

## АНАЛІЗ ПРИЧИН ВИНИКНЕННЯ ТА СПОСОБІВ ЗМЕНШЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ ПРИ SLM

Адджамський С.В.<sup>1,2</sup>., Кононенко<sup>1,3</sup> Г.А., Подольський<sup>1,3</sup> Р.В.

<sup>1</sup> ТОВ «Аддитивні лазерні технології України», Україна, Дніпро

<sup>2</sup> Інститут транспортних систем і технологій Національної  
академії наук України

<sup>3</sup> Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, Україна, Дніпро

**Анотація.** Аддитивне виробництво (далі –*еп.* 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. Таким чином питання зменшення впливу внутрішніх напружень потребує фундаментального розуміння їх впливу на геометричні параметри та службові характеристики матеріалів АМ.

**Ключові слова:** залишкові напруження, адитивне виробництво, селективне лазерне плавлення, AISI 316L.

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.

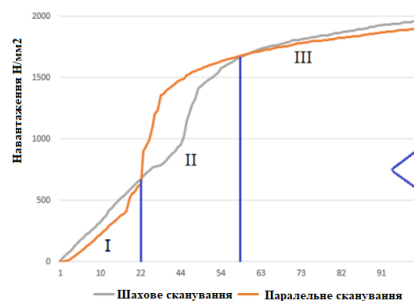


Рисунок 1 – Справжня діаграма розтягування зразків з паралельною і шаховою стратегією сканування: I – ділянка пропорційності, II – ділянка плинності, III – ділянка самозміцнення [9]

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], утворення пір і розшарування між новим і холонучим металом через зміни його геометрії, виникнення мікротріщин, формування вираженої текстури, що призводить до зниження механічних властивостей і їх анізотропності.

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. Одним з підходів є використання термообробки для зняття внутрішніх напружень, щоб зменшити величину та наступний вплив внутрішніх напружень [13]. Застосування термічної обробки також повинно бути збалансованим з огляду на вартість виробництва, бажану мікроструктуру та необхідні механічні властивості сплавів.

Зазвичай термічну обробку застосовують для формування кінцевого комплексу механічних властивостей та структурного стану, але при цьому режими мають враховувати не лише хімічний склад, а й вихідну структуру перед термічною обробкою. Для виробів, виготовлених за SLM -технологією, які мають відмінну вихідну структуру після побудови, порівняно з традиційним виробництвом, неможна застосовувати ті самі режими без

врахування вказаних особливостей будови металу. Вплив параметрів термічної обробки для деталі зі сталі марки AISI 316L, виготовленої за SLM - технологією, на залишкові внутрішні напруження є недостатньо дослідженим. Таким чином, є необхідність детального дослідження впливу термічної обробки на механічні властивості та зменшення внутрішніх напружень з врахуванням способу виготовлення деталей з сталі AISI 316L та вихідного структурного стану.

#### Висновок

За результатами аналітичних досліджень встановлено, що під час процесу виготовлення деталей за допомогою SLM характерним є те, що розтягуючі внутрішні напруження розвиваються на поверхнях, які врівноважені стискаючими внутрішніми напруженнями в об'ємі. Але слід зазначити, що розроблені та впроваджені параметри та стратегії сканування дозволяють врівноважити внутрішні напруження уникаючи викривлень та руйнувань. Проте найбільш підходящим методом для досягнення нейтрального напруженого стану є термічна обробка для зняття внутрішніх напружень.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Vayre B., Vignat F., Villeneuve F. (2012). Metallic additive manufacturing: state-of-the-art review and prospects. *Mech. Ind.*, (13), 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), 133–164.
3. Wong K. V., Hernandez A. (2012). A review of additive manufacturing, *ISRN Mech. Eng.*, 1–10.
4. Brackett D., Ashcroft I., Hague R. (2011). Topology optimization for additive manufacturing. *Proc. SFF Symp. Austin Texas*, 348–362.
5. Аджамський С. В., Кононенко Г. А., Подольський Р. В. (2020) Вплив технологічних параметрів SLM-процесу на пористість металовиробів. *Автоматичне зварювання*, (10), 14-20.
6. Adjamskiy S., Kononenko G., Podolskiy R. (2020) 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.)*, vol 99 (3), 75–85.
7. Кононенко Г. А., Аджамський С. В., Подольський Р. В., Сафронова О. А., Шпак Е. А. (2022). Порівняльні дослідження механічних властивостей зразків сталі 316L, виготовлених на машині ALFA-150 на відповідність світовим аналогам. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*, (36). 370-378. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2022-36-370-378>
8. Аджамський С. В., Подольський Р. В., Кононенко Г. А. (2021). Дослідження впливу шорсткості на властивості зразків зі сталі AISI 316L методом реєстрації

макролокалізаційних полів. *Системні технології*, 4, (135), 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.

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. Vol. 21. P. 364–370.

11. Criaes 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. Vol.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. Vol.2. P.157–167.

## **ANALYSIS OF THE CAUSES AND METHODS OF REDUCING RESIDUAL STRESSES IN SLM**

Adjamsky S., Kononenko G., Podolskyi R.

**Abstract.** *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 materials 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. 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:** *residual stresses, additive manufacturing, selective laser melting, AISI 316L.*

### **REFERENCES:**

1. Vayre B., Vignat F., Villeneuve F. (2012). Metallic additive manufacturing: state-of-the-art review and prospects. *Mech. Ind.*, (13). 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), 133–164.

3. Wong K. V., Hernandez A. (2012). A review of additive manufacturing, *ISRN Mech. Eng.*, 1–10.
4. Brackett D., Ashcroft I., Hague R. (2011). Topology optimization for additive manufacturing. *Proc. SFF Symp. Austin Texas*, 348–362.
5. Adzhamskij S. V., Kononenko G. A., Podolskij R. V. (2020) Vpliv tehnologichnih parametriv SLM-procesu na poristist metalovirobiv. *Avtomatichne zvaryuvannya*, (10), 14-20.
6. Adjamskiy S., Kononenko G., Podolskiy R. (2020) 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.)*, vol 99 (3), 75–85.
7. Kononenko G. A., Adzhamskij S. V., Podolskij R. V., Safronova O. A., Shpak E. A. (2022). Porivnyalni doslidzhennya mehanichnih vlastivostej zrazkiv stali 316L, vigotovlenih na mashini Alfa-150 na vidpovidnist svitovim analogam. *Fundamentalni ta prikladni problemi chornoyi metalurgiyi*, (36). 370-378. <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. *Sistemni tehnologiyi*, 4, (135), 3-11. <https://doi.org/10.34185/1562-9945-4-135-2021-01>
9. Adzhamskij S. V., Kononenko G. A., Podolskij R. V. Vpliv parametriv SLM-procesu na formuvannya oblasti kordoniv detalej z zharomicnogo nikelevogo splavu Inconel 718. *Kosmichna nauka i tehnologiya*. 2021. 27, № 6 (133). S. 105–114.
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. Vol. 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. Vol.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. Vol.2. P.157–167.