

Корозійна стійкість титанових сплавів, отриманих методами адитивних технологій

С. В. Кирилаха, аспірантка, lanakirilaha@gmail.com,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5688-5616>

Національний університет «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна

Титанові сплави є широко використовуваними конструкційними матеріалами, що знаходять застосування в умовах агресивних середовищ, зокрема в авіаційній, медичній та енергетичній промисловості. Завдяки своїм високим механічним властивостям, корозійній стійкості та біосумісності, титанові сплави є оптимальним вибором для виготовлення відповідальних конструкцій. Водночас, важливим напрямом досліджень є розробка нових методів підвищення їх корозійної стійкості, зокрема в умовах екстремальних температур і агресивних середовищ, а також вдосконалення технологій їх виробництва, зокрема через використання адитивних технологій. На основі даних літератури виконано порівняльну оцінку корозійної стійкості α - та псевдо- α -титанових сплавів марок VT1-0 та VT20 (Ti–Al–Mo–V–Zr), виготовлених традиційною та адитивною технологіями (електронно-променево плавлення). Аналіз показав, що сплави, отримані адитивним методом, мають нижчу корозійну стійкість у 20 %-му розчині хлоридної кислоти порівняно з тими, що виготовлені традиційно. Виявлено, що погіршення корозійної стійкості пов'язано з утворенням структури Відмаништета та метастабільного мартенситу під час адитивного виробництва. Показано корозійну стійкість сплаву VT1-0, отриманого адитивними технологіями. Доведено, що швидкість корозії перехідної зони складає $0,394 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$, вона нижча за VT1-0, але вища за VT20. Подальший аналіз може бути спрямований на підтвердження цього явища, визначення його причин, а також вивчення впливу мікроструктури, утвореної під час адитивного процесу, на корозійну стійкість титанових сплавів. Важливо також оцінити роль внутрішніх дефектів та їх вплив на швидкість корозії, зокрема для сплаву VT1-0, та дослідити шляхи поліпшення корозійної стійкості через удосконалення процесів адитивного виробництва.

Ключові слова: титанові сплави; адитивні технології; фракція; напроцування; електронно-променево плавлення; корозійна стійкість; 3D наплавка; несферичний порошок титану; HDH порошок титану, структура.

Титанові сплави завдяки своїм технологічним перевагам є універсальним конструкційним матеріалом, що широко застосовуються для виготовлення відповідальних конструкцій, що експлуатуються в агресивних середовищах. Зокрема деталей авіаційних і газотурбінних двигунів (обшивка літаків, диски й лопатки компресорів тощо), в ракетній техніці (корпуси двигунів, балони для стиснутих і скраплених газів, сопла тощо), в хімічній промисловості (обладнання для таких середовищ як хлор і його розчини, теплообмінників,

які працюють в азотній кислоті), суднобудуванні (гребні гвинти, обшивки морських суден, підводних човнів, торпед), в енергомашинобудуванні (диски й лопаті стаціонарних турбін), в криогенній техніці.

Легкість, висока міцність в інтервалі температур від -250°C до помірно високих ($300\ldots 600^{\circ}\text{C}$), висока корозійна стійкість в агресивних середовищах, забезпечує титановим сплавам широке застосування в багатьох галузях промисловості [1-4].

Титан легують для покращення механічних властивостей такими металами як алюмінієм (до 8 %), молібденом (до 8 %), марганцем (до 2 %), хромом (до 11 %), оловом (до 3 %), ванадієм (до 6 %), залізом (до 2 %), цирконієм (до 12 %), ніобієм (до 2 %), інколи – для підвищення корозійної стійкості (паладієм до 0,2 %) [5].

Титан та його сплави стійкі у більш агресивніших середовищах, ніж сплави на основі заліза, нікелю, алюмінію. Для різноманітного технічного використання особливо важлива їх підвищена стійкість у середовищах, що містять хлор-іони, якої так бракувало класу конструкційних матеріалів, що найчастіше застосовується, на основі заліза, включаючи і корозійностійкі сталі [6]. Виняткова властивість титану – це його повна корозійна стійкість у прісній, морській воді та морській атмосфері. У морській воді при 25°C потенціал титану близький до $+0,09\text{ В}$, тобто позитивніше, ніж у цинку, заліза, алюмінію та міді у цьому середовищі. Титан стійкий у середовищах, що мають окислювальні властивості і містять хлорид-іони. Так, титан стійкий у розчинах: FeCl_3 концентрації до 30 % і до 100°C , CuCl_2 – до 20 % і 100°C , HgCl_2 всіх концентрацій до 100°C , AlCl_3 до 25 % і до 60°C , NaCl всіх концентрацій до 100°C , у 100 % хлороцтової та дихлороцтової кислоти до 100°C . Відзначено також підвищену стійкість титану та його сплавів проти піттингу, міжкристалітної та щавлевої корозії, корозійної втоми та розтріскування [7, 8].

Сучасні адитивні технології (АТ) поступово заміщують традиційні методи виготовлення виробів, такі як лиття, обробка різанням, обробка тиском та інші [9]. АТ особливо перспективні для виробництва компонентів, що працюють в агресивних середовищах, таких як хімічна та металургійна промисловості, завдяки високому коефіцієнту використання матеріалу, зокрема до 90 % економії в дрібносерійних та одиничних виробництвах, та екологічності процесу. Можливість виготовлення деталей складної просторової конфігурації з отворами чи внутрішніми пустотами, а також швидкого виготовлення деталей такими методами, гнучкість виробництва швидко проектування [10].

АТ дозволяють виготовляти дешеві титанові вироби для металургійної, енергетичної, хімічної та нафтовидобувної промисловості, що контактують з агресивними середовищами. Наприклад, титанові сплави використовують у металургійній промисловості під час виготовлення титану (хлорування), де вимогою до таких деталей є їх висока корозійна тривкість у розчинах хлору [11, 12]. У хімічній промисловості – для виготовлення комплектуючого обладнання для відновлювання агресивних кислот, в т.ч. і хлоридної [13].

Водночас питання корозійної тривкості титанових сплавів, виготовлених адитивними методами, залишається недостатньо дослідженим [14]. У зв'язку з цим актуальними є подальші дослідження, спрямовані на підвищення корозійної стійкості титанових сплавів та оптимізацію методів їх захисту.

Метою роботи є проведення порівняльного аналізу даних літератури щодо корозійної стійкості титанових сплавів, виготовлених адитивними методами, у розчині хлоридної кислоти та їх порівняння зі сплавами, отриманими традиційними технологіями. Оцінити швидкість корозії титанового сплаву BT1-0, отриманого адитивним наплавленням на підкладку з сплаву BT20.

Авторами С. М. Лаврись та І. М. Погрелюк [15] було досліджено α - та псевдо- α -титанові сплави марки BT1-0 та BT20 (Ti–Al–Mo–V–Zr), виготовлені за традиційною та адитивною технологіями, з такими хімічними складами (wt, %): BT1-0 – 0,25 Fe, 0,1 Si, 0,07 C, 0,04 N, 0,2 O, 0,01 H, решта Ti; BT20 – 5,5...7,0 Al, 1,5...2,5 Zr, 0,5...2,0 Mo, 0,8...2,5 V, 0,25 Fe, 0,15 Si, 0,1 C, 0,05 N, 0,15 O, 0,015 H, решта Ti, згідно з ГОСТ 19807-91.

Для адитивного виготовлення використовували електронно-променеве плавлення (ЕПП). Нарощування титанових сплавів на титанових пластинах виконували на установці СВ-212М з імпульсним джерелом живлення 60 kV/60 kW та електронно-променевою гарматою ЄЛС, розробленою в Інституті електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України [16]. Процес відбувався у вакуумній камері (13×10^{-3} Па), де сфокусований пучок електронів створював зону плавлення та формував виріб за заданою траєкторією. Після кожного шару плавлення порошку камеру відкривали та наносили наступний шар, виконуючи пошарове нарощування титанових сплавів. Для ЕПП використовували вітчизняний титановий порошок технічної чистоти або легований (Ti–Al–Mo–V–Zr) несферичної форми, отриманий методом гідрування-дегідрування. Мікроструктуру титанових сплавів вивчали на мікроскопі “Eriquant” з камерою та комп'ютерною приставкою. ДюрOMETричні дослідження проводились на мікротвердомірі PMT-3М з навантаженням 0,49 N на індентор Віккерса.

Для корозійних досліджень виготовляли зразки розмірами 12x12x2 mm. Корозійну швидкість визначали гравіметричним методом за зміною маси зразків після експозиції в агресивному середовищі. Досліджували 1440 h у 20 %-му розчині хлоридної кислоти за кімнатної температури 20 °C. Дослідження проводили на потенціостаті СВА-1Б-М при площі 1 cm². Вимірювання за триелектродною схемою (титановий сплав як робочий електрод) у діапазоні – 1,0...2,5 V. Густина струму (i_{corr}) та потенціал (E_{corr}) визначали екстраполяцією кривих Тафеля.

За результатами гравіметричного аналізу (рис. 1 а) після 1440 h експозиції у розчині HCl титанові сплави, отримані за АТ, мають вищу швидкість корозії порівняно з ТТ. ТТ забезпечує нижчу корозійну тривкість сплаву BT1-0 (~ 2,5 рази) порівняно з BT20. Проте різниця між швидкостями корозії сплавів BT1-0 та BT20, виготовлених за АТ, мінімальна, при цьому сплав BT1-0 має кращі корозійні властивості.

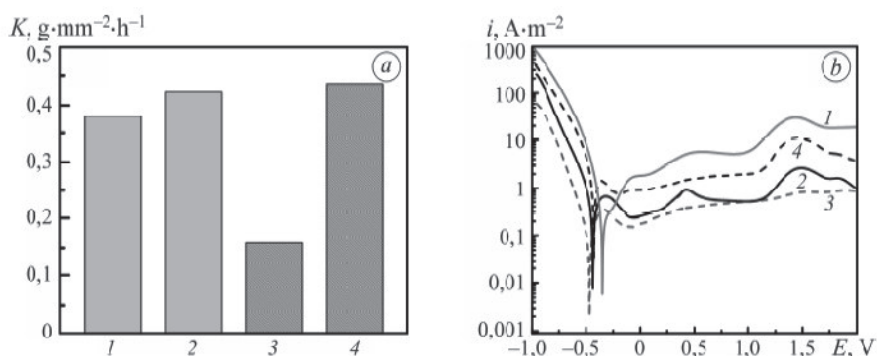


Рис. 1. Швидкість корозії K (а) та поляризаційні криві (б) титанових сплавів BT1-0 (1, 2) та BT20 (3, 4), виготовлених за ТТ (1, 3) та АТ (2, 4) у 20 %-му HCl [15].

Fig. 1. Corrosion rate K (a) and polarization curves (b) of BT1-0 (1, 2) and BT20 titanium alloys (3, 4), manufactured by TT (1, 3) and AM (2, 4) in 20 % HCl solution [15].

Електрохімічні результати узгоджуються з гравіметричними (рис. 2). Потенціодинамічна поляризація показала активно-пасивну поведінку, особливо для BT20 (рис. 2 б) [17]. Технологія виготовлення не впливає на характер кривих, але змінює електрохімічні параметри корозії.

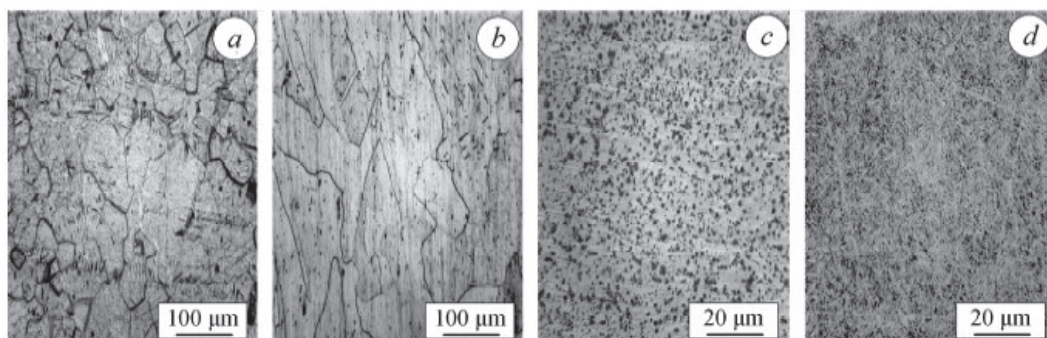


Рис. 2. Мікроструктура титанових сплавів BT1-0 (а, б) та BT20 (с, д), виготовлених за ТТ (а, с) та АТ (б, д) [15].

Fig. 2. Microstructure of BT1-0 (a, b) and BT20 titanium alloys (c, d), manufactured by TT (a, c) and AM (b, d) [15].

Згідно з результатами (табл. 1 та рис. 2 б), сплави, виготовлені за АТ, мають вищі значення струму корозії порівняно з ТТ, що вказує на інтенсивнішу корозію та сповільнену пасивацію. Потенціал корозії між сплавами різних технологій не має значних відмінностей. Найвищий потенціал корозії спостерігається у сплаву BT1-0, виготовленому за ТТ, що свідчить про його модифікацію та формування стабільнішої пасивної плівки [15, 18, 19].

Титанові сплави, виготовлені за АТ, мають гіршу корозійну тривкість через нерівноважну структуру (Відманштетта для BT1-0 та мартенситну α' -фазу для BT20), що спричиняє залишкові напруження та підвищену активність корозії. Натомість сплави ТТ з рівноважною структурою (α або $\alpha + \beta$) демонструють вищу стійкість до корозії (рис. 2).

Сплав BT20 (ТТ) має вищу корозійну тривкість завдяки вкрапленням ZrO_2 у пасивну плівку TiO_2 , що підвищує її цілісність. Натомість BT20

Таблиця 1

Електрохімічні параметри для титанових сплавів, виготовлених за різними технологіями у 20 %-му HCl [15]

Table 1

Electrochemical parameters for titanium alloys manufactured by different technologies in 20 % HCl [15]

Сплав	Технологія	E_{corr}, V	$i_{\text{corr}}, A \cdot m^{-2}$
BT1-0	ТТ	-0,3859	0,242
BT1-0	АТ	-0,4427	0,363
BT20	ТТ	-0,4876	0,097
BT20	АТ	-0,4264	1,106

(АТ) поступається через відсутність β -фази та наявність метастабільної мартенситної α' -структури [15, 19]. Авторами [15] відзначено, що ТТ забезпечує нижчу корозійну тривкість сплаву BT1-0 (~2,5 рази), ніж сплаву BT20. Отже, титанові сплави, виготовлені за АТ, мають нижчу корозійну тривкість у 20 %-му розчині хлоридної кислоти порівняно з ТТ. Це пояснюється формуванням структури Відманштетта та метастабільного мартенситу під час ЕПП у α -(BT1-0) та псевдо- α -титанових (BT20) сплавах.

Згідно з [20] авторами проведено дослідження методом адитивного наплавлення, в результаті якого виготовлено зразки з титанового сплаву BT1-0. Для дослідження використовувався перспективний несферичний порошок титану марки BT1-0 з фракцією $-160 + 40$ мкм, отриманий за технологією гідрування-дегідрування (HDH). Технологічні характеристики, такі як текучість та насипна щільність, визначені методом Холла, для часток $\varnothing 5$ мм становлять 11,7 та 1,8 г/см³, відповідно. Процес HDH передбачає гідрування спеченого сплаву BT1-0, подрібнення гідрированого матеріалу до необхідної фракції, подальшу дегідрування та фракціонування шляхом ситового аналізу. Хімічний склад порошку BT1-0 наведено в таблиці 2.

Таблиця 2

Хімічний склад порошку BT1-0 [20]

Table 2

The chemical composition of the powder VT1-0 [20]

Вміст елементів, (не більше) мас. частка, %			Вміст домішок, % (не більше)		
Si	Fe	C	N	H	O
0,1	0,25	0,07	0,04	0,01	0,2

Адитивне наплавлення виконувалося на установці електронно-променевої зварки СВ 212М за допомогою спеціальної оснастки, що забезпечувала послідовне нанесення порошку [21]. Технологічні зразки мали

розміри $\sim 60 \times 20 \times 10$ мм. Наплавлення проводилося на підкладці зі сплаву VT20, обраного для мікроструктурної ідентифікації зон злиття. Корозійні випробування проводили в 20 % розчині HCl. Швидкість корозії визначали гравіметричним методом після 504 год експозиції при кімнатній температурі та доступі повітря. Швидкість корозії різних зон сплаву, виготовленого за адитивною технологією, показана на рисунку 3.

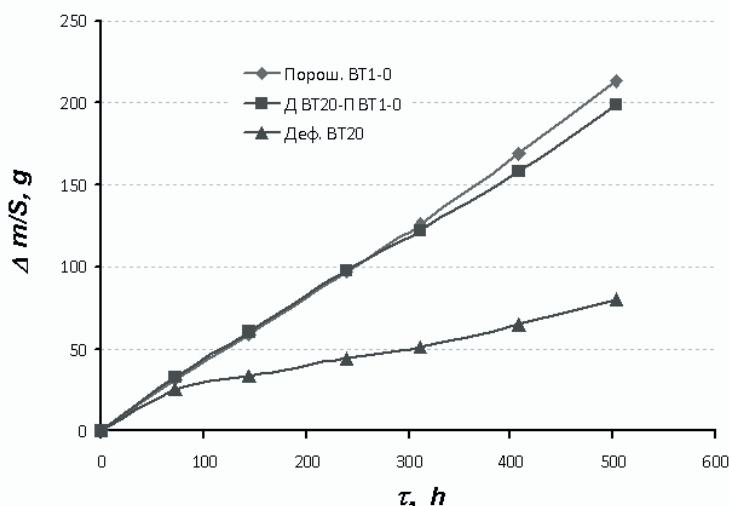


Рис. 3. Швидкість корозії на основі 504 годин різних зон зразка, наплавленого порошком VT1-0 на підкладку з деформованого сплаву VT20 за АТ [20].

Fig. 3. Corrosion rate, based on 504 hours (a) and corrosion dissolution kinetics (b) of different zones of the sample deposited with powder VT1-0 on a substrate of deformed alloy VT20 according to additive technology [20].

Швидкість корозії зони порошкового наплавленого титану VT1-0 у 2,7 раза вища за зону сплаву VT20. Це пояснюється наявністю легувальних елементів, таких як Мо та V, у сплаві VT20, які зменшують схильність до корозійного руйнування, а також значною кількістю внутрішніх пор у VT1-0.

Проведений аналіз даних свідчить, що титанові сплави, виготовлені за АТ, мають нижчу корозійну тривкість у 20 %-му розчині HCl порівняно зі сплавами ТТ через формування структури Відманштетта та метастабільного мартенситу під час ЕПП. Оцінка корозійної стійкості сплаву VT1-0, виготовленого методом адитивної наплавки, показала, що швидкість корозії VT1-0 в 2,7 рази вища за показники деформованого сплаву VT20 та складає $0,394 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$.

Література

1. U. Zwicker Titan und Titanlegierungen. Springer Verlag Berlin, Heidelberg. New York, 1974. – 512 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-80587-5>.
2. Froes F. H. Titanium: Physical Metallurgy, Processing, and Applications. ASM International, 2015. 450 p. <https://doi.org/10.31399/asm.tb.tpmpr.9781627083188>

3. Leyens C., Peters M. Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications. Wiley-VCH, 2003. 532 p. <https://doi.org/10.1002/3527602119>
4. Weng Y. Q., Dong H., Gan Y. Titanium Alloys: Advances in Properties Control. Elsevier, 2012. 389 p.
5. Froes F. H. Titanium Powder Metallurgy: Science, Technology and Applications. Elsevier, 2015. 402 p. <https://doi.org/10.31399/asm.tb.tpmpr.9781627083188>
6. Леговані сталі та сплави з особливими властивостями. Підручник / Куцова В.З., Ковзель М.А., Носко О.А. – Дніпропетровськ: НМетАУ, 2008. – 348 с.
7. Погрелюк І. М., Тарасюк В. К., Мицик Л. С. Корозійна тривкість титанових сплавів з оксинітридними покриттями в агресивних середовищах // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2016. – № 6. – С. 87-92.
8. Davis J. R. Corrosion Resistance of Titanium and Titanium Alloys. ASM International, 2000. 12 p.
9. Сучасна наука та освіта: стан, проблеми, перспективи. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції (м. Полтава, 20-21 березня 2023 року). Полтава: ДЗ «ЛНУ імені Тараса Шевченка», 2023. 777 с.
10. Dutta B. and Froes F. H. The additive manufacturing (AM) of titanium alloys // Met. Powder Rep. – 2017. – 72. – P. 96-106. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mprp.2016.12.062>
11. Капустян О. Є. Підвищення механічних і службових характеристик зварних з'єднань спеченого конструкційного матеріалу: Автореф. дис. канд. техн. наук. – Запоріжжя, 2018.
12. Riskin, J. Electrocorrosion and Protection of Metals / Ed.: Joseph Riskin // Corrosion Behavior Investigations of Titanium and its Alloys in the Media of Electrochemical Plants, Taking into Account the Attack by Anodic Leakage Currents (Chapter 6). – Elsevier, 2008. – P. 79-101. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53295-4.00006-5>
13. Su, B. The corrosion behavior of Ti-6Al-3Nb-2Zr-1Mo alloy: Effects of HCl concentration and temperature / B. Su, B. Wang, L. Luo, L. Wang, Y. Su, F. Wang, Y. Xu, B. Han, H. Huang, J. Guo, and H. Fu // J. Mat. Sci. Techn. – 2021. – 74. – 143-154. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2021.109812>
14. Kissel, H. (2021). Titanium powder and additive manufacturing: The perfect match. Metallurgical and Materials Transactions A, 76, 196-198. <https://doi.org/10.1016/j.mprp.2021.06.002>.
15. С. М. Лаврись, І. М. Погрелюк, І. М., & Х. С. Шляхетка (2022). Корозійна тривкість адитивно виготовлених титанових сплавів у хлоридній кислоті. Фізико-хімічна механіка матеріалів, 5, 23-29. [Physicochemical Mechanics of Materials, 5, 23-29]. <https://doi.org/10.1007/s11003-023-00702-5>
16. Нестеренков, В. М. Застосування адитивних електронно-променевих технологій для виготовлення деталей з порошків титанового сплаву BT1-0 / В. М. Нестеренков, В. А. Матвійчук, М. О. Русиник, О. В. Овчинников // Автоматическая сварка. – 2017. – С. 5-10. <https://doi.org/10.15407/as2017.03.01>
17. Pohrellyuk, I. M Corrosion properties of titanium obtained by the method of powder metallurgy / I. M Pohrellyuk, O. V Ovchynnykov, A. S. Skrebtsov, Kh. Shvachko, R. V. Proskurnyak, and S. M. Lavrys // Materials Science. – 2016. – 55, № 5. – P. 445-453. <https://doi.org/10.1007/s11106-016-9825-9>
18. Xiao, Y. On the microstructure and corrosion behaviors of selective laser melted CP-Ti and Ti-6Al-4V alloy in Hank's artificial body fluid / Y. Xiao, N. Dai, Y. Chen, J. Zhang, and S.-W. Choi // Mat. Res. Express. – 2019. – 6. – Article number: 126521. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab54d5>

19. Dai, N. Distinction in corrosion resistance of selective laser melted Ti-6Al-4V alloy on different planes / N. Dai, L. Zhang, J. Zhang, X. Zhang, Q. Ni, Y. Chen, M. Wu, and C. Yang // *Corr. Sci.* – 2017. – 52. – P. 730-710. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2016.06.009>
20. Скребцов, А. А., Проскурняк, Р. В., Марченко, Ю. А., Шевченко, В. Г., & Омельченко, О. С. (2019). Вплив адитивних технологій на корозію титанових сплавів. *Металознавство та термічна обробка металів*, (3), 55-60. <https://doi.org/10.30838/J.PMNTM.2413.250619.58.323>
21. Овчинников, А. В. Реализация аддитивных процессов сварки при проектировании и производстве деталей газотурбинных авиадвигателей / А. В. Овчинников, Ю. Ф. Басов, И. А. Петрик, А. А. Скребцов, Ю. А. Марченко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2017. – № 7(142). – С. 140.

References

1. Zwicker, U. (1974). *Titan und Titanlegierungen*. Springer Verlag. [in English]. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-80587-5>.
2. Froes, F. H. (2015). *Titanium: Physical metallurgy, processing, and applications*. ASM International. [in English]. <https://doi.org/10.31399/asm.tb.tpmmpa.9781627083188>
3. Leyens, C., & Peters, M. (2003). *Titanium and titanium alloys: Fundamentals and applications*. Wiley-VCH. [in English]. <https://doi.org/10.1002/3527602119>
4. Weng, Y. Q., Dong, H., & Gan, Y. (2012). *Titanium alloys: Advances in properties control*. Elsevier. [in English].
5. Froes, F. H. (2015). *Titanium powder metallurgy: Science, technology and applications*. Elsevier. [in English]. <https://doi.org/10.31399/asm.tb.tpmmpa.9781627083188>
6. Kutsova, V. Z., Kovzel, M. A., & Nosko, O. A. (2008). *Legovani stali ta splavy z osoblyvymy vlastyvostiamy* [Alloyed steels and alloys with special properties]. NMetAU. [in Ukrainian].
7. Pogrelyuk, I. M., Tarasyuk, V. K., & Mytsyk, L. S. (2016). Korozijna tryvkist' tytanovykh splaviv z oksinitrydnymy pokryvamy v ahresyvnnykh seredovyschakh [Corrosion resistance of titanium alloys with oxynitride coatings in aggressive environments]. *Fyzyko-khimichna mekhanika materialiv*, (6), 87-92 [in Ukrainian].
8. Davis, J. R. (2000). *Corrosion resistance of titanium and titanium alloys*. ASM International. [in English].
9. Sutska, T., & Lomakina, I. (2023). *Suchasna nauka ta osvita: stan, problemy, perspektyvy. Materialy Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii (m. Poltava, 20-21 bereznia 2023 roku)* [Modern science and education: State, issues, perspectives. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference (Poltava, March 20-21, 2023)]. Dnipro: D3 "LNU imeni Tarasa Shevchenka" [in Ukrainian].
10. Dutta, B., & Froes, F. H. (2017). The additive manufacturing (AM) of titanium alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 72, 96-106. [in English]. <https://doi.org/10.1016/j.mprp.2016.12.062>
11. Kapustian, O. Ye. (2018). Improving the mechanical and service properties of welded joints of sintered structural material (Author's abstract of PhD dissertation in technical sciences). Zaporizhzhia [in Ukrainian].
12. Riskin, J. (2008). Electrocorrosion and protection of metals. In J. Riskin (Ed.), *Corrosion behavior investigations of titanium and its alloys in the media of*

- electrochemical plants, taking into account the attack by anodic leakage currents* (Chapter 6, pp. 79-101). Elsevier. [in English]. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53295-4.00006-5>
13. Su, B., Wang, B., Luo, L., Wang, L., Su, Y., Wang, F., Xu, Y., Han, B., Huang, H., Guo, J., & Fu, H. (2021). The corrosion behavior of Ti-6Al-3Nb-2Zr-1Mo alloy: Effects of HCl concentration and temperature. *Journal of Materials Science and Technology*, 74, 143-154. [in English]. <https://doi.org/10.1016/j.jcorosci.2021.109812>
 14. Kissel, H. (2021). Titanium powder and additive manufacturing: The perfect match. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 76, 196-198. [in English]. <https://doi.org/10.1016/j.mprp.2021.06.002>
 15. Lavrysy, S. M., Pohreliuk, I. M., & Shlyakhetka, K. S. (2022). Corrosion resistance of additively manufactured titanium alloys in hydrochloric acid. *Physicochemical Mechanics of Materials*, 5, 23-29. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.1007/s11003-023-00702-5>
 16. Nesterenkov, V. M., Matviychuk, V. A., Rusynyk, M. O., & Ovchynnikov, O. V. (2017). Application of additive electron beam technologies for manufacturing parts from VT1-0 titanium alloy powder. *Avtomaticheskaya Svarka*, 5, 5-10 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/as2017.03.01>
 17. Pohrelyuk, I. M., Ovchynnikov, O. V., Skrebtsov, A. S., Shvachko, K., Proskurnyak, R. V., & Lavrys, S. M. (2016). Corrosion properties of titanium obtained by the method of powder metallurgy. *Materials Science*, 55(5), 445-453. [in English]. <https://doi.org/10.1007/s11106-016-9825-9>
 18. Xiao, Y., Dai, N., Chen, Y., Zhang, J., & Choi, S.-W. (2019). On the microstructure and corrosion behaviors of selective laser melted CP-Ti and Ti-6Al-4V alloy in Hank's artificial body fluid. *Materials Research Express*, 6, Article 126521. [in English]. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab54d5>
 19. Dai, N., Zhang, L., Zhang, J., Zhang, X., Ni, Q., Chen, Y., Wu, M., & Yang, C. (2017). Distinction in corrosion resistance of selective laser melted Ti-6Al-4V alloy on different planes. *Corrosion Science*, 52, 730-710. [in English]. <https://doi.org/10.1016/j.jcorosci.2016.06.009>
 20. Skrebtsov, A. A., Proskurnyak, R. V., Marchenko, Y. A., Shevchenko, V. G., & Omelchenko, O. S. (2019). The effect of additive technologies on the corrosion of titanium alloys. *Metallurgy and Heat Treatment of Metals*, (3), 55-60 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.30838/J.PMHTM.2413.250619.58.323>
 21. Ovchinnikov, A. V., Basov, Yu. F., Petrik, I. A., Skrebtsov, A. A., & Marchenko, Yu. A. (2017). Realization of additive welding processes in the design and manufacture of parts for gas turbine aircraft engines. *Aerospace Engineering and Technology*, 7(142), 140. [in Russian].

Одержано 25.02.25

Corrosion resistance of titanium alloys produced by additive manufacturing methods: new approaches to enhancing durability in aggressive environments

S. V. Kyrylakha, PhD Student, lanakirilaha@gmail.com,
ORCID <https://orcid.org/0009-0001-5688-5616>

National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine

Summary

Titanium alloys are widely used structural materials, applied in aggressive environments, particularly in the aerospace, medical, and energy industries. Due to their high mechanical properties, corrosion resistance, and biocompatibility, titanium alloys are an optimal choice for manufacturing critical components. At the same time, an important research direction is the development of new methods to enhance their corrosion resistance, especially in extreme temperatures and aggressive environments, as well as improving their production technologies, particularly through the use of additive manufacturing. A comparative assessment of the corrosion resistance of α - and pseudo- α -titanium alloys, grades VT1-0 and VT20 (Ti-Al-Mo-V-Zr), produced by traditional and additive manufacturing technologies (electron beam melting) has been conducted. The study showed that the alloys produced by the additive method exhibit lower corrosion resistance in a 20 % hydrochloric acid solution compared to those made by traditional methods. It was found that the deterioration in corrosion resistance is associated with the formation of Widmanstätten structure and metastable martensite during additive manufacturing. The corrosion resistance of the VT1-0 alloy, produced by additive technologies, was studied. It was established that the corrosion rate of the transition zone is 0.394 g/(m²·year), lower than that of VT1-0 but higher than that of VT20. Further studies may focus on confirming this phenomenon, identifying its causes, and investigating the impact of the microstructure formed during the additive process on the corrosion resistance of titanium alloys. It is also important to assess the role of internal defects and their impact on the corrosion rate, particularly for VT1-0, and explore ways to improve corrosion resistance through the optimization of additive manufacturing processes.

Keywords: Titanium alloys; additive manufacturing technologies; fraction; deposition; electron beam melting; corrosion resistance; 3D cladding; non-spherical titanium powder; HDH titanium powder; structure.