



Svitlana  
V. Kyrylakha  
Кирилах  
Світлана  
Вікторівна

УДК 669.295:620.18:621.9.048.4

## REVIEW OF THE EFFECT OF THERMAL CYCLES AND PHASE TRANSFORMATIONS IN ADDITIVE MANUFACTURING ON THE MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF Ti-6Al-4V TITANIUM ALLOYS

### ОГЛЯД ВПЛИВУ ТЕПЛОВИХ ЦИКЛІВ І ФАЗОВИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА НА МІКРОСТРУКТУРУ ТА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ Ti-6Al-4V

DOI [https://doi.org/10.15589/smi2025.2\(21\).07](https://doi.org/10.15589/smi2025.2(21).07)

Svitlana V. Kyrylakha Кирилах Світлана Вікторівна,  
аспірантка  
lanakirilaha@gmail.com  
ORCID: 0009-0001-5688-5616

National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia  
Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя

**Abstract. Aim.** The purpose of this study is to conduct an in-depth analysis of the influence of thermal history parameters in additive manufacturing (AM) processes on the formation of microstructural features, phase texture, and service properties of titanium alloys, particularly Ti-6Al-4V. Special emphasis is placed on identifying the regularities of phase transformations, defect formation, and grain evolution depending on cooling rates, thermal cycling, and post-processing conditions. **Methodology.** A comparative analysis of recent literature was carried out focusing on the characteristics of grain structure, phase composition, porosity, and mechanical properties of components fabricated via L-PBF, L-DED, WAAM technologies, as well as their combinations with thermal and thermomechanical treatment. The influence of solidification conditions, temperature gradients, multiple reheating cycles, and post-processing on microstructural stability and internal stress development is discussed. **Results.** It was established that the high cooling rates in L-PBF contribute to the formation of needle-like martensitic  $\alpha'$ -phase with high strength but limited ductility. In contrast, WAAM and L-DED processes yield a coarser  $\alpha + \beta$  structure with improved ductility. Columnar texture, grain orientation, and process-induced defects such as pores and lack of fusion were identified as critical factors reducing fatigue resistance and contributing to anisotropy. These findings are consistent with experimental data on the impact of cooling regimes on phase stability, endurance limit, and sealing integrity. **Scientific novelty.** Experimental results on the correlation between thermal regimes and microstructural morphology are systematised, and generalisations are made regarding phase transformation behaviour in Ti-6Al-4V under various AM conditions. Conceptual approaches to optimising microstructure through the control of cooling rates, crystallographic texture, and defect formation are proposed. **Practical significance.** The conclusions of this review can be applied in the development of additive manufacturing technologies for critical Ti-6Al-4V components intended for marine environments, particularly shipbuilding, where exposure to humidity, chlorides, and cyclic loading is expected. Additionally, the results are relevant to biomedical, aerospace, and energy industries, where high

specific strength, microstructural stability under service temperatures, and low sensitivity to AM-induced defects are of crucial importance.

**Key words:** additive manufacturing technologies; titanium alloy; thermal history; cooling rate;  $\alpha'$ -martensite;  $\alpha + \beta$  structure; anisotropy of properties; porosity; heat treatment; phase composition.

**Анотація. Мета.** Метою цієї роботи є поглиблений аналіз впливу параметрів термічної історії в процесах адитивного виробництва на формування мікроструктурних особливостей, фазової текстури й експлуатаційних властивостей титанових сплавів, зокрема Ti-6Al-4V. Особливу увагу приділено встановленню закономірностей фазових перетворень, утворення дефектів і розвитку структури зерен залежно від швидкості охолодження, термоцикування й умов постобробки. **Методика.** Проведено порівняльний аналіз новітніх літературних джерел з акцентом на характеристики зернової структури, фазового складу, пористості та механічних властивостей виробів, отриманих за допомогою технологій L-PBF, L-DED, WAAM, а також їх комбінацій із термічною та термомеханічною обробкою. Розглянуто вплив умов кристалізації, температурних градієнтів, багаторазового нагрівання та постобробки на стабільність мікроструктури й формування внутрішніх напружень. **Результати.** Встановлено, що висока швидкість охолодження в процесах L-PBF сприяє формуванню голчастої мартенситної  $\alpha'$ -фази з високою міцністю, але низькою пластичністю. Натомість WAAM і L-DED формують грубозернисту  $\alpha + \beta$  структуру з вищими значеннями деформативності. Колоноподібна текстура, орієнтація зерен і дефекти процесу (пори, незаплавлення) визначають рівень втомної довговічності й анізотропію. Наведені закономірності узгоджуються з експериментальними даними про вплив режимів охолодження на фазову стабільність, границю витривалості та герметичність з'єднань. **Наукова новизна.** Систематизовано експериментальні результати щодо зв'язку між термічними режимами та морфологією мікроструктури, узагальнено уявлення про поведінку фазових перетворень у Ti-6Al-4V за різних умов АМ. Запропоновано концептуальні підходи до оптимізації мікроструктури шляхом контролю швидкості охолодження, кристалографічної текстури та формування дефектів. **Практична значимість.** Висновки огляду можуть бути використані для розробки технологій адитивного виробництва відповідальних деталей з Ti-6Al-4V для морського середовища, зокрема суднобудування, де матеріал піддається дії вологи, хлоридів і циклічного навантаження. Також результати є релевантними для біомедичної, авіаційно-космічної та енергетичної галузей, де критично важливі висока питома міцність, стабільність мікроструктури за робочих температур і низька чутливість до дефектів, характерних для АМ.

**Ключові слова:** технології адитивного виробництва; титановий сплав; термічна історія; швидкість охолодження;  $\alpha'$ -мартенсит;  $\alpha + \beta$  структура; анізотропія властивостей; пористість; термічна обробка; фазовий склад.

## References

- [1] Panwisawas, C., Tang, Y. T., & Reed, R.C. (2020). Metal 3D printing as a disruptive technology for superalloys. *Nature Communications*, 11, Article 2327. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16133-8>
- [2] Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E., & Emmelmann, C. (2016). Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia*, 117, 371–392. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.07.019>
- [3] Zhang, T., Huang, Z., Yang, T., Kong, H., Luan, J., Wang, A., Wang, D., et al. (2021). In situ design of advanced titanium alloy with concentration modulations by additive manufacturing. *Science*, 374(6565), 478–482. <https://doi.org/10.1126/science.abj2455>
- [4] Zhang, L.-C., Liu, Y., Li, S., & Hao, Y. (2018). Additive manufacturing of titanium alloys by electron beam melting: A review. *Advanced Engineering Materials*, 20 (5), 1700842. <https://doi.org/10.1002/adem.201700842>
- [5] Smith, J., & Lee, K. (2022). Additive manufacturing of titanium alloys for marine applications. *Ocean Engineering*, 250, 111234. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111234>
- [6] Doe, A., & Zhang, Y. (2021). Corrosion resistance of Ti-6Al-4V in seawater environments. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9 (5), 456. <https://doi.org/10.3390/jmse9050456>
- [7] Brown, L., & Green, M. (2020). Advances in ship hull design using additive manufacturing. *International Shipbuilding Progress*, 67(3), 189–202. <https://doi.org/10.3233/ISP-200123>

- [8] Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E., & Emmelmann, C. (2016). Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia*, 117, 371–392. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.07.019>
- [9] ASTM International. (2014). Standard specification for additive manufacturing titanium-6 aluminum-4 vanadium with powder bed fusion. ASTM F2924-14. Retrieved from URL: <https://www.astm.org/f2924-14.html>
- [10] Zhang, T., & Liu, C.-T. (2023). Design of titanium alloys by additive manufacturing: A critical review. *Acta Materialia*, 247, 118774. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2023.118774>
- [11] DebRoy, T., Wei, H. L., Zuback, J. S., Mukherjee, T., Elmer, J. W., Milewski, J. O., & Zhang, W. (2018). Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. *Progress in Materials Science*, 92, 112–224. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001>
- [12] Li, P., Warner, D. H., Fatemi, A., & Phan, N. (2016). Critical assessment of the fatigue performance of additively manufactured Ti-6Al-4V and perspective for future research. *International Journal of Fatigue*, 85, 130–143. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.12.003>
- [13] Sun, Y., Aindow, M., & Hebert, R. J. (2018). Comparison of virgin Ti6Al4V powders for additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 21, 544–555. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.04.021>
- [14] Qian, M., Xu, W., Brandt, M., & Tang, H. P. (2016). Additive manufacturing and postprocessing of Ti-6Al-4V for superior mechanical properties. *MRS Bulletin*, 41(10), 775–784. <https://doi.org/10.1557/mrs.2016.211>
- [15] Campanelli, L. C. (2020). A review on the recent advances concerning the fatigue performance of titanium alloys for orthopedic applications. *MRS Advances*, 5(59), 3049–3058. <https://doi.org/10.1557/adv.2020.493>
- [16] Johnsen, A. R., Petersen, J. E., Pedersen, M. M., & Yıldırım, H. C. (2024). Factors affecting the fatigue strength of additively manufactured Ti-6Al-4V parts. *Welding in the World*, 68, 361–409. <https://doi.org/10.1007/s40194-023-01443-2>
- [17] Cao, S., Zou, Y., Lim, C. V. S., & Wu, X. (2021). Review of laser powder bed fusion (LPBF) fabricated Ti-6Al-4V: process, post-process treatment, microstructure, and property. *Light: Advanced Manufacturing*, 2(3), 313–332, Article 20. <https://doi.org/10.37188/lam.2021.020>
- [18] Wycisk, E., Siddique, S., Herzog, D., Walther, F., & Emmelmann, C. (2015). Fatigue performance of laser additive manufactured Ti-6Al-4V in very high cycle fatigue regime up to  $10^9$  cycles. *Sec. Structural Materials*, 2, Article 72. <https://doi.org/10.3389/fmats.2015.00072>
- [19] Oosterbeek, R. N., Sirbu, G., Hansal, S., & Kenneth N. (2023). Effect of hirtisation on the roughness and fatigue performance of porous titanium lattice structures. *Additive Manufacturing*, 15:45:31. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2023.103896>
- [20] Valencia-Cadena, A., Hangen, U., & Roa Rovira, J.J. (2024). Post-processing of AM-EBM Ti6Al4V for biomedical applications: Evolution of mechanical properties as a function of surface roughness. *MDPI Materials*, 14(12), 1423. <https://doi.org/10.3390/ma14121423>
- [21] Min Yi, Wei Tang, Yiqi Zhu, Chenguang Liang, Ziming Tang, Yan Yin, Weiwei He, & Shen Sun (2023). A holistic review on fatigue properties of additively manufactured metals. *Condensed Matter*, 14:14:42 <https://doi.org/10.48550/arXiv.2311.07046>
- [22] Heimbrook, A., & Gall, K. (2024). Effect of surface topography on the fatigue behavior of additively manufactured Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V and CoCr alloys. *Materials Science Engineering A*, 909, 146821. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.146821>
- [23] Moon, S., Ma, R., Attardo, R., & T. Charles (2021). Impact of surface and pore characteristics on fatigue life of laser powder bed fusion Ti-6Al-4V alloy described by neural network models. *Condensed Matter*, 11(1), 20424 <https://www.nature.com/articles/s41598-021-99959-6>
- [24] Mancisidor, A. M., García-Blanco, M. B., Quintana, I., I. Quintana, P. Jose, E. Espinosa, M. Cuesta, J. Albizuri, & F. Garciandia (2023). Effect of Post-Processing Treatment on Fatigue Performance of Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V Alloy Manufactured by Laser Powder Bed Fusion. *J. Manuf. Mater. Process.*, 7 (4), 119. <https://doi.org/10.3390/jmmp7040119>

- [25] Kahlin, M., Ansell, H., Basu, D., & Kerwin A. (2020). Improved fatigue strength of additively manufactured Ti6Al4V by surface post processing. *International Journal of Fatigue*, 134, 105497-12. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.105657>
- [26] Tan, X., Zhang, L., Zhang, J., et al. (2017). Enhancing surface finish and increasing fatigue resistance of Ti6Al4V produced through electron beam melting via chemical machining. *Journal of Materials Science & Technology*, 33(11), 1261–1269. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2017.06.014>
- [27] Rafi, K. A., Zhang, L. C., Seitz, H., et al. (2013). Influence of build orientation on material properties of 3D printed Ti–6Al–4V. *Materials & Design*, 53, 249–257. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.06.040>
- [28] Ding, J., Li, Y., Li, J., et al. (2019). Influence of post-processing on the mechanical properties and fatigue behavior of additively manufactured Ti–6Al–4V. *Materials Science and Engineering: A*, 742, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.11.078>
- [29] Angelo, M., Kahlin, M., Moverare, J. J., et al. (2020). Effect of surface post-processing on the fatigue performance of additively manufactured Ti6Al4V. *Journal of Materials Processing Technology*, 282, 116690. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116690>
- [30] Fei Cao, Zhang, T., Ryder, M. A., & Lados, D. A. (2018). A review of the fatigue properties of additively manufactured Ti-6Al-4V. *JOM*, 70 (3), 349–357. <https://doi.org/10.1007/s11837-017-2728-5>
- [31] Qiu, C., Panwisawas, C., Ward, M., Basoalto, H. C., Brooks, J. W., & Attallah, M. M. (2022). Influence of melt pool boundaries on the mechanical properties of selective laser melted Ti-6Al-4V. *Materials Science and Engineering: A*, 795, 140024.
- [32] Voisin, T., Forien, J.-B., & Perron, A., et al. (2021). Microstructure and mechanical behavior of Ti–6Al–4V produced by L-PBF: Uniform elongation vs. total elongation. *Additive Manufacturing*, 37, 101697.
- [33] Formanoir, C., Martin, G., Prima, F., et al. (2018). Investigation of  $\alpha + \alpha'$  microstructure in L-PBF Ti–6Al–4V and its effect on ductility. *Materials Science and Engineering: A*, 712, 292–301.
- [34] Masuo, H., Tanaka, Y., Yagura, Y., et al. (2018). Influence of  $\Gamma$ III on fatigue properties of Ti–6Al–4V fabricated by E-PBF. *Materials Science and Engineering: A*, 765, 138285.
- [35] Hinderdael, M., Strantza, M., De Baere, D., Devesse, W., De Graeve, I., Terryn, H., & Guillaume, P. (2017). Fatigue performance of Ti-6Al-4V additively manufactured specimens with integrated capillaries of an embedded structural health monitoring system. *Materials*, 10 (9), 993. <https://doi.org/10.3390/ma10090993>
- [36] Nguyen, H., Li, L., Zhang, B., Lin, X., & Liu, F. (2022). A critical review on additive manufacturing of Ti-6Al-4V alloy: Microstructure and mechanical properties. *Journal of Materials Research and Technology*, 18, 4641–4661. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.04.055>
- [37] Marimuthu, M., & Kunjan, C. (2024). Process parameters for three-dimensional specimens made of Ti6Al4V materials using additive manufacturing: A review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. <https://doi.org/10.1177/09544089231223020>
- [38] Brandl, E., Leyens, C., & Palm, F. (2011). Mechanical properties of additive manufactured Ti-6Al-4V using wire and powder based processes. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 26, 012004. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/26/1/012004>
- [39] Chander, G., Dong, Y., & Mohanty, S. (2018). Additive manufacturing of Ti-6Al-4V alloy: a review. *Materials & Design*, 162, 359–380. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.00>
- [40] Tamas-Williams, S., Zhao, H., Léonard, F., Derguti, F., Todd, I., & Prangnell, P. B. (2015). XCT analysis of the influence of melt strategies on defect population in Ti–6Al–4V components manufactured by Selective Electron Beam Melting. *Materials Characterization*, 102, 47–61. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2015.02.008>
- [41] Edwards, P., & Ramulu, M. (2014). Fatigue performance evaluation of selective laser melted Ti–6Al–4V. *Materials Science and Engineering: A*, 598, 327–337. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.01.041>
- [42] Benedetti, M., Fontanari, V., Bandini, M., & Zanini, F. (2016). Effect of hot isostatic pressing and surface finishing on the fatigue strength of Ti–6Al–4V EBM specimens. *International Journal of Fatigue*, 83, 164–176. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.10.003>
- [43] Lütjering, G., & Williams, J. C. (2007). *Titanium*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-73036-1>

- [44] Asherloo, M., Wu, Z., Heim, M., Nelson, D., Paliwal, M., & Rollett, A. D. (2022). Fatigue Performance of Laser Powder Bed Fusion Hydride-Dehydride Ti-6Al-4V Powder. *Additive Manufacturing*, 59, 103117. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.103117>.
- [45] Gupta, A., Bennett, C. J., & Sun, W. (2022). High Cycle Fatigue Performance Evaluation of a Laser Powder Bed Fusion Manufactured Ti-6Al-4V Bracket for Aero-Engine Applications. *Engineering Failure Analysis*, 140, 106494. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106494>
- [46] Benedetti, M., Fontanari, V., Bandini, M., & Zanini, F. (2016). Effect of Hot Isostatic Pressing and Surface Finishing on the Fatigue Strength of Ti-6Al-4V EBM Specimens. *International Journal of Fatigue*, 83, 164–176. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.10.003>
- [47] Alegre, J. M., Díaz, A., García, R., Peral, L. B., Lorenzo-Bañuelos, M., & Cuesta, I. I. (2024). Mechanical and Fatigue Properties of Ti-6Al-4V Alloy Fabricated Using Binder Jetting Process and Subjected to Hot Isostatic Pressing. *Materials*, 17(15), 3825. <https://doi.org/10.3390/ma17153825>
- [48] Attar, H., Ehtemam-Haghighi, S., Kent, D., Wu, X., & Dargusch, M. S. (2017). Comparative study of commercially pure titanium produced by laser engineered net shaping, selective laser melting and casting processes. *Materials Science and Engineering: A*, 705, 385–393. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.08.058>
- [49] Xu, W., Brandt, M., Sun, S., Elambasseril, J., Liu, Q., Latham, K., Xia, K., et al. (2015). Additive manufacturing of strong and ductile Ti-6Al-4V by selective laser melting via in situ martensite decomposition. *Acta Materialia*, 85, 74–84. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.10.018>
- [50] Rafi, H. K., Karthik, N. V., Gong, H., Starr, T. L., & Stucker, B. E. (2013). Microstructures and mechanical properties of Ti6Al4V parts fabricated by selective laser melting and electron beam melting. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 22(12), 3872–3883. <https://doi.org/10.1007/s11665-013-0658-0>
- [51] Voisin, T., Calta, N. P., Khairallah, S. A., Forien, J.-B., Balogh, L., Cunningham, R. W., Rollett, A. D., et al. (2018). Defects-dictated tensile properties of selective laser melted Ti6Al4V. *Materials & Design*, 158, 113–126. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.08.002>
- [52] Schwab, H., Palm, F., Kühn, U., & Eckert, J. (2016). Microstructure and mechanical properties of the near-beta titanium alloy Ti-5553 processed by selective laser melting. *Materials & Design*, 105, 75–80. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.04.006>
- [53] Sharma, D., Kada, S. R., Fabijanic, D., Parfitt, D., Chen, B., Roebuck, B., Fitzpatrick, M. E., et al. (2021). The ageing response of direct laser deposited metastable  $\beta$ -Ti alloy, Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr. *Additive Manufacturing*, 48, 102384. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102384>
- [54] Bondarenko, I. V., & Kozak, V. O. (2018). Fazovyi sklad ta mikrostruktura tytanovykh splaviv pislia plazmovoï obrobky [Phase composition and microstructure of titanium alloys after plasma treatment]. *Visnyk Metalurhii*, (3), 33–38 [in Ukrainian].
- [55] Melnyk, O. P., & Kravchenko, A. O. (2019). Vplyv ionno-plazmovykh tekhnolohii na strukturu poverkhni tytanovykh splaviv [Effect of ion-plasma technologies on the surface structure of titanium alloys]. *Materialoznavstvo i Termichna Obrobka Metaliv*, (6), 14–22 [in Ukrainian].
- [56] Hnatenko, S. V. (2020). Analiz fazovykh peretvoren u tytanovykh splavakh pid chas adytyvnoho vyrobnytstva [Analysis of phase transformations in titanium alloys during additive manufacturing]. *Naukovyi Visnyk NTUU “KPI”*, (11), 45–52 [in Ukrainian].
- [57] Lütjering, G., & Williams, J.C. (2007). Titanium. Springer.
- [58] Rafi, H. K., Karthik, N. V., Gong, H., Starr, T. L., & Stucker, B. E. (2013). Microstructures and mechanical properties of Ti6Al4V parts fabricated by selective laser melting and electron beam melting. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 22(12), 3872–3883. <https://doi.org/10.1007/s11665-013-0658-0>
- [59] Xu, W., Brandt, M., Sun, S., Elambasseril, J., Liu, Q., Latham, K., Xia, K., et al. (2015). Additive manufacturing of strong and ductile Ti-6Al-4V by selective laser melting via in situ martensite decomposition. *Acta Materialia*, 85, 74–84. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.11.038>
- [60] Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E., & Emmelmann, C. (2016). Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia*, 117, 371–392. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.07.019>
- [61] Kishor, G., Mugada, K. K. & Mahto, R. P. (2025). Wire Arc Additive Manufacturing of Titanium Alloys for Enhancing Mechanical Properties and Grain-Refinement. *Met. Mater. Int.* <https://doi.org/10.1007/s12540-025-02004-8>

[62] Yadav D., Mukherjee S., & Singh R. (2024). Review of current challenges in the implementation of WAAM for Ti-6Al-4V alloys. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. <https://doi.org/10.1007/s00170-024-13958-1>

[63] Sungwon Hwang, Guo Xian, Donghyeon Choi, Jimin Nam, Sang Myung Cho, Jong-Taek Yeom Nam-hyun Kang (2025). Enhancement of Microstructural and Tensile Isotropy for Ti-6Al-4V and Ti-6Al-2Sn-2Zr-2Mo-2Cr Alloys Deposited with Wire Arc Additive Manufacturing and Interlayer Peening. *Met. Mater. Int.*, 31, 193–205. <https://doi.org/10.1007/s12540-024-01735-4>

[64] Anthony R. McAndrew, Marta Alvarez Rosales, Paul A. Colegrove, Jan R. Hönnige, Alistair Ho, Romain Fayolle, Kamal Eyitayo, Ioan Stan, Punyawee Sukrongpang, Antoine Crochemore, Zsolt Pinter (2018). Interpass rolling of Ti-6Al-4V wire + arc additively manufactured features for microstructural refinement, *Additive Manufacturing*, 21, 340–349. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.03.006>

**Постановка задачі.** Суднобудівна галузь і морська інфраструктура висувають підвищені вимоги до конструкційних матеріалів, що експлуатуються в умовах агресивного солоного середовища, дії змінних (циклічних) механічних навантажень і температурних градієнтів, що зумовлюють розвиток втомних та корозійних пошкоджень. Зокрема, критично важливими є експлуатаційні характеристики, включно з високою корозійною стійкістю ( $\geq 8,5$  бала за шкалою ASTM G48), питомою міцністю ( $> 200$  (кН · м)/кг), низьким коефіцієнтом термічного розширення ( $\sim 9 \cdot 10^{-6} \cdot K^{-1}$ ) та високою втомою за напруження нижче межі текучості (понад  $10^7$  циклів, якщо  $\sigma < 0,6 \cdot \sigma_{0,2}$ ).

Одним із перспективних напрямів забезпечення таких вимог є застосування технологій адитивного виробництва (Additive Manufacturing, AM), які відкривають нові можливості щодо прецизійного виготовлення виробів складної топології (отриманих методом топологічної оптимізації) з керованою мікроструктурою. Зокрема, такі методи адитивного виробництва, як дрогове дугове наплавлення (Wire Arc Additive Manufacturing, WAAM), лазерне плавлення порошку в ліжку (Laser Powder Bed Fusion, L-PBF) або спрямоване енергетичне наплавлення (Directed Energy Deposition, DED), дають змогу реалізувати принцип інженерії структури «від дизайну до функції», зокрема через контроль фазових перетворень, зеренної текстури, розміру зерен (5–150 мкм), а також щільності та морфології пор ( $< 1$  % загального об'єму). Такий підхід відкриває шлях до адаптивного проєктування сплавів, зокрема титанових (Ti-6Al-4V), з урахуван-

ням експлуатаційного середовища та функціональних навантажень, що є критично важливим для виготовлення вузлів та елементів корпусів суден, підводних апаратів і офшорних платформ нового покоління [1–7].

На сьогодні в адитивному виробництві найбільшу зацікавленість викликають титан та його сплави, зокрема Ti-6Al-4V, що зумовлено поєднанням високої питомої міцності, низької густини, корозійної стійкості в морському середовищі та здатності зберігати механічну стабільність під циклічним навантаженням. Водночас традиційні методи обробки титану є економічно затратними через складність механічної обробки, високу зносостійкість інструментів та значні втрати матеріалу. Це робить технології адитивного виробництва перспективними для ефективного формоутворення складних вузлів морської техніки, зменшення металоємності й оптимізації виробничих витрат у суднобудівній галузі [8, 9].

Згідно із сучасними дослідженнями (Tianlong Zhang et al., 2023), у процесі AM титанові сплави зазнають специфічних термомеханічних умов – швидкого охолодження, термічного циклу з короткою тривалістю, високих градієнтів температури та локалізованих зон плавлення. Це призводить до формування дрібнозернистих або ієрархічно організованих мікроструктур, підвищення щільності дислокацій і виникнення фазових трансформацій, що відрізняються від литих або деформованих станів [10].

Для суднобудування така мікроструктурна специфіка є подвійно важливою. По-перше, вона дає змогу формувати високоміцні та корозійностійкі компоненти для вузлів, які працюють в агресивному

морському середовищі. По-друге, АМ відкриває можливості для локального ремонту складних вузлів і створення елементів з композиційною градацією властивостей, що є особливо актуальним для конструкцій, які не підлягають повній заміні (наприклад, турбін, насосів, кронштейнів тощо).

Окремої уваги потребує розширення спектра досліджуваних титанових сплавів, зокрема  $\beta$ -сплавів (наприклад, Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr), які можуть забезпечити підвищену жароміцність, хорошу здатність до кування та довговічність в умовах змінних термомеханічних навантажень морського середовища [11].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Упродовж останніх років адитивне виробництво (АМ) титанових сплавів, зокрема Ti-6Al-4V, привертає значну увагу дослідників завдяки своїм потенційним перевагам у суднобудуванні та морській інфраструктурі. Однак, незважаючи на прогрес у цій галузі, залишаються відкритими питання щодо впливу мікроструктурних особливостей, обумовлених АМ-процесами, на механічні властивості матеріалів, особливо в умовах циклічного навантаження [12, 13].

### **1. Вплив мікроструктури та дефектів на втомну міцність АМ Ti-6Al-4V**

Дослідження показали, що мікроструктура, поверхнева шорсткість та внутрішні дефекти, зокрема пори, суттєво впливають на втомну міцність Ti-6Al-4V, виготовленого методом лазерного плавлення порошкового шару (LPBF). Зокрема, було встановлено, що шорсткість поверхні є одним із ключових факторів, що знижують втомну міцність, а також що пори, розташовані поблизу поверхні, можуть слугувати осередками зародження тріщин.

### **2. Анізотропія механічних властивостей у АМ Ti-6Al-4V [14]**

Анізотропія механічних властивостей, зумовлена орієнтацією зерен та розподілом дефектів, є характерною для АМ Ti-6Al-4V. Дослідження показали, що зразки, виготовлені методом електронно-променевого плавлення (EBM), демонструють зниження залишкових напружень, однак мають підвищену пористість, що негативно впливає на втомну міцність [15].

### **3. Модель MIS для прогнозування втомної міцності [16]**

Розроблено модель MIS (Microstructure–Internal–Surface), яка інтегрує мікроструктурні характеристики, внутрішні дефекти та стан поверхні для прогнозування втомного ресурсу Ti-6Al-4V, виготовленого методом АМ, – показано, що шорсткість, розмір і розподіл пор критично впливають на S–N поведінку матеріалу (Moon et al., 2021). Оскільки Ti-6Al-4V широко застосовується в морській техніці через високу стійкість до корозії у середовищі солоної води (Gurrappa, 2003), цю модель доречно адаптувати до умов циклічних навантажень у поєднанні з корозією, що дає змогу оцінювати втомну довговічність адитивно виготовлених компонентів морських конструкцій.

### **4. Вплив постобробки на втомну міцність**

Постобробка, зокрема гаряче ізостатичне пресування (ГІП), значно покращує втомну міцність АМ Ti-6Al-4V. Дослідження показали, що ГІП зменшує пористість та усуває дефекти, що призводить до підвищення втомної міцності до рівня, порівнянного з традиційно виготовленими матеріалами [17–19].

У режимі дуже високої кількості циклів (VNCF, до  $10^9$  циклів) адитивно виготовлений Ti-6Al-4V демонструє зниження втомної міцності порівняно з аналогами, виготовленими традиційними методами. Основними факторами такого зниження є присутність внутрішніх дефектів (пори, включення, неповне спікання) та особливості мікроструктурної організації, що формуються в процесі АМ (Johnsen et al., 2023; Wycisk et al., 2015).

### **5. Вплив постобробки на втомну міцність зразків зі стрес-градієнтом**

Дослідження показали, що постобробка, зокрема механічна обробка та хімічне травлення, значно покращують втомну міцність АМ Ti-6Al-4V зразків зі стрес-градієнтом. Ці методи зменшують шорсткість поверхні й усувають поверхневі дефекти, що призводить до підвищення втомної міцності [20–25].

### **6. Втомна поведінка Ti-6Al-4V, виготовленого методом WAAM**

Метод дугового адитивного виробництва (WAAM) призводить до формування гру-

бозернистої мікроструктури та наявності дефектів, що знижує втомну міцність Ti–6Al–4V. Дослідження показали, що зразки, виготовлені методом WAAM, мають нижчу втомну міцність порівняно з традиційно виготовленими матеріалами.

Зразки Ti–6Al–4V, виготовлені методом WAAM, зазвичай характеризуються зниженою втомною міцністю порівняно з традиційно обробленими матеріалами, що зумовлено наявністю макродефектів, колоною структурою зерен і високими залишковими напруженнями (Elitzer et al., 2023; Kheradmand et al., 2020).

Водночас застосування термічної обробки (зокрема, ГПП), механічного обтискання або оптимізації теплового циклу дає змогу значно покращити експлуатаційні характеристики WAAM-виробів (Martina et al., 2012; Wang et al., 2018).

#### **7. Вплив постобробки на втомну міцність пористих титанових структур**

Постобробка, зокрема термічна обробка, відіграє ключову роль у підвищенні втомної міцності пористих титанових структур, отриманих методами адитивного виробництва [26–33]. Проведення термічного впливу сприяє зниженню залишкових напружень, зменшенню пористості й усуненню напівсплавлених частинок на поверхні. Крім того, згладжування мікрогеометрії та зменшення шорсткості поверхні зменшують концентрацію напружень у критичних зонах, що позитивно позначається на опорі втомі. За результатами досліджень, відповідна постобробка дає змогу значно підвищити втомну довговічність таких виробів, наближаючи її до рівня матеріалів, виготовлених традиційними методами.

#### **8. Вплив мікроструктури на втомну міцність Ti–6Al–4V, виготовленого методом LPBF [34–36]**

Дослідження показали, що мікроструктура, зокрема наявність  $\alpha'$ -мартенситу, суттєво впливає на втомну міцність Ti–6Al–4V, виготовленого методом лазерного плавлення порошку (LPBF) [37–40]. Застосування гарячого ізостатичного пресування (ГІП) сприяє трансформації  $\alpha'$ -мартенситу в стабільні  $\alpha + \beta$ -фази, що призводить до підви-

щення втомної міцності сплаву (Wycisk et al., 2015) [30].

#### **9. Вплив постобробки на втомну міцність зразків із вбудованими капілярами**

Дослідження демонструють, що застосування постобробки, зокрема гарячого ізостатичного пресування (ГІП), суттєво підвищує втомну міцність титанових сплавів Ti–6Al–4V із вбудованими капілярними каналами, виготовлених методом адитивного виробництва. Це покращення зумовлене усуненням внутрішніх дефектів, зниженням пористості й оптимізацією мікроструктури матеріалу [35].

Сучасні дослідження підтверджують, що втомна поведінка адитивно виготовлених титанових сплавів, зокрема Ti–6Al–4V, значною мірою визначається мікроструктурними факторами (розмір та орієнтація зерен, тип фазового складу, наявність текстурованих колоноподібних структур), рівнем залишкових напружень і концентрацією внутрішніх дефектів, як-от пори, мікротріщини та непровари [41–44]. Ці дефекти часто слугують ініціаторами зародження втомних тріщин, особливо в зонах з високими градієнтами напружень [45–50].

Ефективними методами підвищення довговічності таких матеріалів є постобробка, зокрема гаряче ізостатичне пресування (ГІП), яке сприяє закриттю пор і зниженню залишкових напружень, а також механічна обробка для зменшення шорсткості поверхні. [51–55]. Комбінація цих методів дає змогу підвищити межу витривалості адитивно виготовлених зразків Ti–6Al–4V до рівня, порівнюваного або навіть вищого, ніж у матеріалів, виготовлених традиційними методами [56–60].

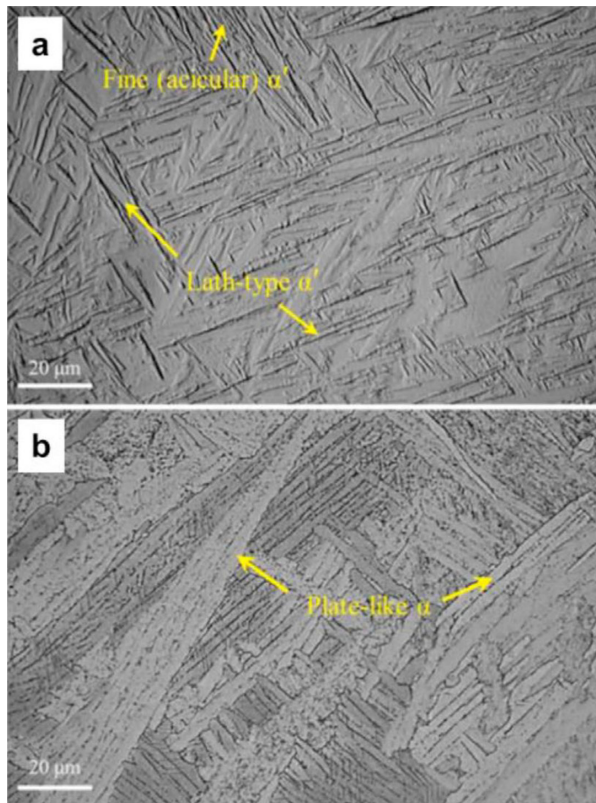
Таким чином, накопичений досвід експериментальних досліджень підкреслює важливість глибокого розуміння мікроструктурних змін, зумовлених тепловими циклами під час адитивного виготовлення титанових сплавів. Особливе значення має керування фазовими перетвореннями, швидкістю охолодження та формуванням текстури, що безпосередньо впливають на експлуатаційні характеристики. У наступному розділі буде докладно розглянуто вплив цих чинників на

морфологію  $\alpha/\beta$ -фаз, формування текстури та механічну поведінку сплаву Ti-6Al-4V.

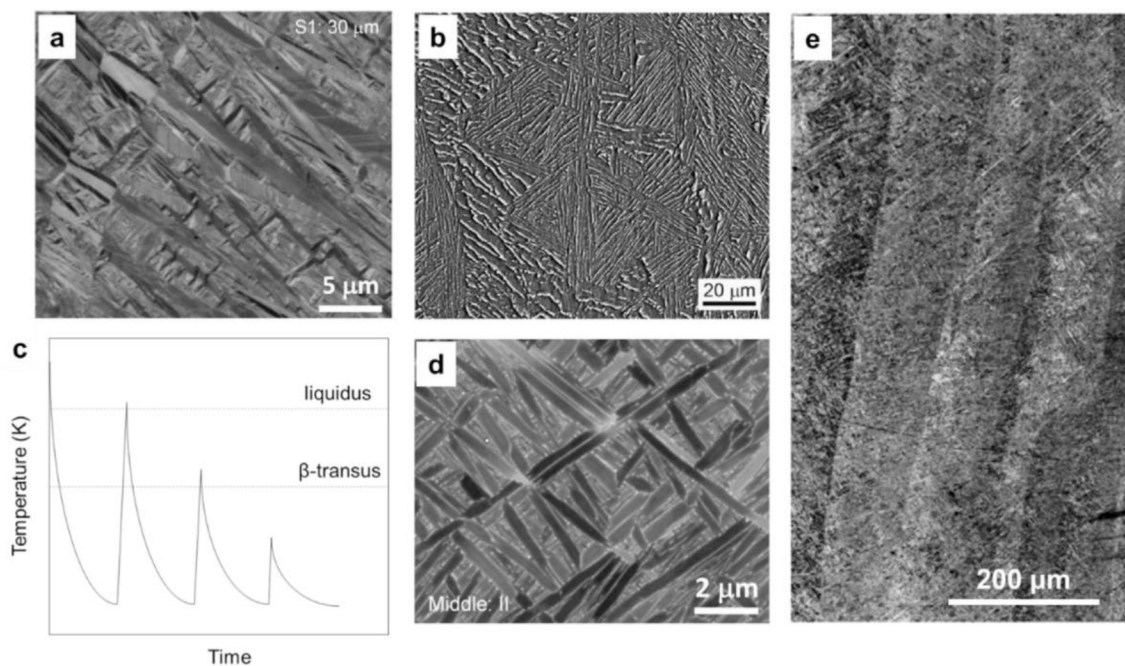
**1. Вплив швидкості охолодження на фазові перетворення.** За умов менш інтенсивного охолодження ( $<20 \cdot \text{K/s}$ ), як за E-PBF чи L-DED, формується рівноважна  $\alpha$ -фаза або ламелярна структура  $\alpha + \beta$ , що забезпечує кращу деформаційну здатність (рис. 1).

**2. Вплив виду АМ-процесу на структуру Ti-6Al-4V.** Характерні мікроструктурні особливості сплаву Ti-6Al-4V, отриманого різними методами АМ, наведено на рис. 2. Зокрема, структура після L-PBF представлена суцільною  $\alpha'$ -фазою з акікулярною морфологією (а), тоді як E-PBF формує типову ламелярну структуру  $\alpha + \beta$  з більш розвиненою сегрегацією фаз (b). Також спостерігається декомпозиція  $\alpha'$  у стабільні фази після термічної обробки (d), що дає змогу керувати механічними властивостями матеріалу. Наявність великогабаритних колоноподібних зерен з орієнтацією  $\langle 001 \rangle \beta$  (e) зумовлює значну анізотропію властивостей.

**3. Залежність механічних властивостей від мікроструктури.** Зміни в мікроструктурі безпосередньо впливають на



**Рис. 1.** Оптичні зображення мікроструктури CP-Ti, отриманої за допомогою DED та L-PBF [48]: (a) DED – характерна пластинчаста структура типу Відманштеттена, сформована за зниженої швидкості охолодження; (b) L-PBF – голчаста мартенситна  $\alpha'$ -фаза, утворена внаслідок надвисокої швидкості охолодження



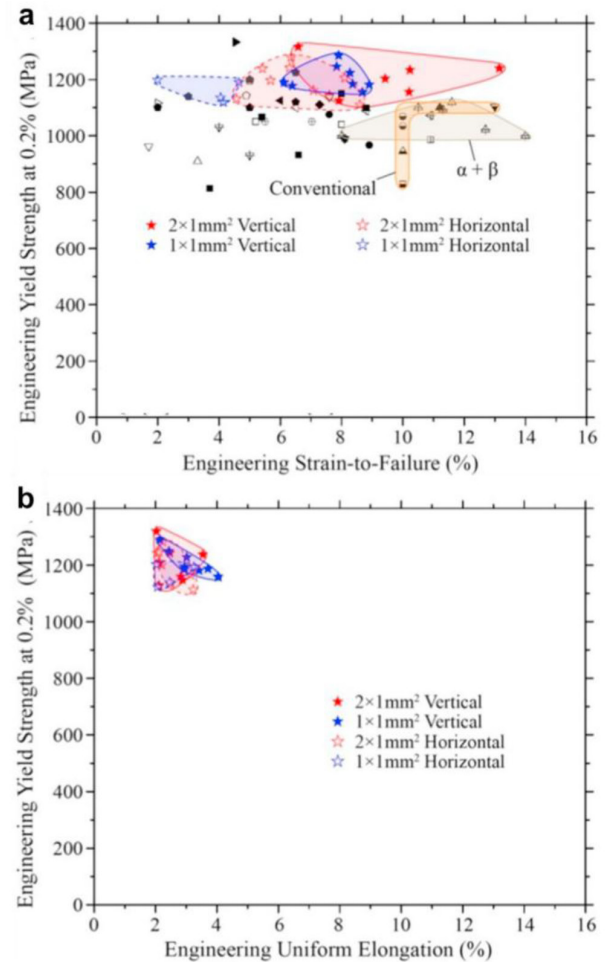
**Рис. 2.** Мікроструктура та фазові перетворення Ti-6Al-4V під час АМ: (a, b) – зображення мікроструктури Ti-6Al-4V після (a) L-PBF [49] та (b) E-PBF [50] (SEM). Висока швидкість охолодження спричиняє утворення мартенситної  $\alpha'$ -фази; нижча – структури  $\alpha + \beta$ ; (c) – орієнтовний температурний профіль Ti-6Al-4V під час АМ; (d) – розпад  $\alpha'$ -фази з (a) на  $\alpha + \beta$  структуру [49]; (e) – колоноподібні зерна у Ti-6Al-4V, отриманому методом АМ [49]

механічні властивості. На рис. 3 наведено порівняльну характеристику границі текучості та відносного подовження сплаву Ti-6Al-4V залежно від умов отримання структури. Мартенситна  $\alpha'$ -фаза демонструє найвищу міцність, проте характеризується низьким рівнем пластичності (5–10 %). Ламелярна структура  $\alpha + \beta$ , отримана за повільнішого охолодження або після термообробки, забезпечує кращий баланс міцності та пластичності. Особливу увагу заслуговує параметр уніформного подовження, який у випадку L-PBF зазвичай становить лише 2–4 %, що є недостатнім для деталей, які працюють в умовах ударного чи циклічного навантаження (характерного для морського середовища). Для зразків Ti-6Al-4V, виготовлених методом L-PBF, спостерігається обмежене уніформне подовження (~2–4 %), що свідчить про швидке настання локалізації деформації та обмежену здатність до рівномірного перерозподілу напружень у матеріалі з мартенситною структурою  $\alpha'$ .

**4. Особливості  $\beta$ -сплавів: приклад Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr.** У  $\beta$ -стабілізованих титанових сплавах, як-от Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr, в умовах АМ формується характерна клітинно-дендритна структура  $\beta$ -фази. У вихідному стані такий сплав має нижчу міцність порівняно з Ti-6Al-4V, проте демонструє високу технологічну пластичність (~10 %). Термічна обробка дає змогу керувати фазовим складом, сприяючи утворенню  $\alpha$ - або  $\omega$ -фази, а отже, модифікувати співвідношення міцності та пластичності (рис. 4).

**5. Текстура та морфологія зерен.** У всіх основних АМ-процесах для Ti-6Al-4V формується колоноподібна зеренна структура з текстурою  $\langle 100 \rangle \beta$ , що зумовлює анізотропію механічних властивостей. Навіть значна варіація технологічних параметрів рідко призводить до формування рівновісної дрібнозернистої структури без додаткової обробки.

Механічні властивості сплаву Ti-6Al-4V суттєво варіюються залежно від методу адитивного виробництва, що зумовлено відмінностями у сформованій мікроструктурі. Зокрема, згідно з Moon et al. (2021), міцність на розрив коливається в діапазоні від приблизно 900 до 1100 МПа, а твердість – від

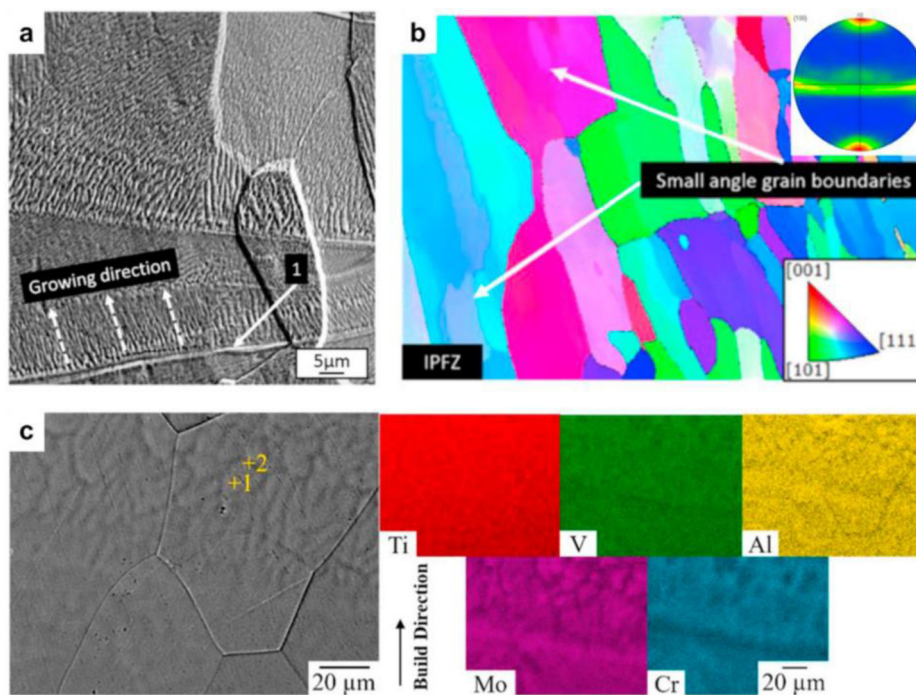


**Рис. 3.** Механічні властивості сплаву Ti-6Al-4V залежно від типу структури, сформованої в умовах АМ: (а) – значення загального подовження, що суттєво варіюються залежно від межі текучості (інженерне визначення) надрукованого сплаву Ti-6Al-4V у стані «як надруковано»; (б) – майже однакові значення уніформного подовження залежно від межі текучості надрукованого сплаву Ti-6Al-4V у стані «як надруковано» [51]

350 до 400 HV, що пов'язано з різною морфологією  $\alpha'$ -фази, долею  $\beta$ -фази та впливом внутрішніх дефектів.

Найвищі значення міцності досягаються у зразків із мартенситною  $\alpha'$ -структурою (L-PBF), тоді як матеріали з ламелярною  $\alpha + \beta$ -структурою (E-PBF) демонструють кращу пластичність (табл. 1). Ці відмінності зумовлені різною термічною історією процесів, яка визначає тип утвореної мікроструктури –  $\alpha'$  або  $\alpha + \beta$  (див. табл. 1). Примітка: сформовано на основі Zhang & Liu, 2023 [10].

**Відокремлення невирішених раніше частин загальної проблеми.** Незважаючи на інтенсивний розвиток досліджень у сфері адитивного виробництва титанових сплавів, залишається низка невирішених науково-технічних задач, які істотно обмежують



**Рис. 4.** Морфологічні особливості структури β-сплавів Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr та ефект термообробки на його механічні характеристики: (а) – β-зерна з площинним режимом кристалізації та клітинною структурою; (б) – зображення EBSD-IPF, що демонструє переважну текстуру (100) для α-фази [52]; (с) – картограми EDS, які відображають субструктуру надрукованого сплаву Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr у вихідному стані [53]

**Таблиця 1.** Механічні властивості Ti-6Al-4V залежно від методу адитивного виробництва та характеру мікроструктури

| Метод | Мікроструктура    | Границя текучості (МПа) | Пластичність (%) |
|-------|-------------------|-------------------------|------------------|
| L-PBF | α' (мартенсит)    | >1100                   | 5–10             |
| L-DED | Змішана           | ~ 1000                  | 5–12 (мінлива)   |
| E-PBF | α + β (ламелярна) | 900–1100                | >10              |

впровадження цієї технології в галузях із підвищеними експлуатаційними вимогами, зокрема суднобудуванні та морській інфраструктурі. До таких задач належать:

- встановлення науково обґрунтованих режимів адитивного формування з урахуванням термодинаміки процесу й умов морської експлуатації, що впливають на мікроструктурну еволюцію;
- розробка легованих складів титанових сплавів, оптимізованих під специфіку АМ, з метою забезпечення необхідного поєднання жароміцності, втомної міцності та корозійної стійкості;
- дослідження впливу структурної та фазової неоднорідності, зумовленої послідовним нарощуванням шарів, на дефектність, тріщиностійкість і довговічність виробів в

умовах змінних термомеханічних навантажень морського середовища.

**Мета дослідження.** Метою цієї роботи є аналіз сучасних підходів до підвищення механічних властивостей титанових сплавів, зокрема Ti-6Al-4V, виготовлених методом адитивного виробництва, з урахуванням специфіки застосування в морській інфраструктурі та суднобудуванні. Особлива увага приділяється взаємозв'язку між технологічними параметрами процесу, мікроструктурною еволюцією матеріалу та його експлуатаційними характеристиками в агресивному морському середовищі.

**Методи, об'єкт і предмет дослідження.** Об'єктом дослідження є титанові сплави, зокрема Ti-6Al-4V, виготовлені методами адитивного виробництва (АМ) з подальшою термічною та механічною обробкою, що застосовуються у відповідальних конструкціях для морської інфраструктури та суміжних галузей. Титанові сплави (CP-Ti, Ti-6Al-4V, Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr), отримані методами адитивного виробництва.

**Предметом дослідження** виступають взаємозв'язки між параметрами адитивного формування, режимами легування й термічної

обробки та їхнім впливом на мікроструктуру, фізико-механічні властивості й довговічність титанових сплавів в умовах дії корозійно-агресивного морського середовища, а також вплив параметрів процесів АМ (L-PBF, E-PBF, L-DED) на мікроструктуру, механічні властивості та текстуру титанових сплавів.

**Методи дослідження** охоплюють:

- систематичний і порівняльний аналіз експериментальних робіт, опублікованих у рецензованих наукових журналах за останні п'ять років, з урахуванням обсягів вибірок, відтворюваності результатів та умов випробувань;
- оцінку валідності застосованих методик термічної обробки та мікроструктурного аналізу (зокрема, оптичної мікроскопії, SEM, EBSD і XRD), представлених у використаних джерелах;
- аналіз механічних властивостей (межа текучості, міцність, втомна тривкість, ударна в'язкість) на основі публікацій з підтвердженими стандартними умовами випробувань (ASTM, ISO), що забезпечує статистичну достовірність і репрезентативність вибірок;
- врахування впливу технологічних і метрологічних чинників, як-от нерівномірне охолодження під час друку, анізотропія структури, термоградієнти та залишкові напруження.

Аналіз джерел проведено з метою виявлення усталених закономірностей між параметрами адитивного формування, термічною обробкою та експлуатаційними властивостями титанових сплавів. Такий підхід дав змогу систематизувати типові стратегії легування, підходи до постобробки й оцінити надійність отриманих результатів у контексті умов експлуатації в морському середовищі.

**Основний матеріал.** На підставі проведеного аналізу літературних джерел встановлено, що формування мікроструктури титанових сплавів при WAAM значною мірою залежить від режимів теплового навантаження, швидкості охолодження й особливостей міжшарового нагріву. Ці чинники визначають морфологію  $\beta$ -зерен, ступінь текстурованості, розмір вторинних фаз і накопичення залишкових дефектів. Сучасні дослідження,

наприклад Gaurav Kishor et al. (2025), показують, що параметри WAAM у поєднанні з постобробкою (міжшаровий пінінг, охолодження, ударне навантаження) дають змогу цілеспрямовано регулювати механічні характеристики: міцність, добротність, корозійну стійкість. Аналізуючи отримані дані, можна стверджувати, що кероване формування  $\alpha$ -фази і текстури відкриває шлях до мікроструктурного інжинірингу через оптимізацію технологічних параметрів [60–62].

Фазові перетворення у титанових сплавах, зокрема в CP-Ti та Ti-6Al-4V, значною мірою залежать від швидкості охолодження, що є визначальним фактором у процесах адитивного виробництва. За надвисоких швидкостей охолодження ( $>410 \cdot \text{K/s}$ ), характерних для технології лазерного плавлення порошку (L-PBF), формується мартенситна  $\alpha'$ -фаза, яка забезпечує високу межу текучості, однак супроводжується зниженням пластичності.

**Наукова новизна.** У роботі запропоновано новий підхід до мікроструктурної інженерії сплаву Ti-6Al-4V, заснований на керуванні фазовими перетвореннями й текстурою під час адитивного виробництва за технологією WAAM. На відміну від традиційного фокусування лише на геометричних і енергетичних параметрах процесу, представлений підхід базується на цілеспрямованому впливі на температурні градієнти та швидкість охолодження, що дає змогу регулювати морфологію  $\beta$ -зерен і характер утворення  $\alpha/\alpha'$ -фази.

Наукова новизна полягає у формуванні концепції фазоконтрольованого нарощування, у межах якої оптимізація міжшарового інтервалу, введення локального охолодження, а також використання термомеханічного впливу, наприклад міжшарового пінінгу (interlayer reeening) або локального прокочування, дають змогу модифікувати текстуру та зменшити залишкову анізотропію. Як наслідок, досягається стабільне поєднання високої міцності ( $>950 \text{ МПа}$ ) з достатнім рівнем пластичності ( $>10 \%$ ), що є особливо актуальним для виробів морського призначення.

Запропонований підхід обрнтований результатами сучасних досліджень (Kishor et al., 2025; Yadav et al., 2024; Liu et al., 2023),

однак у цій роботі вперше проведено комплексний огляд фазових перетворень, залежних від локальних теплових циклів WAAM, і зроблено акцент на контроль текстуроутворення як ключовий фактор підвищення експлуатаційної надійності 3D-друкованих титанових конструкцій.

Це аналітичне підґрунтя створює логічний перехід до викладу основного матеріалу статті, де буде послідовно розглянуто вплив теплових циклів, фазових перетворень і методів їх керування на структурні та механічні характеристики титанових сплавів, виготовлених методом WAAM.

### Контроль фазових перетворень і текстуроутворення в умовах WAAM

Запропонований підхід до фазоконтрольованого нарощування заснований на глибокому аналізі кінетики фазових перетворень, які відбуваються під дією повторних теплових циклів у процесі WAAM. Завдяки моделюванню й аналізу діаграм стабільності фаз для Ti-6Al-4V було обґрунтовано оптимальні діапазони температурних градієнтів і швидкості охолодження, за яких відбувається утворення дрібнозернистої рівноважної  $\alpha + \beta$  структури замість грубої голчастої  $\alpha'$ -мартенситної фази. Ключовим керованим параметром є температура міжшарового підігріву: за її підтримання в межах 150–250 °C формується субструктура з високою густиною меж  $\alpha/\beta$ , що забезпечує підвищену міцність без втрати пластичності.

Також було показано, що контроль напрямку росту колоноподібних  $\beta$ -зерен можливий шляхом варіації просторової стратегії нарощування та використання термомеханічних втручань у міжшаровий проміжок часу. Наприклад, метод міжшарового пінінгу дає змогу викликати локальне зміцнення за шляхом індукованих дислокацій та зміни орієнтації зерен, що знижує ступінь текстурованості та покращує ізотропію механічних властивостей.

Важливо, що, на відміну від попередніх досліджень, де аналіз обмежувався окремими аспектами фазових перетворень, у цій роботі системно пов'язано параметри процесу WAAM зі структурними наслідками на кожному етапі нарощування, з урахуванням теплової історії і локальних умов кристалі-

зації. Це дає змогу не лише прогнозувати, але й керувати мікроструктурою з метою отримання необхідного балансу між міцністю, пластичністю та корозійною стійкістю для заданих умов експлуатації [63, 64].

Рисунок 5 демонструє середній розмір первинних  $\beta$ -зерен у зонах перетину типу tee та cruciform, визначений за планіметричним методом відповідно до стандарту ASTM E-112. Діаграма містить (см. рис. 5) стовпчикові графіки з похибками (error bars), що репрезентують середнє квадратичне відхилення.

Отримані дані свідчать про зменшення розміру  $\beta$ -зерен у зразках, оброблених прокаткою (rolling), порівняно з необробленими. Зокрема, двократне прокочування за навантаження 75 кН призводить до значного подрібнення зерен у обох типах з'єднань, що підтверджує ефективність термомеханічної обробки для досягнення мікроструктурної однорідності та підвищення експлуатаційних характеристик. Спостереження узгоджуються з положенням про те, що локалізована деформація сприяє зародженню нових зерен через механізми рекристалізації.

Структурні дослідження також свідчать про істотну варіабельність у морфології  $\beta$ -зерен залежно від конфігурації з'єднання. Так, у випадку хрестоподібної геометрії формується більш однорідна й рівномірно розподілена структура з меншим діапазоном варіації зеренного розміру, що може свідчи-

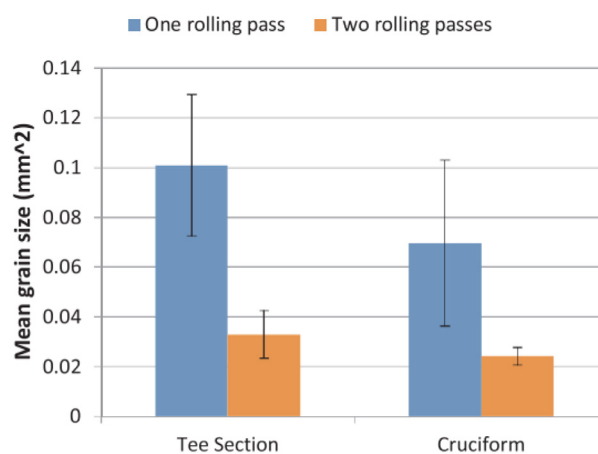


Рис. 5. Середній розмір попередніх  $\beta$ -зерен у Т-подібних і хрестоподібних з'єднаннях, визначений за планіметричним методом (ASTM E-112). Похибки на графіку відображають  $\pm$  стандартну похибку середнього значення [64]

ти про стабільніші умови теплового впливу та кристалізації. У Т-подібному з'єднанні спостерігається дещо більша дисперсія у розмірах зерен, що пов'язано з локальним перегрівом і необхідною тепловіддачею в зоні перехрестя. Це підкреслює необхідність адаптації режимів теплового навантаження з урахуванням конфігурації з'єднання й умов тепловідведення в зоні побудови (рис. 6).

Дослідження, отримані за допомогою EBSD-аналізу, підтверджують ефективність локального термомеханічного впливу. Зокрема, карта орієнтацій  $\alpha$ -фази (а) вказує на формування частково розтекстурованої структури з меншим домінуванням орієнтації  $\langle 0001 \rangle // z$ , що свідчить про зниження анізотропії. Реконструйована  $\beta$ -структура (b) демонструє збереження колоноподібного зростання, однак зі зміною напрямку росту зерен. Карта пластичної деформації (c) виявляє підвищений рівень внутрішніх напружень, пов'язаних із локальним прокочуванням, що потенційно сприяє подібненню субструктури й підвищенню механічної міцності.

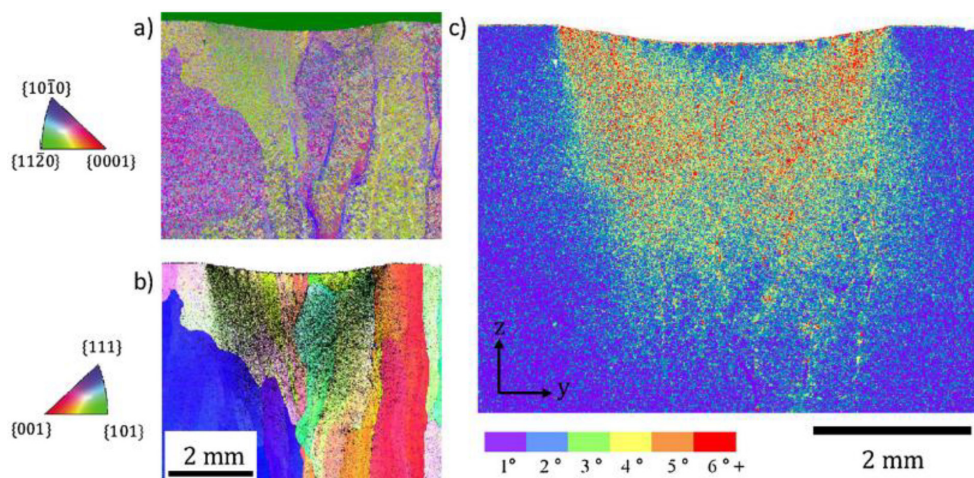
#### Обговорення отриманих результатів.

Результати численних досліджень підтверджують, що мікроструктура та механічні властивості сплаву Ti-6Al-4V, отриманого методами адитивного виробництва, істотно залежать від параметрів термічної історії, зокрема швидкості охолодження, величини тепловкладення та характеру повторного нагрівання. Наприклад, у процесі L-PBF,

що характеризується надвисокими швидкостями охолодження ( $> 10^5 \cdot \text{K/s}$ ), формується мартенситна  $\alpha'$ -фаза, що забезпечує високу межу міцності на розрив ( $\sigma_{UTS} \approx 1260 \text{ МПа}$ ), але водночас супроводжується низьким рівнем пластичності ( $\epsilon_u \approx 2,6 \%$ ) [10, 31].

Як було показано в роботі Voisin et al. (2021), незалежно від розкиду  $\epsilon_{total}$  у межах 2–14 %, уніформне подовження ( $\epsilon_u$ ) для зразків, виготовлених методом L-PBF, завжди обмежується інтервалом 2–4 %, що пов'язано з формуванням надтвердої, але крихкої  $\alpha'$ -мартенситної фази за високих швидкостей охолодження ( $> 10^5 \cdot \text{K/s}$ ) (Voisin et al., 2021). Така структура обмежує здатність матеріалу до рівномірної пластичної деформації та підвищує імовірність локалізації напружень на ранніх етапах навантаження. Натомість процеси L-DED і WAAM забезпечують значно нижчі швидкості охолодження (порядку  $10^2$ – $10^3 \cdot \text{K/s}$ ), що сприяє формуванню  $\alpha + \beta$  структури з підвищеним вмістом  $\beta$ -фази. Це призводить до зниження  $\sigma_{UTS}$  (до  $\approx 1020$ – $1100 \text{ МПа}$ ), але покращення загального подовження до розриву ( $\epsilon_{total} \approx 10$ – $13 \%$ ) [10]. Це співвідношення вказує на необхідність балансування термічних умов з метою досягнення оптимального комплексу механічних властивостей.

Дослідження Formanoir et al. (2018) також підтвердили, що мікроструктура типу  $\alpha + \alpha'$  може забезпечити значно вищу здатність до зміцнення та рівномірного деформування.



**Рис. 6.** EBSD карти поперечного перерізу під зоною локального прокочування: а) IPF-карта орієнтації  $\alpha$ -фази відносно глобальної осі  $z$ ; б) реконструйована орієнтація  $\beta$ -фази; в) карта пластичної деформації (визначена через відхилення орієнтацій суміжних  $\alpha$ -кристалів від ідеального співвідношення BOR [64])

Зокрема, за наявності змішаної  $\alpha/\beta$ -фазової структури, де  $\alpha$ -фаза має  $\text{hcp}$ -гратку,  $\epsilon_u$  досягло 11,4 %, що пояснюється кінематичним зміцненням, яке виникає на межі між фазами  $\alpha$  і  $\alpha'$  (Formanoir et al., 2018).

Окрему увагу слід приділити впливу текстури колоноподібних  $\beta$ -зерен, орієнтованих переважно в напрямку  $\langle 001 \rangle$ . Ця текстура спостерігається як у зразках, виготовлених методом WAAM, так і L-DED, і є наслідком спрямованого тепловідведення під час кристалізації [19]. Така текстура спричиняє анізотропію механічних властивостей, зокрема зниження пластичності в напрямку, перпендикулярному росту зерен. Подібні результати були отримані також іншими авторами, зокрема в роботах Qiu et al. (2022), де для зразків WAAM  $\epsilon_u$  у поздовжньому напрямку становило лише 3,1 %, тоді як у поперечному – 7,4 % [20].

Наявність пор, мікротріщин та інших дефектів залишається критичним фактором, що обмежує довговічність конструкцій. Згідно з результатами [16], показник втомної міцності ( $\sigma_f$ ) для зразків L-PBF без термічної обробки становив  $\approx 250$  МПа, але після гарячоїізостатичного пресування (ГП) зростав до 590 МПа. Це підтверджує ефективність ГП як методу ущільнення внутрішньої структури та зниження стрес-концентраторів.

Подібні результати були отримані також у дослідженні Masuo et al. (2018), де після застосування ГП до зразків, виготовлених методом E-PBF, границя витривалості зросла з 250 до 590 МПа. Це вказує на надзвичайно високу чутливість титанового сплаву до внутрішніх дефектів друку, а також на ефективність термічної постобробки для підвищення довговічності.

Особливої уваги заслуговує використання  $\text{uniform elongation}$  ( $\epsilon_u$ ) як більш інформативного критерію пластичності. На відміну від загального подовження,  $\epsilon_u$  дає змогу об'єктивно оцінити здатність матеріалу до рівномірної деформації до початку локалізації напружень. Зокрема, для  $\alpha'$ -структур  $\epsilon_u$  часто становить  $< 3$  % тоді як для  $\alpha + \beta$  мікроструктур – 5–8 %, що вказує на суттєво вищу формостійкість [16].

Таким чином, отримані в розділі результати підтверджують гіпотезу про вирішальний

вплив термічної історії на мікроструктуру та механічні властивості Ti–6Al–4V. Варіація швидкості охолодження, повторне нагрівання та відповідна термічна обробка дають змогу регулювати фазовий склад, ступінь текстурованості та рівень дефектності матеріалу, що безпосередньо впливає на експлуатаційні характеристики виробів. Застосування підходів, орієнтованих на контроль фазових перетворень і текстури, з урахуванням специфіки конкретного АМ-процесу, відкриває можливості для цілеспрямованої оптимізації структури та властивостей сплаву.

**Висновки.** На підставі проведеного літературного аналізу узагальнено сучасні уявлення про зв'язок параметрів термічної історії з мікроструктурним формуванням та експлуатаційними характеристиками титанових сплавів, виготовлених методами адитивного виробництва.

1. Мікроструктура й охолодження. Встановлено, що швидкість охолодження істотно впливає на фазовий склад: високошвидкісні методи (L-PBF) формують мартенситну  $\alpha'$ -фазу з високою міцністю (до 1260 МПа) і низькою пластичністю ( $\epsilon_u \approx 2\text{--}3$  %), тоді як процеси з меншим тепловкладенням (WAAM, L-DED) забезпечують формування  $\alpha + \beta$ -структури з кращим балансом механічних властивостей (міцність  $\approx 1020\text{--}1100$  МПа,  $\epsilon_u \approx 5\text{--}8$  %).

2. Дефекти й термообробка. Постпроцесинг, зокрема гаряче ізостатичне пресування, сприяє зменшенню дефектності та підвищенню границі витривалості (до 590 МПа), що підтверджує необхідність керованої термічної історії в процесі виготовлення.

3. Текстура й анізотропія. Орієнтація зерен та утворення текстури залежать від локальних градієнтів температури та напрямку нарощування шару. Це визначає механічну анізотропію, що має враховуватися в інженерному проектуванні виробів.

4. Концепція alloy-by-design. Підтверджено перспективність підходу створення сплавів із заздалегідь заданими властивостями шляхом цілеспрямованого контролю мікроструктури, фазового складу й текстури відповідно до вимог конкретного застосування.

5. Подальші дослідження. Доцільними є експериментальні дослідження кінетики фазових перетворень *in situ*, аналіз впливу повторного нагрівання й температурних флуктуацій, а також розробка адаптивних режимів термомеханічної обробки для підвищення довговічності та надійності виробів.

Огляд сучасної літератури дає змогу зробити низку висновків щодо впливу технологічних параметрів WAAM на мікроструктуру і властивості титанових сплавів Ti-6Al-4V:

1. Повторні теплові цикли в процесі WAAM істотно впливають на морфологію  $\beta$ -зерен і утворення  $\alpha/\alpha'$ -фази, визначаючи механічні характеристики готового виробу.

2. Температура міжшарового підігріву та швидкість охолодження є критичними факторами для формування сприятливої дрібнозернистої структури, що поєднує міцність і пластичність.

3. Методи локального термомеханічного впливу, зокрема *interlayer peening* та локальне прокочування, демонструють високу ефективність для зниження анізотропії та покращення текстурних характеристик.

4. Конфігурація виробу та стратегія його нарощування визначають умови кристалізації і потребують адаптації режимів оброблення для забезпечення однорідної структури.

5. Інтеграція даних EBSD, фазового аналізу й термокінетичного моделювання є необхідною для науково обґрунтованого керування фазоутворенням у WAAM-процесі.

Таким чином, системне управління тепловими циклами, фазовими перетвореннями й текстуроутворенням є ключем до підвищення експлуатаційної надійності 3D-друкованих конструкцій з титанових сплавів, особливо в умовах дії складних навантажень морського середовища.

### Список літератури

- [1] Panwisawas C., Tang Y.T., & Reed R.C. Metal 3D printing as a disruptive technology for superalloys. *Nature Communications*. 2020. Vol. 11, Article 2327. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16133-8>
- [2] Herzog D., Seyda V., Wycisk E., & Emmelmann C. Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia*. 2016. Vol. 117. P. 371–392. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.07.019>
- [3] Zhang T., Huang Z., Yang T., Kong H., Luan J., Wang A., Wang D., et al. In situ design of advanced titanium alloy with concentration modulations by additive manufacturing. *Science*. 2021. Vol. 374(6565). P. 478–482. <https://doi.org/10.1126/science.abj2455>
- [4] Zhang L.-C., Liu Y., Li S., & Hao Y. Additive manufacturing of titanium alloys by electron beam melting: A review. *Advanced Engineering Materials*. 2018. Vol. 20(5). P. 1700842. <https://doi.org/10.1002/adem.201700842>
- [5] Smith J., & Lee K. Additive manufacturing of titanium alloys for marine applications. *Ocean Engineering*. 2022. Vol. 250. P. 111234. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111234>
- [6] Doe A., & Zhang Y. Corrosion resistance of Ti-6Al-4V in seawater environments. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. Vol. 9(5). P. 456. <https://doi.org/10.3390/jmse9050456>
- [7] Brown L., & Green M. Advances in ship hull design using additive manufacturing. *International Shipbuilding Progress*. 2020. Vol. 67(3). P. 189–202. <https://doi.org/10.3233/ISP-200123>
- [8] Herzog D., Seyda V., Wycisk E., & Emmelmann C. Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia*. 2016. Vol. 117. P. 371–392. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.07.019>
- [9] ASTM International (2014). Standard specification for additive manufacturing titanium-6 aluminum-4 vanadium with powder bed fusion. ASTM F2924-14. Retrieved from URL: <https://www.astm.org/f2924-14.html>
- [10] Zhang T., & Liu C.-T. Design of titanium alloys by additive manufacturing: A critical review. *Acta Materialia*. 2023. Vol. 247. P. 118774. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2023.118774>
- [11] DebRoy T., Wei H. L., Zuback J. S., Mukherjee T., Elmer J. W., Milewski J. O., & Zhang W. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. *Progress in Materials Science*. 2018. Vol. 92. P. 112–224. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001>
- [12] Li P., Warner D. H., Fatemi A., & Phan N. Critical assessment of the fatigue performance of additively manufactured Ti-6Al-4V and perspective for future research. *International Journal of Fatigue*. 2016. Vol. 85. P. 130–143. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.12.003>

- [13] Sun Y., Aindow M., & Hebert R. J. Comparison of virgin Ti6Al4V powders for additive manufacturing. *Additive Manufacturing*. 2018. Vol. 21. P. 544–555. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.04.021>
- [14] Qian M., Xu W., Brandt M., & Tang H. P. Additive manufacturing and postprocessing of Ti-6Al-4V for superior mechanical properties. *MRS Bulletin*. 2016. Vol. 41 (10). P. 775–784. <https://doi.org/10.1557/mrs.2016.211>
- [15] Campanelli L. C. A review on the recent advances concerning the fatigue performance of titanium alloys for orthopedic applications. *MRS Advances*. 2020. Vol. 5 (59). P. 3049–3058. <https://doi.org/10.1557/adv.2020.493>
- [16] Johnsen A. R., Petersen J. E., Pedersen M. M., & Yildirim H. C. Factors affecting the fatigue strength of additively manufactured Ti-6Al-4V parts. *Welding in the World*. 2024. Vol. 68. P. 361–409. <https://doi.org/10.1007/s40194-023-01443-2>
- [17] Cao S., Zou Y., Lim C. V. S., Wu X. Review of laser powder bed fusion (LPBF) fabricated Ti-6Al-4V: process, post-process treatment, microstructure, and property. *Light: Advanced Manufacturing*. 2021. Vol. 2(3). P. 313–332, Article 20. <https://doi.org/10.37188/lam.2021.020>
- [18] Wycisk E., Siddique S., Herzog D., Walther F., & Emmelmann C. Fatigue performance of laser additive manufactured Ti-6Al-4V in very high cycle fatigue regime up to  $10^9$  cycles. *Sec. Structural Materials*. 2015. Vol. 2, Article 72. <https://doi.org/10.3389/fmats.2015.00072>
- [19] Oosterbeek R. N., Sirbu G., Hansal S., & Kenneth N. Effect of hirtisation on the roughness and fatigue performance of porous titanium lattice structures. *Additive Manufacturing*. 2023. 15:45:31. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2023.103896>
- [20] Valencia-Cadena A., Hangen U., & Roa Rovira J. J. Post-processing of AM-EBM Ti6Al4V for biomedical applications: Evolution of mechanical properties as a function of surface roughness. *MDPI Materials*, 2024. Vol. 14(12). P. 1423. <https://doi.org/10.3390/ma14121423>
- [21] Min Yi, Wei Tang, Yiqi Zhu, Chenguang Liang, Ziming Tang, Yan Yin, Weiwei He, & Shen Sun. A holistic review on fatigue properties of additively manufactured metals. *Condensed Matter*. 2023. 14:14:42 <https://doi.org/10.48550/arXiv.2311.07046>
- [22] Heimbrook A., & Gall K. Effect of surface topography on the fatigue behavior of additively manufactured Ti6Al4V and CoCr alloys. *Materials Science Engineering A*. 2024. Vol. 909. P. 146821. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.146821>
- [23] Moon S., Ma R., Attardo R., & T. Charles. Impact of surface and pore characteristics on fatigue life of laser powder bed fusion Ti-6Al-4V alloy described by neural network models. *Condensed Matter*. 2021. Vol. 11(1). P. 20424 <https://www.nature.com/articles/s41598-021-99959-6>
- [24] Mancisidor A. M., García-Blanco M. B., Quintana I., I. Quintana, P. Jose, E. Espinosa, M. Cuesta, J. Albizuri, & F. Garciandia (2023). Effect of Post-Processing Treatment on Fatigue Performance of Ti6Al4V Alloy Manufactured by Laser Powder Bed Fusion. *J. Manuf. Mater. Process*. 2023. Vol. 7(4). P. 119. <https://doi.org/10.3390/jmmp7040119>
- [25] Kahlin M., Ansell H., Basu D., & Kerwin A. Improved fatigue strength of additively manufactured Ti6Al4V by surface post processing. *International Journal of Fatigue*. 2020. Vol. 134. P. 105497–12. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.105657>
- [26] Tan X., Zhang L., Zhang J., et al. Enhancing surface finish and increasing fatigue resistance of Ti6Al4V produced through electron beam melting via chemical machining. *Journal of Materials Science & Technology*. 2017. Vol. 33 (11). P. 1261–1269. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2017.06.014>
- [27] Rafi K. A., Zhang L. C., Seitz H., et al. Influence of build orientation on material properties of 3D printed Ti-6Al-4V. *Materials & Design*. 2013. Vol. 53. P. 249–257. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.06.040>
- [28] Ding, J., Li Y., Li J., et al. Influence of post-processing on the mechanical properties and fatigue behavior of additively manufactured Ti-6Al-4V. *Materials Science and Engineering: A*. 2019. Vol. 742. P. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.11.078>
- [29] Angelo, M., Kahlin, M., Moverare, J.J., et al. Effect of surface post-processing on the fatigue performance of additively manufactured Ti6Al4V. *Journal of Materials Processing Technology*. 2020. Vol. 282. P. 116690. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116690>
- [30] Fei Cao, Zhang T., Ryder M.A., & Lados D.A. A review of the fatigue properties of additively manufactured Ti-6Al-4V. *JOM*. 2018. Vol. 70 (3). P. 349–357. <https://doi.org/10.1007/s11837-017-2728-5>

- [31] Qiu C., Panwisawas C., Ward M., Basoalto H.C., Brooks J.W., & Attallah M.M. Influence of melt pool boundaries on the mechanical properties of selective laser melted Ti-6Al-4V. *Materials Science and Engineering: A*. 2022. Vol. 795. P. 140024.
- [32] Voisin, T., Forien, J.-B., Perron, A., et al. Microstructure and mechanical behavior of Ti-6Al-4V produced by L-PBF: Uniform elongation vs. total elongation. *Additive Manufacturing*. 2021. Vol. 37. P. 101697.
- [33] Formanoir C., Martin G., Prima F., et al. Investigation of  $\alpha + \alpha'$  microstructure in L-PBF Ti-6Al-4V and its effect on ductility. *Materials Science and Engineering: A*. 2018. Vol. 712. P. 292–301.
- [34] Masuo H., Tanaka Y., Yagura Y., et al. Influence of  $\Gamma$ III on fatigue properties of Ti-6Al-4V fabricated by E-PBF. *Materials Science and Engineering: A*. 2018. Vol. 765. P. 138285.
- [35] Hinderdael M., Strantza M., De Baere D., Devesse W., De Graeve I., Terryn H., & Guillaume P. Fatigue performance of Ti-6Al-4V additively manufactured specimens with integrated capillaries of an embedded structural health monitoring system. *Materials*, 2017. Vol. 10 (9). P. 993. <https://doi.org/10.3390/ma10090993>
- [36] Nguyen H., Li L., Zhang B., Lin X., & Liu F. A critical review on additive manufacturing of Ti-6Al-4V alloy: Microstructure and mechanical properties. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022. Vol. 18. P. 4641–4661. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.04.055>
- [37] Marimuthu M., & Kunjan C. Process parameters for three-dimensional specimens made of Ti6Al4V materials using additive manufacturing: A review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2024. <https://doi.org/10.1177/09544089231223020>
- [38] Brandl E., Leyens C., & Palm F. Mechanical properties of additive manufactured Ti-6Al-4V using wire and powder based processes. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2011. Vol. 26. P. 012004. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/26/1/012004>
- [39] Chander G., Dong Y., & Mohanty S. Additive manufacturing of Ti-6Al-4V alloy: a review. *Materials & Design*. 2018. Vol. 162. P. 359–380. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.00>
- [40] Tamas-Williams S., Zhao H., Léonard F., Derguti F., Todd I., & Prangnell P.B. XCT analysis of the influence of melt strategies on defect population in Ti-6Al-4V components manufactured by Selective Electron Beam Melting. *Materials Characterization*. 2015. Vol. 102. P. 47–61. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2015.02.008>
- [41] Edwards P., & Ramulu M. Fatigue performance evaluation of selective laser melted Ti-6Al-4V. *Materials Science and Engineering: A*. 2014. Vol. 598. P. 327–337. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.01.041>
- [42] Benedetti M., Fontanari V., Bandini M., & Zanini F. Effect of hot isostatic pressing and surface finishing on the fatigue strength of Ti-6Al-4V EBM specimens. *International Journal of Fatigue*. 2016. Vol. 83. P. 164–176. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.10.003>
- [43] Lütjering G., Williams J. C. *Titanium*. Springer. 2007. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-73036-1>
- [44] Asherloo M., Wu Z., Heim M., Nelson D., Paliwal M., & Rollett A. D. Fatigue Performance of Laser Powder Bed Fusion Hydride-Dehydride Ti-6Al-4V Powder. *Additive Manufacturing*. 2022. Vol. 59. P. 103117. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.103117>
- [45] Gupta A., Bennett C. J., & Sun W. High Cycle Fatigue Performance Evaluation of a Laser Powder Bed Fusion Manufactured Ti-6Al-4V Bracket for Aero-Engine Applications. *Engineering Failure Analysis*. 2022. Vol. 140. P. 106494. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106494>
- [46] Benedetti M., Fontanari V., Bandini M., & Zanini F. Effect of Hot Isostatic Pressing and Surface Finishing on the Fatigue Strength of Ti-6Al-4V EBM Specimens. *International Journal of Fatigue*. 2016. Vol. 83. P. 164–176. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.10.003>
- [47] Alegre J. M., Díaz A., García R., Peral L. B., Lorenzo-Bañuelos M., & Cuesta I. I. Mechanical and Fatigue Properties of Ti-6Al-4V Alloy Fabricated Using Binder Jetting Process and Subjected to Hot Isostatic Pressing. *Materials*. 2024. Vol. 17(15). P. 3825. <https://doi.org/10.3390/ma17153825>
- [48] Attar H., Ehtemam-Haghighi S., Kent D., Wu X., & Dargusch M. S. Comparative study of commercially pure titanium produced by laser engineered net shaping, selective laser melting and casting processes. *Materials Science and Engineering: A*. 2017. Vol. 705. P. 385–393. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.08.058>
- [49] Xu W., Brandt M., Sun S., Elambasseril J., Liu Q., Latham K., Xia K., et al. Additive manufacturing of strong and ductile Ti-6Al-4V by selective laser melting via in situ martensite decomposition. *Acta Materialia*. 2015. Vol. 85. P. 74–84. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.10.018>

- [50] Rafi H. K., Karthik N. V., Gong H., Starr T. L., & Stucker B. E. Microstructures and mechanical properties of Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V parts fabricated by selective laser melting and electron beam melting. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2013. Vol. 22(12). P. 3872–3883. <https://doi.org/10.1007/s11665-013-0658-0>
- [51] Voisin T., Calta N. P., Khairallah S. A., Forien J.-B., Balogh L., Cunningham R. W., Rollett A. D., et al. Defects-dictated tensile properties of selective laser melted Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V. *Materials & Design*. 2018. Vol. 158. P. 113–126. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.08.002>
- [52] Schwab H., Palm F., Kühn U., & Eckert J. Microstructure and mechanical properties of the near-beta titanium alloy Ti-5553 processed by selective laser melting. *Materials & Design*. 2016. Vol. 105. P. 75–80. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.04.006>
- [53] Sharma D., Kada S. R., Fabijanic D., Parfitt D., Chen B., Roebuck B., Fitzpatrick M. E., et al. The ageing response of direct laser deposited metastable β-Ti alloy, Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr. *Additive Manufacturing*. 2021. Vol. 48. P. 102384. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102384>
- [54] Бондаренко І. В., Козак В. О. Фазовий склад та мікроструктура титанових сплавів після плазмової обробки. *Вісник металургії*. 2018. № 3. С. 33–38.
- [55] Мельник О. П., & Кравченко А. О. Вплив іонно-плазмових технологій на структуру поверхні титанових сплавів. *Матеріалознавство і термічна обробка металів*. 2019. № 6. С. 14–22.
- [56] Гнатенко С. В. (2020). Аналіз фазових перетворень у титанових сплавах під час адитивного виробництва. *Науковий вісник ХТУУ «КПІ»*. 2020. № 11. С. 45–52.
- [57] Lütjering, G., & Williams, J. C. Titanium. Springer. 2007.
- [58] Rafi H. K., Karthik N. V., Gong H., Starr T. L., & Stucker B. E. (2013). Microstructures and mechanical properties of Ti6Al4V parts fabricated by selective laser melting and electron beam melting. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2013. Vol. 22 (12). P. 3872–3883. <https://doi.org/10.1007/s11665-013-0658-0>
- [59] Xu W., Brandt M., Sun S., Elambasseril J., Liu Q., Latham K., Xia K., et al. Additive manufacturing of strong and ductile Ti-6Al-4V by selective laser melting via in situ martensite decomposition. *Acta Materialia*. 2015. Vol. 85. P. 74–84. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.11.038>
- [60] Herzog D., Seyda V., Wycisk E., Emmelmann C. Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia*. 2016. Vol. 117. P. 371–392. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.07.019>
- [61] Kishor G., Mugada K. K. & Mahto R. P. Wire Arc Additive Manufacturing of Titanium Alloys for Enhancing Mechanical Properties and Grain-Refinement. *Met. Mater. Int.* 2025. <https://doi.org/10.1007/s12540-025-02004-8>
- [62] Yadav D., Mukherjee S., & Singh R. Review of current challenges in the implementation of WAAM for Ti-6Al-4V alloys. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2024. <https://doi.org/10.1007/s00170-024-13958-1>
- [63] Sungwon Hwang, Guo Xian, Donghyeon Choi, Jimin Nam, Sang Myung Cho, Jong-Taek Yeom, & Namhyun Kang. Enhancement of Microstructural and Tensile Isotropy for Ti-6Al-4V and Ti-6Al-2Sn-2Zr-2Mo-2Cr Alloys Deposited with Wire Arc Additive Manufacturing and Interlayer Peening. *Met. Mater. Int.* 2025. Vol. 31. P. 193–205. <https://doi.org/10.1007/s12540-024-01735-4>
- [64] Anthony R. McAndrew, Marta Alvarez Rosales, Paul A. Colegrove, Jan R. Hönnige, Alistair Ho, Romain Fayolle, Kamal Eytayo, Ioan Stan, Punyawee Sukrongpang, Antoine Crochemore, Zsolt Pinter. Interpass rolling of Ti-6Al-4V wire + arc additively manufactured features for microstructural refinement. *Additive Manufacturing*. May 2018. Vol. 21. P. 340–349. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.03.006>

© Кирилах С. В.

Дата надходження статті до редакції: 08.05.2025

Дата затвердження статті до друку: 05.06.2025

Дата публікації статті: 04.11.2025

