

С.В. Аджамський, Г.А. Кононенко, Р.В. Подольський

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СПОСОБІВ

МІНІМІЗАЦІЇ ЗАЛИШКОВИХ ВНУТРІШНІХ НАПРУЖЕНЬ ПРИ SLM

*Анотація. Адитивне виробництво (далі –*en.* АМ) є сучасним комплексом технологій, які дають змогу швидко та якісно створювати вироби з унікальною геометрією, яку неможливо або складно виготовити традиційними способами виробництва. Наразі дослідники приділяють увагу двом великим напрямкам, а саме системам якості АМ та пошуку нових закономірностей у вже доволі відомих матеріалах, що виготовлялися традиційним способом. Дана технологія має ряд переваг для виготовлення виробів авіаційно космічного призначення, але, як і всі технології виробництва, дана технологія має ряд недоліків та проблем. Залишкові внутрішні напруження є однією з особливостей металевих матеріалів, виготовлених шляхом пошарового сплавлення за SLM технологією, але вони можуть значно впливати на механічні властивості та геометричні параметри. Їх присутність є особливо важливою для матеріалів АМ, що неминуче призводять до значних внутрішніх напружень. У зв'язку з цим важливою є мінімізація залишкових напружень в процесі виготовлення деталей за технологією SLM. Для запобігання відхилень за геометрією деталі необхідно враховувати співвідношення між щільністю питомої енергії, що підводиться, і її поглинанням під час процесу. Однак, оптимальні технологічні параметри і стратегії побудови SLM процесу для полікристалічних матеріалів складно передбачити, оскільки якість виробу залежить від великої кількості факторів. Пошук шляхів попередньої оцінки і розробка заходів щодо зниження залишкових напружень при виготовленні деталей за технологією SLM є актуальним завданням сучасного матеріалознавства. Таким чином питання зменшення впливу внутрішніх напружень потребує фундаментального розуміння їх впливу на геометричні параметри та службові характеристики матеріалів АМ.*

Ключові слова: адитивне виробництво, залишкові внутрішні напруження, параметри, SLM технологія.

Вступ

В останні роки виробництво металевих виробів за допомогою вихідної CAD-моделі безпосередньо за електронними даними на основі пошарового виготовлення перетворилося з швидкого прототипування в АМ [1-3]. На відміну від традиційних виробничих технологій, АМ пропонує набагато більшу свободу проектування. Вперше конструкція виробів більше не сильно обмежена методом виробництва, тобто окремими деталями високої складності, наприклад

комірчастої конструкції, складна внутрішня структура або охолоджуючі канали можуть бути реалізовані без урахування конкретних правил проектування. Крім того, деталі, розроблені за допомогою комп'ютерних технологій (CAD), можуть бути піддані процедурам топологічної оптимізації [4] і реалізовані без додаткових витрат на технологічне обладнання та операції при виготовленні. Це дає безліч переваг: складна геометрія, зниження ваги, короткий час виконання замовлення, зменшення відходів, інтеграція функцій і т. д. При застосуванні технології SLM метал піддається впливу лазера, що призводить до його плавлення. Коли метал остигає, виникають напруження стиснення, які можуть призводити до зміни початкової форми (викривлення) виробу [5-8]. Будова металу деталей, виготовлених за SLM- технологією, має такі особливості, як дрібнозерниста структура, шаруватість, текстура в напрямку росту чи побудови виробу. Також такі вироби схильні до виникнення внутрішніх напружень через градієнт температур та складну геометрію, перехід від великого перерізу до малого. Наявність внутрішніх напружень може призводити до зниження міцності, корозійної стійкості, втомної міцності та стійкості до корозійного розтріскування. Тому для деталей зі сталі AISI 316L, виготовлених за SLM - технологією, необхідні дослідження для попередження утворення та зменшення залишкових напружень.

В результаті поведінки матеріалу зразків, надрукованих при різних стратегіях побудови, формуються області напружень, що розтягуються або стискаються, які можна представити у вигляді істинної діаграми розтягування (рис. 1), яка б показала відношення між подовженням і напруженням. При перевищенні границі плинності, метал демонструє пластичну поведінку, що характеризується невідновлюваною пластичною деформацією, і залежність деформації від напруження стає нелінійною.

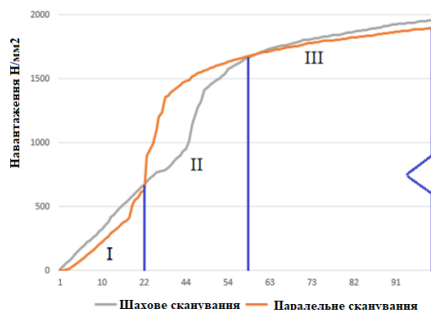


Рисунок 1 – Істинна діаграма розтягування зразків з паралельною і шаховою стратегією сканування: I – ділянка пропорційності, II – ділянка плинності, III – ділянка само зміцнення [9]

При формуванні залишкових напружень крім високих швидкостей охолодження і постійного сусідства рідкого і твердого металу в процесі побудови деталі, важливою є нерівномірність розподілу залишкових напружень, пов'язаних з геометрією: наявність виступаючих частин, переходів від товстого до тонкого перетину, гострокутних елементів та отворів.

При виготовленні деталей за технологією SLM в області контуру (краю) масивного виробу виникають напруження, які можуть призводити до утворення ряду дефектів [10]: зміни вихідної форми (викривлення) виробу [8] (рис. 2, а), утворення пор і розшарування між новим і холоду металом через зміни його геометрії (рис. 2, б), виникнення мікротріщин (рис. 2, в), формування вираженої текстури, що призводить до зниження механічних властивостей і їх анізотропності.

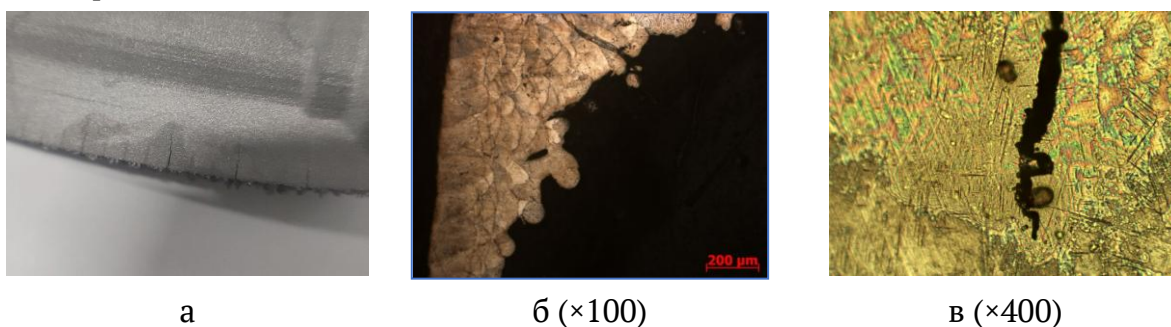


Рисунок 2 – Дефекти, що утворились через залишкові внутрішні напруження
а – викривлення, б – розшарування, в – мікротріщина

У зв'язку з цим важливою є мінімізація залишкових напружень в процесі виготовлення деталей за технологією SLM. Для запобігання відхилень за геометрією деталі необхідно враховувати співвідношення між щільністю питомої енергії, що підводиться, і її поглинанням під час процесу [11]. Однак, оптимальні технологічні параметри [12] і стратегії побудови [13] SLM -процесу для полікристалічних матеріалів складно передбачити, оскільки якість виробу залежить від великої кількості факторів. Пошук шляхів попередньої оцінки і розробка заходів щодо зниження залишкових напружень при виготовленні деталей за технологією SLM є актуальним завданням сучасного матеріалознавства.

Постановка мети і завдань дослідження

Систематизація шляхів мінімізації залишкових внутрішніх напружень керуванням технологічними параметрами виготовлення.

Аналіз останніх років

Якщо розглядати більш детально питання мінімізації внутрішніх залишкових напружень зі збереженням необхідного рівня механічних властивостей шляхом керування параметрами та стратегіями сканування, то існує ряд різних стратегій руху лазерного променя в шарі, який сплавляється [12] (рис. 3).

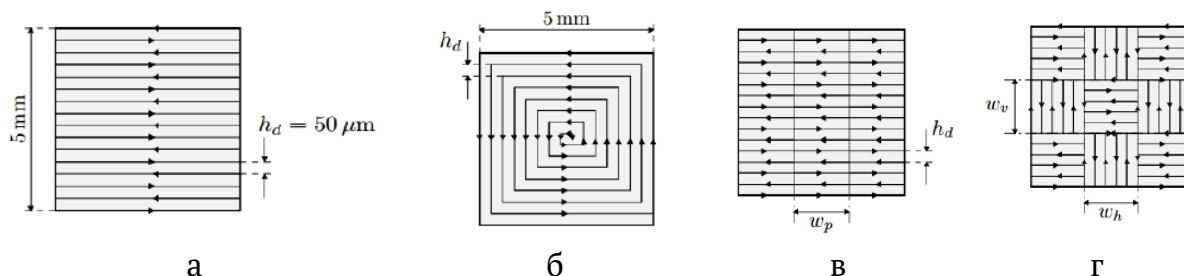


Рисунок 3 – Види стратегії сканування [12]: а – паралельне сканування, б – спіральне сканування, в – різнонаправлене паралельне сканування, г – сканування у шахівному порядку

Автори досліджень [13] змінювали напрямок сканування лазера в кожному новому шарі на певний кут щодо попереднього шару на 90° , 105° , 120° , 135° , 150° . Крайні механічні властивості були у об'єктів, отриманих при куті повороту 105° , коли шари з однаковим напрямком руху лазерного променя повторювалися тільки через 24 шари. В результаті цих досліджень авторами було встановлено, що стратегія сканування відіграє важливу роль у формуванні механічних властивостей, але питанню внутрішніх напружень увагу приділено не було.

Автори роботи [14] провели дослідження на простій фігурі (призма) з розмірами $24 \text{ мм} \times 46 \text{ мм} \times 21 \text{ мм}$, виготовленої зі сталі 316L з метою визначення розподілу внутрішніх напружень на середній висоті шляхом застосування методу рентгенівської дифракції. В рамках цих досліджень було проаналізовано 2 призми, що виготовлені з різними стратегіями сканування, а саме: стратегія спірального сканування (рис 3, б), з направленням заповнення від кордонів до центру та навпаки. В результаті даних досліджень авторами [14] було встановлено, що для двох стратегій сканування спостерігався подібний розподіл внутрішніх напружень розтягування по крайовим ділянкам та стискаючих по центру. Цей розподіл характеризується стискаючими внутрішніми напруженнями в об'ємі, які врівноважується силою внутрішніх напружень розтягування на поверхні (рис. 4).

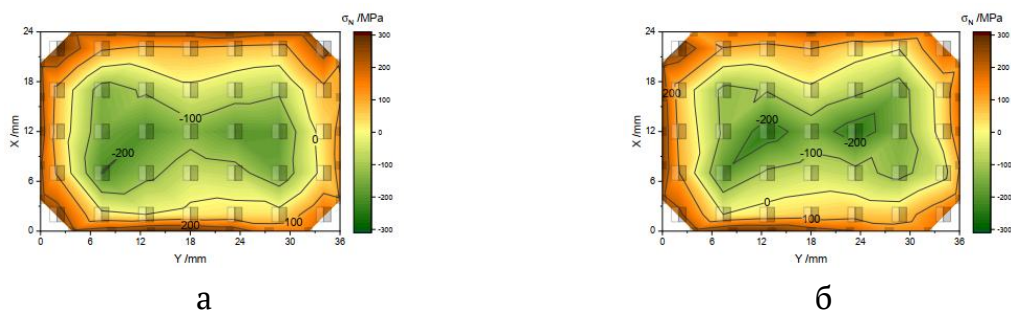


Рисунок 4 – Розподіл внутрішніх напружень в напрямлені побудови з застосуванням стратегії сканування спіральна: а – від центру до кордонів, б – від кордонів до центру [14]

При візуальній оцінці деформації (зміни геометрії зразків) в результаті дії залишкових напружень авторами [9] було відзначено, що при прямолінійному порядку друку з поворотом шарів відносно попереднього на 67° (рис.5, а) через напруження відбувається більше викривлення границі в області тонкого краю в порівнянні із зразками, побудованими при тих самих режимах, але в шаховому порядку (рис.5, б).

Мікроструктура дослідних зразків, виготовлених з різними параметрами процесу і стратегіями друку, представлена на рис. 5. Слід зазначити, що зразки не мали дефектів основного тіла (пористість, висока шорсткість). Сформована ванна розплаву основного тіла під впливом лазерного випромінювання шляхом плавлення порошкового шару і матеріалу підкладки має рівномірне проплавлення, чітко побудовані треки.

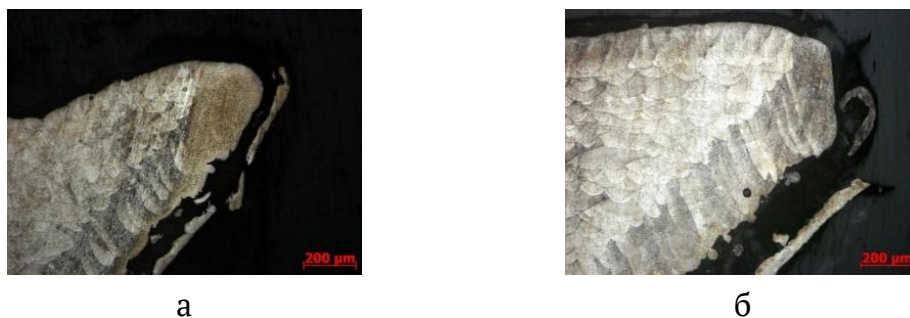


Рисунок 5 – Дослідження мікроструктури в області тонкого краю:
а – прямолінійна стратегія заливки шару,
б – заливка шару у шаховому порядку [9]

В результаті автори роботи [9] зробили висновок, що у зразках, надрукованих із стратегією побудови треків в шаховому порядку з поворотом на 67° , спостерігалось менше викривлення, ніж в зразках з прямолінійною стратегією

(рис. 3, а) друку з поворотом на 67° . В результаті було встановлено високу кореляцію внутрішніх напружень від температурних градієнтів та стратегії сканування під час виготовлення SLM, тому це потребує подальшого систематичного дослідження.

В рамках досліджень [15] авторами було застосовано комплексний підхід для аналізу макронапружень, спричинених адитивним виробництвом, з застосуванням кореляції цифрового зображення (DIC – аналіз) [16-18] у поєднанні з видаленням і розрізом робочої пластини та неруйнівного методу, а саме дифракція нейтронами. В результаті авторами [15] було отримана хороша узгодженість між двома методами вимірювання. Щодо впливу стратегії сканування на внутрішні напруження було встановлено, що зменшення залишкових внутрішніх напружень досягалось шляхом зменшення розміру поля сканування, збільшення повороту поля до 45 градусів і збільшення прикладеної енергії на одиницю довжини (потужність/швидкість лазера).

Висновки

В результаті проведеного інформаційного аналізу було встановлено, що під час процесу виготовлення деталей за допомогою SLM фактично характерним є те, що розтягуючі внутрішні напруження розвиваються на поверхнях, які врівноважені стискаючими внутрішніми напруженнями в об'ємі. Так як дослідження проводились на зразках простої форми, то отримані результати важко співставляються з деталями виробів складної геометричної форми, що мають істотні зміни геометричних розмірів по перерізу. Але слід зазначити, що застосовані, розроблені та впроваджені параметри та стратегії сканування дозволяють врівноважити внутрішні напруження, уникаючи викривлень та руйнувань. Проте автори робіт відзначили, що найбільш підходящим методом для досягнення нейтрального напруженого стану є термічна обробка для зняття внутрішніх напружень.

ЛІТЕРАТУРА

1. Vayre B., Vignat F., Villeneuve F. Metallic additive manufacturing: state-of-the-art review and prospects. *Mech. Ind.*, 2012. **13**. P. 89–96.
2. Gu D. D., Meiners W., Wissenbach K., Poprawe R. Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms. *Int. Mat. Rev.*, 2012. **57** (3). P.133–164.
3. Wong K. V., Hernandez A. A review of additive manufacturing, *ISRN Mech. Eng.* 2012. P. 1–10.

4. Brackett D., Ashcroft I., Hague R. Topology optimization for additive manufacturing. *Proc. SFF Symp. Austin Texas*. 2011. P.348–362.
5. Аджамський С. В., Кононенко Г. А., Подольський Р. В. Вплив технологічних параметрів SLM-процесу на пористість металовиробів. *Автоматичне зварювання*. 2020. 10. С. 14-20. DOI: 10.37434/tpwj2020.10.03
6. Adjamskiy S., Kononenko G., Podolskiy R. Mechanical properties of heat-resistant superalloy Inconel 718 obtained by selective laser melting and heat treatment under different load directions. *Scientific Journal of TNTU (Tern.)*. 2020. 99 (3). P. 75–85.
7. Кононенко Г. А., Аджамський С. В., Подольський Р. В., Сафронова О. А., Шпак Е. А. Порівняльні дослідження механічних властивостей зразків сталі 316L, виготовлених на машині ALFA-150 на відповідність світовим аналогам. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2022. 36. С. 370-378.
8. Аджамський С. В., Подольський Р. В., Кононенко Г. А. Дослідження впливу шорсткості на властивості зразків зі сталі AISI 316L методом реєстрації макролокалізаційних полів. *Системні технології*. 2021. 4 (135). С. 3-11. <https://doi.org/10.34185/1562-9945-4-135-2021-01>
9. Аджамський С. В., Кононенко Г. А., Подольський Р. В. Вплив параметрів SLM-процесу на формування області кордонів деталей з жароміцного нікелевого сплаву Inconel 718. *Космічна наука і технологія*. 2021. 27, № 6 (133). С. 105–114. DOI: 10.15407/knit2021.06.105
10. Parida A.K., Maity K. Comparison the machinability of Inconel 718, Inconel 625 and Monel 400 in hot turning operation. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2018. 21. P. 364–370.
11. Ciales L.E., Arisoy Y.M., Lane B. et al. Laser powder bed fusion of nickel alloy 625: experimental investigations of effects of process parameters on melt pool size and shape with spatter analysis. *Int J Mach Tools Manuf*. 2017.121. P. 22–36.
12. Wang D. Study on energy input and its influences on single-track, multi-track, and multi-layer in SLM. *Int J Adv Manuf Technol*. 2012. 58. P. 1189–1199.
13. Dilip J.J.S., Zhang S., Teng C. Influence of processing parameters on the evolution of melt pool, porosity, and microstructures in Ti-6Al-4V alloy parts fabricated by selective laser melting. *Progress in Additive Manufacturing*. 2017. 2. P.157–167.
14. Ulbricht A., Altenburg S.J., Sprengel M., Sommer K., Mohr G., Fritsch T., Mishurova T., Serrano-Munoz I., Evans A., Hofmann, M. Separation of the Formation Mechanisms of Residual Stresses in LPBF 316L. *Metals*. 2020. 10. P. 1234.

15. Wu, A.S.; Brown, D.W.; Kumar, M.; Gallegos, G.F.; King, W.E. An Experimental Investigation into Additive Manufacturing-Induced Residual Stresses in 316L Stainless Steel. *Metall. Mater. Trans. A*. 2014. **45**. P. 6260–6270.
16. Подольський Р. В., Бабаченко О. І., Кононенко Г. А., Романова Н. С., Сафронова А. О., Клемшов Е. С. Застосування спеціалізованого програмного забезпечення в матеріалознавстві та термічній обробці металів та сплавів: методичний посібник. Дніпро: УДУНТ, 2022. 65 с.
17. Adjamskiy, S., Kononenko, G., Podolskiy, R., Badyuk, S. Implementation Of Selective Laser Melting Technology In Ukraine. Kyiv, Naukova Dumka. 2022. 116p. DOI: 10.15407/978-966-00-1856-3
18. Кононенко Г. А., Аджамський С. В., Подольський Р. В., Сафронова О. А., Шпак Е. А., Дерягін А. І. Внутрішні залишкові напруження в адитивному виробництві. (Огляд). *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2023. **37**. С. 434-446. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-434-446>

REFERENCES

1. Vayre B., Vignat F., Villeneuve F. (2012). Metallic additive manufacturing: state-of-the-art review and prospects. *Mech. Ind.* **13**. P. 89–96.
2. Gu D. D., Meiners W., Wissenbach K., Poprawe R. (2012). Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms. *Int. Mat. Rev.* **57** (3). P.133–164.
3. Wong K. V., Hernandez A. (2012). A review of additive manufacturing, *ISRN Mech. Eng.* P. 1–10.
4. Brackett D., Ashcroft I., Hague R. (2011). Topology optimization for additive manufacturing. *Proc. SFF Symp. Austin Texas*. P.348–362.
5. Adjamskiy S.V., Kononenko G.A., Podolskiy R.V. (2020). Influence of technological parameters of SLM-process on porosity of metal products. *The paton welding journal*. **10**. p.13-19. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2020.10.03>
6. Adjamskiy S., Kononenko G., Podolskiy R. Mechanical properties of heat-resistant superalloy Inconel 718 obtained by selective laser melting and heat treatment under different load directions. *Scientific Journal of TNTU (Tern.)*. 2020. **99** (3). P. 75–85. DOI: https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2020.03
7. Kononenko G. A., Adzhamskiy S. V., Podolskiy R. V., Safronova O. A., Shpak E. A. (2022). Porivnyalni doslidzhennya mehanichnih vlastivostej zrazkiv stali 316L, виготовлених на машині Alfa-150 на відповідність світовим аналогам [in Ukrainian]. *Fundamentalni ta prikladni problemi chornoyi metalurgiyi*, **36**. 370-378. DOI: <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2022-36-370-378>

8. Adzhamskij S. V., Podolskij R. V., Kononenko G. A. (2021). Doslidzhennya vplivu shorstkosti na vlastivosti zrazkiv zi stali AISI 316L metodom reyestratsiyi makrolokalizacijnih poliv [in Ukrainian]. *Sistemni tehnologiyi*, 4 (135), 3-11. DOI: <https://doi.org/10.34185/1562-9945-4-135-2021-01>
9. Adjamskiy S.V., Kononenko G.A., Podolskiy R.V. Influence of SLM-process parameters on the formation of the boundaries of parts of heat-resistant nickel alloy INCONEL 718. *Space Science and Technology*. 2021. 27, 6. c. 105-114. DOI: <https://doi.org/10.15407/knit2021.06.105>
10. Parida A.K., Maity K. (2018). Comparison the machinability of Inconel 718, Inconel 625 and Monel 400 in hot turning operation. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 21. P. 364–370.
11. Criales L.E., Arısoy Y.M., Lane B. (2017). Laser powder bed fusion of nickel alloy 625: experimental investigations of effects of process parameters on melt pool size and shape with spatter analysis. *Int J Mach Tools Manuf.* 121. P. 22–36.
12. Wang D. (2012). Study on energy input and its influences on single-track, multi-track, and multi-layer in SLM. *Int J Adv Manuf Technol*. 58. P. 1189–1199.
13. Dilip J.J.S., Zhang S., Teng C. (2017). Influence of processing parameters on the evolution of melt pool, porosity, and microstructures in Ti-6Al-4V alloy parts fabricated by selective laser melting. *Progress in Additive Manufacturing*. 2. P.157–167.
17. Adjamskiy,S., Kononenko,G., Podolskiy,R., Badyuk,S. (2022). Implementation Of Selective Laser Melting Technology In Ukraine. Kyiv, Naukova Dumka. 116p. [in Ukrainian] DOI: <https://doi.org/10.15407/978-966-00-1856-3>
18. Kononenko G. A., Adzhamskij S. V., Podolskij R. V., Safronova O. A., Shpak E. A., Deryagin A. I. (2023). Vnutrishni zalishkovi napruzhennya v aditivnomu virobnictvi. (Oglyad) [in Ukrainian]. *Fundamentalni ta prikladni problemi chornoyi metalurgiyi*. 37. S. 434-446. DOI: <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-434-446>

Received 01.04.2024.

Accepted 02.04.2024.

Analysis of technological methods of minimizing residual internal stresses at slm

Additive manufacturing (hereinafter – en. AM) is a modern set of technologies that make it possible to quickly and qualitatively create products with a unique geometry that are impossible or difficult to produce by traditional production methods. Currently, researchers pay attention to two major areas, namely AM quality systems and the search for new regularities in already well-known materials that were produced in a traditional way. This technology has a number of advantages for the manufacture of aerospace products, but, like all production technologies, this technology has a number of disadvantages and problems. Residual internal stresses are one of the features of metal mate-

rials produced by layer-by-layer fusion using SLM technology, but they can significantly affect mechanical properties and geometric parameters. Their presence is especially important for AM materials, which inevitably lead to significant internal stresses. In this regard, it is important to minimize residual stresses in the process of manufacturing parts using SLM technology. To prevent deviations in the geometry of the part, it is necessary to take into account the ratio between the density of the specific energy supplied and its absorption during the process. However, it is difficult to predict the optimal technological parameters and strategies for building the SLM process for polycrystalline materials, since the quality of the product depends on a large number of factors. The search for ways of preliminary assessment and the development of measures to reduce residual stresses in the manufacture of parts using SLM technology is an urgent task of modern materials science. Thus, the issue of reducing the influence of internal stresses requires a fundamental understanding of their influence on the geometric parameters and service characteristics of AM materials..

Keywords: additive manufacturing, residual internal stresses, parameters, SLM technology.

Аджамський Сергій Вікторович – доктор філософії, головний конструктор ТОВ «Аддитивні лазерні технології України», старший науковий співробітник Інституту транспортних систем і технологій Національної академії наук України, Дніпро, Україна.

Кононенко Анна Андріївна - докт. техн. наук, ст. досл., вчений секретар Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, інженер-матеріалознавець LLC «Additive Laser Technology of Ukraine», Дніпро, Україна.

Подольський Ростислав Вячеславович – доктор філософії, науковий співробітник Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, інженер-матеріалознавець ТОВ «Аддитивні лазерні технології України», Дніпро, Україна.

Adjamskiy Sergey – PhD, chief designer 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.

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

Podolskiy Rostislav - PhD, researcher of the Institute of Iron and Steel of Z.I. Nekrasov NAS of Ukraine, materials engineer LLC Additive Laser Technology of Ukraine, Dnipro, Ukraine.