

УДК 621.74.047:620.17

doi: 10.32620/aktt.2026.4sup2.10

С. В. АДЖАМСЬКИЙ^{1,2}, Г. А. КОНОНЕНКО^{1,3,4},
Р. В. ПОДОЛЬСЬКИЙ^{1,3,5}, С. І. БАДЮК^{1,5}

¹ ТОВ «Адитивні лазерні технології України», Україна

² Інститут транспортних систем і технологій НАН України, Україна

³ Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, Україна

⁴ НТУ «Дніпровська Політехніка», Україна

⁵ Інститут прикладних систем управління НАН України, Україна

ЗАЛЕЖНІСТЬ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СПЛАВУ ABD900 ВІД ОРІЄНТАЦІЇ ПОБУДОВИ ПРИ LPBF

Особливості LPBF-технології можуть призвести до виникнення спрямованих структур і анізотронії механічних властивостей матеріалу, що потребує додаткових досліджень для нових жароміцних сплавів, адаптованих до адитивного виробництва. **Мета роботи:** дослідження впливу орієнтації виготовлення на механічні властивості дослідних зразків, виготовлених із жароміцного сплаву ABD900. Завдання досліджень: розробка CAD-моделей дослідних зразків на розтягування відповідно до ДСТУ ISO 6892:2019 з параметрами виготовлення: потужність – 195 Вт, швидкість сканування – 1100 мм/с, відстань між треками 0,09 мм, товщина шару – 40 мкм; визначення механічних властивостей дослідних зразків, виготовлених у горизонтальному та вертикальному напрямленні; визначення суцільності дослідних зразків металографічним методом після випробувань на розтягування. **Методи дослідження:** виготовлення із застосуванням LPBF-технології дослідних зразків із жароміцного порошку сплаву ABD900, мікроскопічні дослідження із застосуванням оптичного мікроскопу AxioVert 200M Mat. **Наукова новизна:** встановлено закономірності впливу орієнтації виготовлення за LPBF-технологією на механічні властивості та структурний стан жароміцного сплаву ABD900. **Практична значимість:** отримані результати можуть бути використані під час вибору орієнтації виготовлення деталей зі сплаву ABD900 для забезпечення необхідного рівня міцності та пластичності виробу відповідного призначення. **Результати.** Встановлено, що горизонтально орієнтовані зразки (XY) характеризуються вищими показниками міцності: границя міцності становить 1115 МПа, а границя плинності – 810 МПа, що, відповідно, на 6,1% та 9,8% більше, ніж показники вертикально орієнтованих зразків. Водночас зразки, виготовлені в напрямку Z, мають вищі пластичні властивості: відносне видовження становить 43,8%, а відносне звуження – 41,3%, що, відповідно, на 4,5% та 14,5% більше, ніж значення для горизонтальних. Металографічними дослідженнями встановлено високу цілісність матеріалу (99,75%) і наявність окремих сферичних пор розміром 2-11 мкм. Виявлено характерну для LPBF-технології текстуровану структуру зі стовпчастими зернами епітаксialного походження та дрібнодисперсною комірчато-дендритною будовою. Показано, що спрямованість виготовлення є одним із визначальних факторів формування комплексу механічних властивостей сплаву ABD900.

Ключові слова: LPBF-технологія; орієнтування виготовлення, ABD900, мікроструктура, механічні властивості.

Вступ

Поширення LPBF-технології переважно пов'язано з широкими можливостями, включаючи швидке прототипування та швидке дрібносерійне виробництво [1]. Важливою перевагою LPBF є можливість суттєвого скорочення термінів розробки та виготовлення нових виробів, зменшення витрат матеріалу та створення конструкцій з оптимізованою масою.

Разом з тим, особливості процесу пошарового формування виробів обумовлюють виникнення анізотронії структури та механічних властивостей матеріалу. Добре відомо, що механічні властивості дета-

лей, виготовлених за LPBF-технологією, можуть залежати від орієнтації виготовлення, технологічних параметрів виготовлення та умов кристалізації [2-4]. Це особливо важливо для деталей відповідального призначення, що працюють в умовах високих механічних і температурних навантажень.

Останнім часом значна увага приділяється розробці нових жароміцних сплавів, адаптованих для адитивного виробництва. Одним із таких сплавів є ABD900 [5], який характеризується високими властивостями та є перспективним для виготовлення відповідальних виробів авіа-космічної галузі. Проте вплив орієнтації виготовлення на його механічні властивості та структурний стан досліджено недостатньо.



Мета роботи

Дослідження впливу орієнтації виготовлення на механічні властивості дослідних зразків із жароміцного сплаву ABD900.

Завдання досліджень:

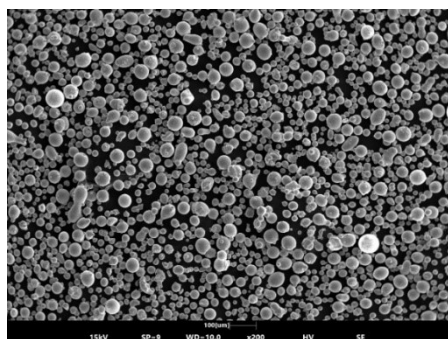
1. Розробка CAD-моделей дослідних зразків на розтягування відповідно до ДСТУ ISO 6892:2019 з параметрами виготовлення: потужність – 195 Вт, швидкість сканування – 1100 мм/с, відстань між треками – 0,09 мм, товщина шару – 40 мкм.

2. Визначення механічних властивостей дослідних зразків, виготовлених в горизонтальному та вертикальному напрямках.

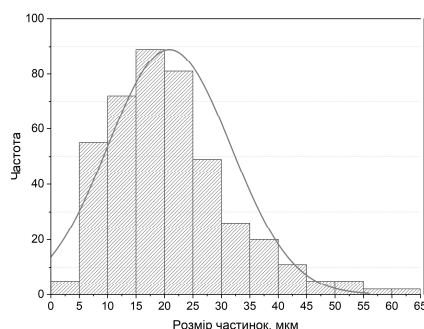
3. Визначення суцільності дослідних зразків металографічним методом після випробувань на розтягування.

Матеріал і методика досліджень

Об'єктом дослідження є жароміцний сплав ABD900, з якого були виготовлені за LPBF-технологією зразки, що були досліджені у вихідному стані після друку. Для виконання роботи й вирішення поставленого завдання використовувався порошок жароміцного сплаву ABD900 із розміром частинок $25 \pm 15 \mu\text{m}$ (рис. 1).



а



б

Рис. 1. Частинки вихідного матеріалу ABD900 за збільшення 200 (а), результати гранулометричного аналізу (б)

У рамках роботи передбачалось виконання випробувань на розтягування дослідних зразків зі сплаву ABD900, виготовлених за технологією LPBF з різними орієнтаціями: горизонтальні (XY) та вертикальні (Z). Виготовляли по три зразки з кожною з орієнтацій. Дослідні зразки перед випробуванням були механічно підготовлені із застосуванням токарного верстату HAAS ST10 відповідно до ДСТУ ISO 6892:2019. Робоча зона дослідного циліндричного зразка після механічної обробки мала діаметр $5 \pm 0,03$ мм і довжину 25 мм.

Випробування на розтягування виконувалось із застосуванням випробувальної машини Instron із максимальним навантаженням 5 т і швидкістю переміщення траверси 0,02 мм/с. У результаті проведених випробувань визначались такі характеристики, як границя міцності, границя плинності, відносне видовження та відносне звуження.

На наступному етапі було виконано металографічний аналіз дослідних зразків. Дане дослідження проводили на частинах зразків на розтягування, що не підлягали деформаційній дії, а слугували об'єктами для технологічних захватів. Металографічний шліф виготовляли із застосуванням механічної обробки, включаючи такі операції: вирівнювання – шліфування – полірування – виявлення структури хімічним методом. Механічна обробка дослідних шліфів виконувалась на автоматичному шліфувально-полірувальному верстаті Struers Labopol-5 з використанням змінних шліфувальних дисків та полірувальних тканин. Виявлення структури виконувалось із застосуванням реактиву Каллінга №1 (1,5 г CuCl_2 , 33 мл HCl , 33 мл етанол). Металографічний аналіз виконувався із застосуванням оптичного мікроскопу AxioVert 200MMat, в світлопольному освітленні. Розмір і кількість пор визначали металографічним методом як середнє значення на шести полях зору та округляли до цілих значень.

Результати досліджень. У результаті проведених випробувань зразків, виготовлених із різною орієнтацією (по три горизонтальних і вертикальних), було отримано середні значення механічних характеристик (таблиця 1).

Таблиця 1

Результати механічних випробувань зразків із дослідного матеріалу ABD900, виготовлених за LPBF-технологією

Орієнтація	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %
XY	$1115 \pm 15,5$	810 ± 15	$41,8 \pm 2,9$	$35,3 \pm 2,95$
Z	$1046 \pm 1,2$	$730 \pm 2,6$	$43,8 \pm 11$	$41,3 \pm 4$

У результаті проведених випробувань на розтягування встановлено, що дослідні зразки, виготовлені в горизонтальному напрямку, переважно мають вищі міцнісні характеристики: границя міцності на 6,1%, границя плинності на 9,8% більші порівняно з вертикальними зразками. У той же час, у дослідних вертикальних зразків пластичні характеристики вище, ніж у горизонтальних зразків: відносне видовження – на 4,5%, відносне звуження – на 14,5%. Переважно це пов'язано з направленням виготовлення та їх мікроструктурною особливістю, яка згадувалась у роботах [2-4], виконаних на сплаві 316L, виготовленому за тією самою технологією (LPBF), тобто така анізотропія властивостей є типовою.

На наступному етапі було проведено аналіз мікроструктури дослідних зразків. У результаті проведеного аналізу пористості (рис. 2, а, б) встановлено, що в дослідних зразках, як у вертикальному, та і в горизонтальному напрямках присутні пори з розмірами в діапазоні 2...11 мкм. Ці пори мають сферичну форму, їх середня кількість, відповідно до проведеного аналізу шести полів зору для кожного зразка, не перевищує 0,25%, що вказує на щільність дослідних зразків ~ 99,75%.

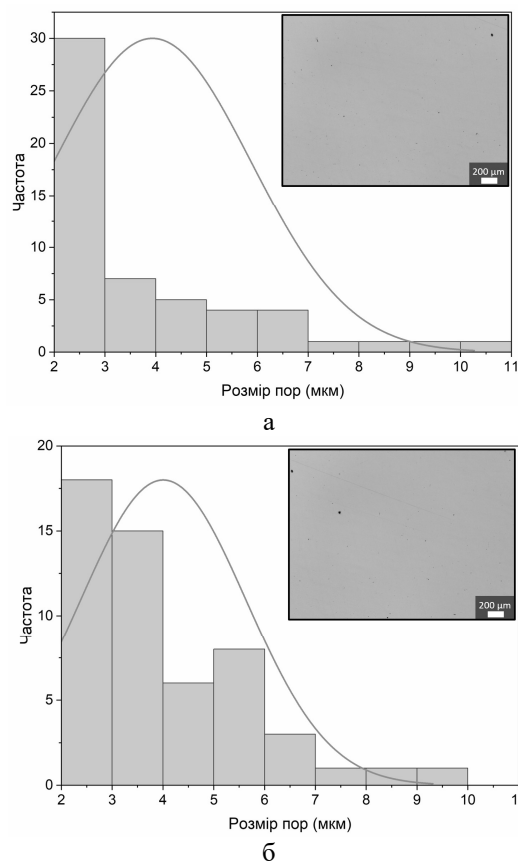


Рис. 2. Дослідження щільності в полірованому стані дослідних зразків після випробувань на розтягування, виготовлених в різних напрямках: а – у вертикальному, б – в горизонтальному

Металографічний аналіз після виявлення структури хімічним методом показав, що переважно спостерігається характерна для LPBF-технології трекова текстура (рис. 3, а, б).

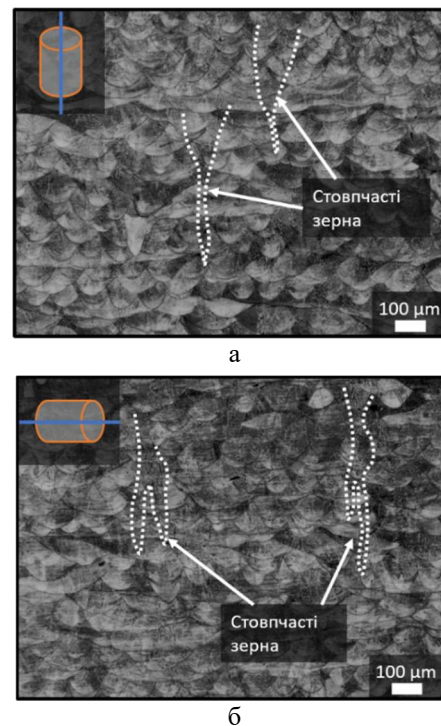


Рис. 3. Мікроструктура дослідних зразків після випробувань на розтягування, виготовлених у різних напрямках: а – у вертикальному, б – в горизонтальному

При більш детальному аналізі встановлено, що в мікроструктурі наявні стовпчасті зерна, що пов'язані з епітаксialним ростом через спрямовану теплопередачу. Також присутні осередки з дрібнодисперсною комірчастою структурою та різнонаправленими видовженими дендритоподібними ділянками, що, ймовірно, пов'язано з умовами кристалізації та взаємодією суміжних фронтів кристалізації окремих ван розплаву.

Висновки

1. Установлено вплив орієнтації виготовлення технології LPBF на механічні властивості жароміцного сплаву ABD900. Горизонтально орієнтовані зразки (XY) характеризуються вищими показниками міцності (границя міцності – 1115 МПа, границя плинності – 810 МПа) порівняно з вертикально орієнтованими (Z) на 6,1% та 9,8% відповідно.

2. Установлено, що вертикально орієнтовані (Z) зразки характеризуються вищими пластичними властивостями на 4,5 та 14,5% для відносного видовження та відносного звуження, відповідно, порівняно з горизонтально орієнтованими (XY).

3. Показано, що мікроструктура сплаву ABD900 характеризується наявністю типової для LPBF-технології текстурованої будови з областями ван розплаву, стовпчастими зернами епітаксialного походження та дрібнодисперсною комірчасто-дендритною структурою.

4. Отримані результати свідчать, що орієнтація виготовлення є одним із факторів формування комплексу механічних властивостей сплаву ABD900 і повинна враховуватися при проєктуванні відповідальних виробів, виготовлених за технологією LPBF.

Внесок авторів: формування проблеми – Г. А. Кононенко, Р. В. Подольський; огляд та аналіз інформаційних джерел – С. В. Аджамський, Г. А. Кононенко, Р. В. Подольський; розробка дослідницького стенду – С. В. Аджамський; виготовлення дослідних зразків – С. В. Аджамський, С. І. Бадюк; проведення випробувань – Г. А. Кононенко, Р. В. Подольський; аналіз отриманих результатів – Г. А. Кононенко, Р. В. Подольський, С. І. Бадюк

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що немає конфлікту інтересів щодо цього дослідження, фінансового, особистого, авторського чи іншого, який міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті.

Фінансування

Дослідження проведено в рамках проекту «Дослідження режимів впливу LPBF-методу та термічної обробки на мікроструктуру і властивості сплаву ABD900» (ДР №0126U002162), який фінансується в рамках грантів НАН України дослідницьким лабораторіям/групам молодих вчених НАН України для проведення досліджень за ключовими напрямками розвитку науки і техніки.

Наявність даних

Рукопис не має супутніх даних.

Використання штучного інтелекту

Під час підготовки рукопису використовувався сервіс Grammarly, призначений для орфографії, граматики та стилістичного редагування тексту. Інструменти штучного інтелекту не використовувалися для аналізу даних, інтерпретації результатів дослідження чи формування наукових висновків.

Подяка

Автори висловлюють подяку співробітникам ТОВ «Адитивні лазерні технології України»

Дерягіну Антону Ігоревичу, ІЧМ НАНУ Шпак Олені Адольфівні та Швець Людмилі Іванівні.

Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

Література

1. Mahoney, M. W. *Superplastic Properties of Alloy 718. "Superalloy 718 Metallurgy and Applications"* / M. W. Mahoney. – TMS, 1989. – P. 391-405.
2. Yoon, K. B. *Effects of build direction on tensile and creep properties of 316L stainless steel produced by selective laser melting* / K. B. Yoon, D. Van Hung, J. Yu // *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. – 2020. – Vol. 43. – P. 2623-2636.
3. *Investigation of crystal growth mechanism during selective laser melting and mechanical property characterization of 316L stainless steel parts* / D. Wang, C. Song, Y. Yang, Y. Bai // *Materials & Design*. – 2016. – Vol. 100. – P. 291-299.
4. Zhang, B. *The study of the laser parameters and environment variables effect on mechanical properties of high compact parts elaborated by selective laser melting 316L powder* / B. Zhang, L. Dembinski, C. Coddet // *Materials Science and Engineering: A*. – 2013. – Vol. 584. – P. 21-31.
5. Reed, R. C. *Alloys-By-Design: Application to nickel-based single crystal superalloys* / R. C. Reed, T. Tao, N. Warnken // *Acta Materialia*. – 2009. – Vol. 57, iss. 19. – P. 5898-5913.

References

1. Mahoney, M. W. *Superplastic Properties of Alloy 718. "Superalloy 718 Metallurgy and Applications"*. TMS, 1989, pp. 391-405.
2. Yoon, K. B., Van Hung, D., Yu, J. *Effects of build direction on tensile and creep properties of 316L stainless steel produced by selective laser melting. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2020, vol. 43, pp. 2623-2636.
3. Wang, D., Song, C., Yang, Y., Bai, Y. *Investigation of crystal growth mechanism during selective laser melting and mechanical property characterization of 316L stainless steel parts. Materials & Design*, 2016, vol. 100, pp. 291-299.
4. Zhang, B., Dembinski, L., Coddet, C. *The study of the laser parameters and environment variables effect on mechanical properties of high compact parts elaborated by selective laser melting 316L powder. Materials Science and Engineering: A*, 2013, vol. 584, pp. 21-31.
5. Reed, R. C., Tao, T., Warnken, N. *Alloys-By-Design: Application to nickel-based single crystal superalloys. Acta Materialia*, 2009, vol. 57, iss. 19, pp. 5898-5913.

Надійшла до редакції 13.06.2026, отримано в доопрацьованому вигляді 03.08.2026.

Дата ухвалення 19.08.2026, дата публікації 04.09.2026

DEPENDENCE OF MECHANICAL PROPERTIES OF ALLOY ABD900 ON STRUCTURE ORIENTATION IN LPBF

S.V. Adjamskiy, G.A. Kononenko, R.V. Podolskiy, S.I. Baduk

Features of LPBF technology can lead to directional structures and anisotropy in the material's mechanical properties, necessitating further research into new heat-resistant alloys optimized for additive manufacturing. **Purpose:** study of the influence of manufacturing orientation on the mechanical properties of test specimens made of heat-resistant alloy ABD900. **Research objectives:** development of CAD models of tensile test specimens in accordance with DSTU ISO 6892:2019, with manufacturing parameters: power - 195 W, scanning speed - 1100 mm/s, distance between tracks - 0.09 mm, layer thickness - 40 μm ; determination of mechanical properties of test specimens made in horizontal and vertical directions; determination of the continuity of test specimens by the metallographic method after tensile tests. **Research methods.** Production of experimental samples from heat-resistant powder of the ABD900 alloy using LPBF technology, and microscopic studies using an AxioVert 200M Mat optical microscope. **Scientific novelty.** The regularities of the influence of the manufacturing orientation using LPBF technology on the mechanical properties and structural state of the heat-resistant alloy ABD900 have been established. **Practical significance.** The results obtained can be used to select the orientation for manufacturing parts from the ABD900 alloy, ensuring the required strength and ductility for the intended purpose. **Results.** It was established that horizontally oriented samples (XY) exhibit higher strength indicators: the strength limit is 1115 MPa, and the yield strength is 810 MPa, which are 6.1% and 9.8% higher, respectively, than those of vertically oriented samples. At the same time, samples manufactured in the Z direction exhibit higher plastic properties: the relative elongation is 43.8%, and the relative narrowing is 41.3%, which are 4.5% and 14.5% higher than the values for the horizontal ones, respectively. Metallographic studies have established a high density of the material (99.75%) and the presence of individual spherical pores measuring 2-11 μm . A textured structure with columnar grains of epitaxial origin and a finely dispersed cellular-dendritic structure, characteristic of LPBF technology, has been revealed. It has been shown that the manufacturing orientation is one of the determining factors in the formation of the complex of mechanical properties of the ABD900 alloy.

Keywords: LPBF technology; manufacturing orientation, ABD900, microstructure, mechanical properties.

Аджамський Сергій Вікторович – Ph.D, головний конструктор LLC «Additive Laser Technology of Ukraine», старший науковий співробітник Інституту транспортних систем і технологій НАН України, Дніпро, Україна.

Кононенко Ганна Андріївна – докт. техн. наук, старший науковий співробітник Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, інженер-матеріалознавець LLC «Additive Laser Technology of Ukraine», професор НТУ «Дніпровська Політехніка» Дніпро, Україна.

Подольський Ростислав Вячеславович – Ph.D, старший науковий співробітник Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, інженер-матеріалознавець LLC «Additive Laser Technology of Ukraine», Дніпро, старший науковий співробітник Інституту прикладних систем управління НАН України, Київ, Україна.

Бадюк Сергій Іванович – канд. техн.наук, інженер-технолог LLC «Additive Laser Technology of Ukraine», Дніпро, старший науковий співробітник Інституту прикладних систем управління НАН України, Київ, Україна.

Sergey Adjamskiy – PhD, Chief Designer of LLC "Additive Laser Technology of Ukraine", senior researcher at the Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine, e-mail: info@alt-print.com, ORCID 0000-0002-6095-8646.

Ganna Kononenko – Doct. Technical Science, Senior Researcher at the Institute of Iron and Steel of Z.I. Nekrasov NAS of Ukraine, Materials Engineer LLC Additive Laser Technology of Ukraine, Professor of NTU "Dnipro Polytechnic" Dnipro, Ukraine, e-mail: perlit@ua.fm, ORCID 0000-0001-7446-4105.

Rostyslav Podolskiy – PhD, Senior Researcher at the Institute of Iron and Steel of Z.I. Nekrasov NAS of Ukraine, Materials Engineer LLC Additive Laser Technology of Ukraine, Dnipro, Senior Researcher, Institute of Applied Control Systems, NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine, e-mail: rostislavpodolskij@gmail.com, ORCID 0000-0002-0288-0641.

Sergey Baduk – Cand. Technical Science, Process Engineer LLC «Additive Laser Technology of Ukraine», Dnipro, Senior Researcher, Institute of Applied Control Systems, NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine, e-mail: uroboroz33@gmail.com, ORCID 0000-0002-1074-3057.