

ФОРМУВАННЯ МІКРОСТРУКТУРИ НІКЕЛЕВОГО СУПЕРСПЛАВУ ABD900 ПІСЛЯ LPBF ТА ЙОГО ПОРІВНЯННЯ ЗІ СПЛАВОМ INCONEL 718

Анотація. У роботі представлено результати дослідження формування мікроструктури та порівняльного аналізу нікелевих суперсплавів ABD900 та Inconel 718, виготовлених методом лазерного плавлення в порошковому шарі (Laser Powder Bed Fusion, LPBF). Адитивні технології в останні роки активно застосовуються у високотехнологічних галузях промисловості завдяки можливості виготовлення деталей зі складною геометрією та високими експлуатаційними характеристиками. Разом із тим використання традиційних жароміцних сплавів, розроблених для лиття або деформаційних технологій, у процесах адитивного виробництва може супроводжуватися рядом технологічних обмежень, зокрема утворенням тріщин, пористості та нестабільністю мікроструктури. У зв'язку з цим значна увага приділяється розробці нових сплавів, спеціально оптимізованих для процесів адитивного виробництва. Одним із таких матеріалів є нікелевий суперсплав ABD900, створений із застосуванням концепції Alloy By Design та призначений для використання в процесах LPBF. Порівняльний аналіз пористості показав, що у зразках зі сплаву Inconel 718 переважають пори розміром 2–10 мкм із максимальними значеннями до 12–14 мкм, тоді як у сплаві ABD900 в цілому менша кількість пор. Їх розміри переважно в діапазоні 2–12 мкм, не було виявлено поодиноких пор з більшим розміром порівняно зі зразком, виготовленим з Inconel 718. Мікроструктурний аналіз показав формування характерної для процесу LPBF лускатої структури треків плавлення. У зразках зі сплаву Inconel 718 спостерігається більша виражена клітинно-дендритна морфологія кристалізації, тоді як у сплаві ABD900 в окремих ділянках мікроструктура характеризується формуванням дрібноклітинної γ -Ni матриці. Отримані результати підтверджують перспективність використання сплаву ABD900 для адитивного виробництва та демонструють особливості формування його мікроструктури у порівнянні з Inconel 718.

Ключові слова: LPBF, нікелеві суперсплави, ABD900, Inconel 718, мікроструктура, пористість.

Вступ. Адитивні технології (АТ) є сучасною технологією, що наразі широко застосовується в різних галузях авіаційної, енергетичної, медичної, машинобудівної. АТ демонструють трансформацію сучасної металургії та матеріалознавства, забезпечуючи швидке виготовлення деталей зі складною геометрією та контрольованими механічни-

ми властивостями. АТ в цілому має великий перелік методів вирощування деталей кожна з яких має свої особливості. В даній роботі особливу увагу буде приділено методу лазерного плавлення в порошковому шарі (LPBF). Дана технологія добре зарекомендувала себе з точки зору застосування в різних вище зазначених галузях [1,2] через значні покращення продуктивності, відносної щільності та можливість вирощування деталей зі складними геометричними параметрами.

Однак поряд із технологічними параметрами LPBF важливим фактором є матеріал, що використовується для виготовлення деталей. В більшості випадків в даній області застосовується матеріали, що добре себе зарекомендували в області традиційних технологій. Хоч застосовувані матеріали і достатньо добре висвітлені в наукових публікаціях та мають велику кількість відповідної нормативно-технічної документації, що дає значне розуміння процесів формування структури та властивостей під час кристалізації та обробки, то застосування даних матеріалів для методу LPBF спонукає до нових викликів для області матеріалознавства через складності у виготовленні деталей. Особливу увагу в даному дослідженні планується приділити нікелевим сплавам, що застосовуються в авіаційній галузі.

Аналіз останніх досліджень. Нікелеві сплави доволі часто використовуються в авіаційній галузі, ці сплави відомі своєю винятковою високотемпературною міцністю та корозійною стійкістю, що робить їх привабливими для застосування в агресивних умовах експлуатації. Однак наразі асортимент нікелевих суперсплавів, що є комерційно вигідними для АТ, обмежений кількома ключовими сплавами, такими як Inconel 718, Haynes 282 та ін., які підходять для застосування при температурі до 800°C. Дане обмеження є перешкодою, особливо враховуючі зростаючий попит на деталі, які експлуатуються при більш високих температурах.

Враховуючи вищезазначене, дослідники [3] високу увагу приділяють розробці нових сплавів таких, як сплав ABD900. Даний сплав був розроблений новим інноваційним підходом Alloy By Design, що є значним проривом, так як сплав ABD900 було спеціально розроблено для АТ.

Сплав ABD900 володіє, так званою, властивістю «покращеної друкованості», як згадується в деяких роботах [3-4]. Це пояснюється високим діапазоном технологічних параметрів, при яких вирощування деталей різного перерізу досягає рівня відносної щільності більше 99,0%. Даний нікелевий сплав має в своєму складі до десяти легуючих елементів, таких як Cr, Si, Co, що сприяють підвищенню стійкості до окислення; Mo, W – уповільнюють термічно-активні, деформаційні процеси в тому числі зсув дислокацій; Al, Ta, Ti – сприяють дисперсійному зміцненню, та є необхідними для формування γ - фази.

Як стверджується в деяких роботах [5], у сплаві ABD900 після виготовлення методом LPBF відсутня дендритна морфологія кристалізації ванни розплаву, і структура складається переважно з дрібноклітинної фази γ -Ni. Це вказує на можливість не застосовувати параметри термічної обробки на твердий розчин, що доволі часто застосовують в традиційних технологіях та до сплавів, що в першу чергу виготовлялись для тра-

диційних технологій та застосовуються в LPBF. Незважаючи на значний інтерес до сплаву ABD900, особливості формування його мікроструктури після LPBF та порівняння з традиційними суперсплавами, зокрема Inconel 718, досліджені недостатньо. Таким чином в даній роботі буде проведено порівняльний аналіз сплаву ABD900 в порівнянні зі сплавом Inconel 718.

Мета дослідження. Метою роботи є дослідження формування мікроструктури та морфології кристалізації суперсплаву на основі нікелю ABD900 після виготовлення методом LPBF та порівняння отриманих характеристик зі сплавом Inconel 718.

Методика проведення досліджень. В рамках дослідження використано дослідні зразки розміром 10x10x5 мм, що виготовлені з застосуванням 3D-принтеру виробництва ТОВ «Адитивні лазерні технології України».

Дослідні зразки були виготовлені з жароміцного сплаву ABD900 та Inconel 718, хімічний склад представлено в таблиці 1. Гранулометричний аналіз дослідного порошку показав, що розмір частинок складає 20 ± 15 мкм.

Таблиця 1

Хімічний склад дослідних зразків, % ваг.

Матеріал	Cr	C	Cu	Nb	Al	Mo	Ti	Co	Si	Ta	W	Fe	Ni
Inconel 718	17,8	0,02	0,06	5,5	0,5	3,0	0,9	0,3	0,07	-	-	18,0	База
ABD 900	17,96	0,06	0,02	1,62	2,7	2,6	2,52	19,1	0,09	1,44	2,66	0,07	База

Дослідні зразки для металографічного аналізу були виготовлені за ідентичними технологічними параметрами: потужність - 195 Вт, швидкість сканування - 1100 мм/с, відстань між треками - 0,09 мм, номінальна товщина шару – 40 мкм, питома щільність енергії – 49,2 Дж/мм³.

Аналіз відносної щільності було виконано на поперечному перерізі мікروشліфів зразків, механічна підготовка виконувалось механічним способом з застосуванням змінних дисків різної зернистості та послідовним поліруванням на спеціалізованому обладнанні Struers LaboPol-5. Пористість в зразках вимірювались з застосуванням програмного забезпечення ImageJ з використанням вбудованої функції «Аналіз частинок». Під час досліджень елементи розміром менше 2 мкм відфільтровувались для запобігання впливу потенційних дефектів, що сформувались в процесі підготовки зразків, на результат оцінки пористості.

Аналіз мікроструктури виконувався на хімічно травлених зразках із застосуванням розчину Каллінга №1 (Inconel 718) та Каллінга №2 (ABD900).

Оптична мікроскопія виконувалось в світлопольному освітленні з застосуванням інвертованого мікроскопа Axiovert 200 Mmat.

Результати досліджень. Аналіз дослідного зразка в полірованому стані з Inconel 718 (рис. 1) та ABD 900 (рис. 2) показав, що відносна щільність зразка складає 99,8%.

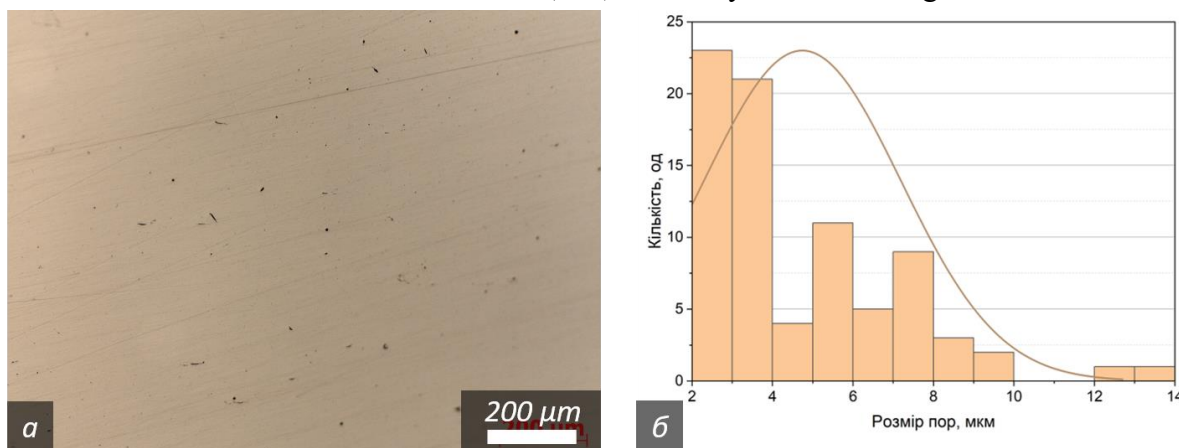


Рисунок 1 – Аналіз в полірованому стані (а) дослідного зразка виготовленого з Inconel 718, кількісна оцінка (б)

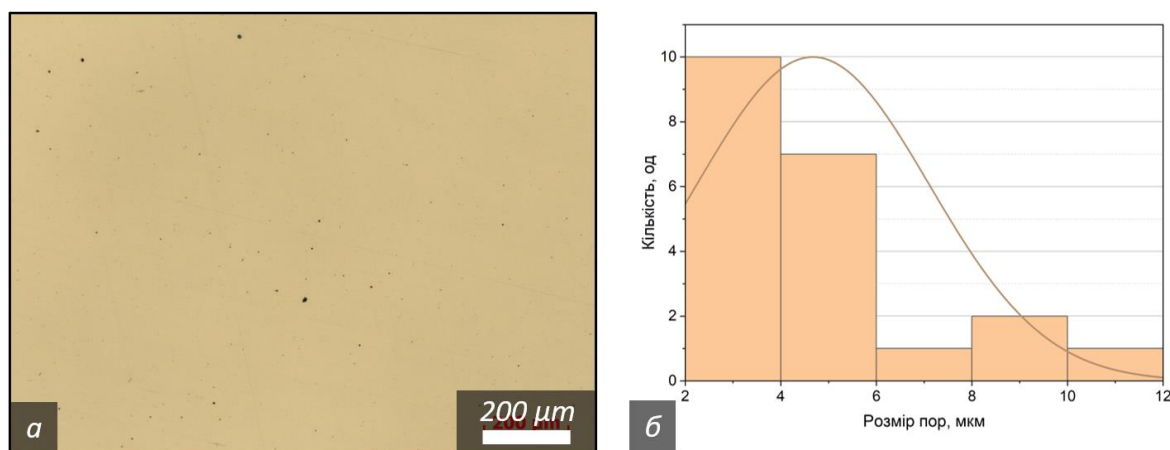


Рисунок 2 – Аналіз в полірованому стані (а) дослідного зразка виготовленого з ABD900, кількісна оцінка (б)

При більш детальному аналізі дослідних зразків в полірованому стані було встановлено, що при виготовленні за однаковими-технологічними параметрами кількість виявлених пор в дослідному зразку з Inconel 718 менше, ніж в зразку, що був виготовлений з ABD900. Проведений аналіз (рис. 1-2) показав, що дослідний зразок з Inconel 718 має пори розміром в діапазоні 2-10 мкм, а максимальний розмір виявлених поодиноких пор склав 12-14 мкм. В той же час в дослідному зразку ABD900 присутня в цілому менша кількість пор. Їх розміри переважно в діапазоні 2-12 мкм, не було виявлено поодиноких пор з більшим розміром порівняно зі зразком, виготовленим з Inconel 718. В цілому, проведений порівняльний аналіз показав, що отримані результати узгоджуються з повідомленнями інших авторів щодо підвищеної технологічної придатності сплаву ABD900 [4]. Безперечно вони пов'язували цей термін з тріщиноутворенням, але як показують ці результати, то цей термін, ймовірно, можна попередньо пов'язати з пороутворенням. При порівняльному дослідженні відносної щільності даних дослідних зразків, виготовлених з різних матеріалів, при застосуванні раціональних параметрів можна стверджувати, що відносна щільність у дослідних зразках на рівні 99,8%.

На наступному етапі було проведено дослідження мікроструктури дослідних зразків (рис. 3).

В результаті проведеного аналізу мікроструктури дослідних зразків встановлено, що мікроструктура переважно складається з типової лускатої структури. В результаті аналізу мікроструктури слід зазначити, що дослідний зразок, виготовлений з Inconel 718 має зони з вираженими різноорієнтованими дендритами в більшості треків. В той час, як в дослідному зразку ABD900 також прослідковувались області з дендритами, але в деяких треках структура складалась переважно з γ - матриці. Ймовірно, це пов'язано з застосованим реактивом для хімічного виявлення структури або з вищезначеним ефектом при кристалізації сплаву ABD900, а саме з формуванням дрібноклітинної структури γ -Ni. У зв'язку з цим виникає необхідність у проведенні поглиблених досліджень із залученням більш детального мікроструктурного аналізу та оцінки мікроструктури з метою інтерпретації сформованої структури.

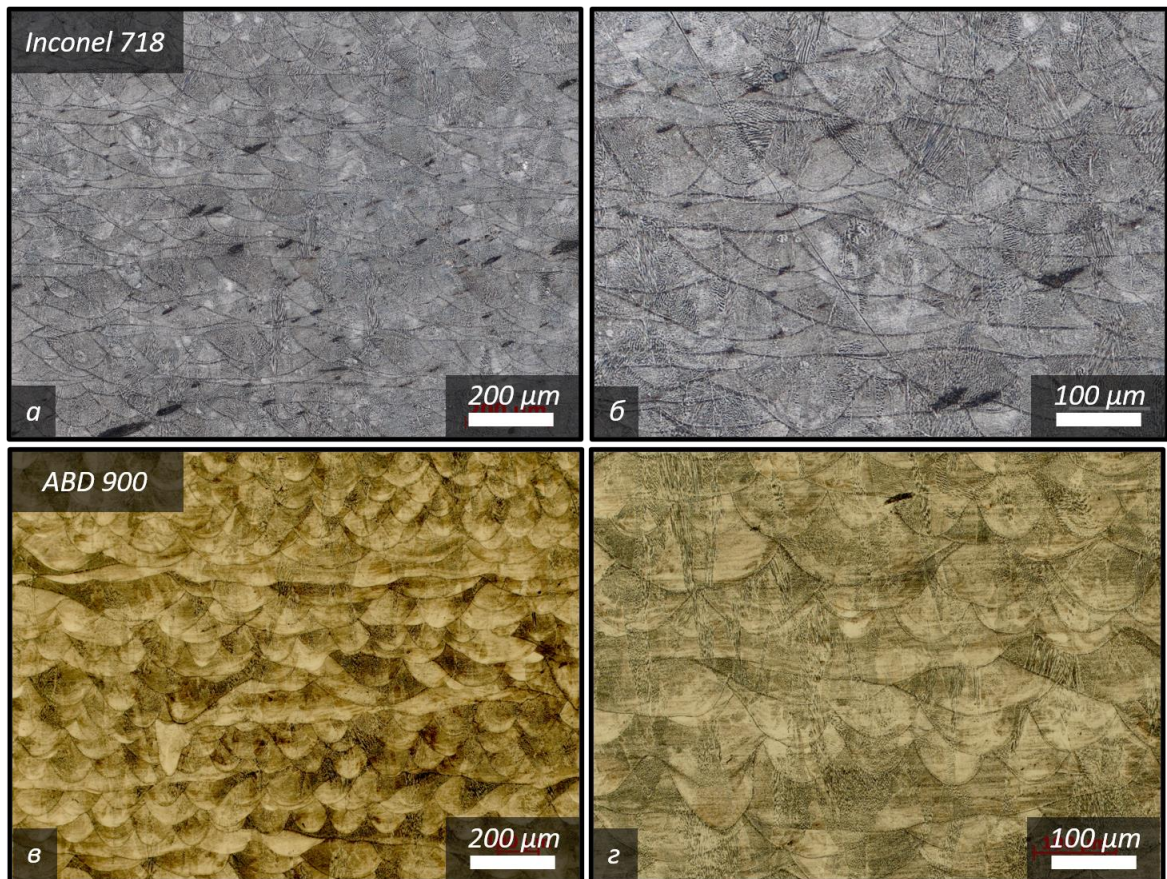


Рисунок 3 – Мікроструктура дослідних зразків з Inconel 718 (а, б) та ABD900 (в, г)

Подальші дослідження доцільно спрямувати на детальне дослідження субструктури кристалізації сплаву ABD900 із аналізом фазового складу, а також оцінку механічних властивостей після різних режимів термічної обробки.

Висновки:

1. Встановлено, що при застосуванні однакових раціональних технологічних параметрів процесу LPBF відносна щільність дослідних зразків зі сплавів Inconel 718 та ABD900 становить близько 99,8 %.

2. Порівняльний аналіз пористості показав, що у зразках зі сплаву Inconel 718 переважають пори розміром 2–14 мкм, тоді як у сплаві ABD900 спостерігається в цілому менша кількість пор з розмірами переважно в діапазоні 2-12 мкм.

3. Мікроструктурний аналіз показав формування характерної для процесу LPBF лускатої структури треків плавлення та клітинно-дендритної морфології кристалізації.

4. У зразках зі сплаву Inconel 718 спостерігається більш виражена дендритна структура, тоді як у сплаві ABD900 в окремих ділянках формується дрібноклітинна γ -Ni структура.

5. Отримані результати підтверджують перспективність використання сплаву ABD900 для адитивного виробництва та демонструють особливості формування його мікроструктури у порівнянні з Inconel 718.

ЛІТЕРАТУРА

1. Blakey-Milner B., Gradl P., Snedden G., Brooks M., Pitot J., Lopez E., Leary M., Berto F., du Plessis A. Metal additive manufacturing in aerospace: A review. *Materials & Design*. 2021, 209, 110008. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110008>
2. Kennedy S. M., Vasanthanathan A., Amudhan K. Exploring the frontiers of metal additive manufacturing in orthopaedic implant development. *MethodsX*. 2024. 13, 103056. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2024.103056>
3. Reed R.C., Tao T., Warnken N. Alloys-By-Design: Application to nickel-based single crystal superalloys. *Acta Materialia*. 2009. 57, 19, 5898-5913. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2009.08.018>
4. Tang Y.T., Panwisawas C., Ghousoub J. N., Gong Y., Clark J. W.G, Németh A. A.N., McCartney D. G., Reed R. C. Alloys-by-design: Application to new superalloys for additive manufacturing. *Acta Materialia*. 2021. 202, 417-436. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.09.023>
5. Bridges A., Shingledecker J., Hussain Z., Forster J., Nemeth A., Vogel G., O’Nora N. Acceleration of Material Acceptance and Industry Adoption of an Additively Manufactured Nickel-base Superalloy. Proceedings of the AM-EPRI 2024. Advances in Materials, Manufacturing, and Repair for Power Plants: Proceedings from the Tenth International Conference. Indian Wells, California, USA. 74-87. ASM. <https://doi.org/10.31399/asm.cp.am-epri-2024p0074>

REFERENCES

1. Blakey-Milner B., Gradl P., Snedden G., Brooks M., Pitot J., Lopez E., Leary M., Berto F., du Plessis A. (2021). Metal additive manufacturing in aerospace: A review. *Materials & Design*. 209, 110008. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110008>
2. Kennedy S. M., Vasanthanathan A., Amudhan K. (2024). Exploring the frontiers of metal additive manufacturing in orthopaedic implant development. *MethodsX*. 13, 103056. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2024.103056>
3. Reed R.C., Tao T., Warnken N. (2009). Alloys-By-Design: Application to nickel-based single crystal superalloys. *Acta Materialia*. 57, 19, 5898-5913. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2009.08.018>

4. Tang Y.T., Panwisawas C., Ghoussoub J. N., Gong Y., Clark J. W.G, Németh A. A.N., McCartney D. G., Reed R. C. (2021). Alloys-by-design: Application to new superalloys for additive manufacturing. *Acta Materialia*. 202, 417-436.

<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.09.023>

5. Bridges A., Shingledecker J., Hussain Z., Forster J., Nemeth A., Vogel G., O’Nora N. (2024). Acceleration of Material Acceptance and Industry Adoption of an Additively Manufactured Nickel-base Superalloy. Proceedings of the AM-EPRI 2024. Advances in Materials, Manufacturing, and Repair for Power Plants: Proceedings from the Tenth International Conference. Indian Wells, California, USA. 74-87. ASM. <https://doi.org/10.31399/asm.cp.am-epri-2024p0074>

Received 24.04.2026.

Accepted 27.04.2026.

Published 30.04.2026

Microstructure formation of the nickel-based superalloy ABD900 after LPBF and its comparison with Inconel 718

The paper presents the results of a study on microstructure formation and a comparative analysis of the nickel-based superalloys ABD900 and Inconel 718 manufactured by Laser Powder Bed Fusion (LPBF). In recent years, additive manufacturing technologies have been increasingly applied in high-tech industries due to their ability to produce components with complex geometries and high-performance characteristics. However, the use of conventional high-temperature alloys, originally developed for casting or thermomechanical processing, in additive manufacturing processes may be associated with several technological limitations, including cracking, porosity, and microstructural instability. In this context, considerable attention has been devoted to the development of new alloys specifically optimized for additive manufacturing. One such material is the nickel-based superalloy ABD900, developed using the Alloy By Design approach and intended for LPBF applications. A comparative analysis of porosity revealed that samples of Inconel 718 are characterized by pores predominantly in the range of 2–10 μm , with maximum sizes reaching 12–14 μm , whereas the ABD900 alloy exhibits an overall lower porosity. The pore sizes in ABD900 are mainly within the range of 2–12 μm , and no isolated larger pores were observed compared to the Inconel 718 samples. Microstructural analysis demonstrated the formation of a characteristic melt track morphology typical for the LPBF process. In the Inconel 718 samples, a more pronounced cellular-dendritic solidification structure was observed, whereas in the ABD900 alloy, certain regions of the microstructure are characterized by the formation of a fine cellular γ -Ni matrix. The obtained results confirm the potential of ABD900 for additive manufacturing applications and highlight the specific features of its microstructure formation in comparison with Inconel 718.

Keywords: LPBF, nickel superalloys, ABD900, Inconel 718, microstructure, porosity.

Аджамський Сергій Вікторович – PhD, технічний директор LLC «Additive Laser Technology of Ukraine», старший науковий співробітник Інституту транспортних систем і технологій Національної академії наук України, Дніпро, Україна.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6095-8646>

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

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7446-4105>

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

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0288-0641>

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

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1074-3057>

Подольська Олена Анатоліївна – науковий співробітник Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, Дніпро, Україна.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4032-4275>

Adjamskiy Sergey – PhD, Technical Director of Additive Laser Technology of Ukraine LLC, senior researcher at the Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6095-8646>

Kononenko Ganna - Doct. technical science, sen. researcher, scientific secretary of the Institute of Iron and Steel of Z.I. Nekrasov NAS of Ukraine, Professor of NTU "Dnipro Polytechnic", materials engineer LLC Additive Laser Technology of Ukraine, Dnipro, Ukraine.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7446-4105>

Podolskiy Rostyslav – PhD, senior researcher of the Institute of Iron and Steel of Z.I. Nekrasov NAS of Ukraine, materials engineer LLC Additive Laser Technology of Ukraine, Senior Researcher at the Institute of Applied Control Systems NAS of Ukraine, Dnipro, Ukraine.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0288-0641>

Baduk Sergey – Cand. technical science, materials engineer LLC Additive Laser Technology of Ukraine, Process engineer LLC "Additive Laser Technology of Ukraine", senior researcher, Institute of Applied Control Systems, NAS of Ukraine, Dnipro, Ukraine.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1074-3057>

Podolska Olena – researcher of the Institute of Iron and Steel of Z.I. Nekrasov NAS of Ukraine, Dnipro, Ukraine.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4032-4275>