat treatment of the 3D printed alloy was carried out in several stages: heating to 800°C at a rate of ≤ 80°C/h, holding for 2 hours → cooling to 500°C at a rate of ≤ 150°C/h, holding for 0.5 hours → cooling with the furnace to room temperature. The treatment was performed in a vacuum ($P = 10^{-3}$ Pa). According to metallographic analysis, the conventionally produced VT6 titanium alloy exhibits a typical equiaxed structure. In contrast, the microstructure of the titanium alloy produced by 3D printing is characterized by a needle-like martensitic structure, which is evidently due to the high heating and cooling rates during the alloy's production. As a result of heat treatment, the metastable martensitic microstructure transforms into an (α+β) two-phase lamellar structure

The research revealed that the titanium alloy produced by 3D printing exhibits lower corrosion resistance in the tested environments compared to the conventionally produced alloy, which is attributed to the presence of a metastable martensitic structure and residual stresses within the structure. The effect of heat treatment performed at a temperature below the α→β polymorphic transformation temperature on the microstructure and corrosion resistance of the 3D-printed VT6 alloy in a 20% aqueous hydrochloric acid solution and in Ringer's solution was investigated. It was found that such heat treatment leads to a threefold improvement in the alloy's corrosion resistance in Ringer's solution compared to the conventionally produced alloy, and brings it closer to the level of the conventionally produced alloy in a 20% hydrochloric acid solution due to the reduction of the non-equilibrium α′ martensite phase and the growth of the β-phase, as well as the reduction of microdeformation in the α/α′ lattice.

VT6 titanium alloy, 3D printing, heat treatment, microstructure, micromechanical properties, corrosion resistance

Одержано (Received) 06.11.2025 *Прорецензовано (Reviewed) 27.11.2025*
Прийнято до друку (Approved) 30.01.2026