

ЗАСТОСУВАННЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО МЕТОДУ КОНТРОЛЮ ГОТОВИХ МЕТАЛЕВИХ ВИРОБІВ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА

С. Г. ГЛАБЕЦЬ^{1,2}, І. Я. КУХТА¹, О. А. КРЮКОВА³

¹ *ТОВ «Науково-виробнича фірма «Діагностичні прилади»,
вул. Патріотів, 103, Київ, 03061*

² *ТОВ «Науково-виробнича фірма «Ультракон», проспект Відрадний, 95Є, Київ, 03061*

³ *Київський національний університет технологій та дизайну,
вул. Мала Шияновська, 2, Київ, 01011*

Зроблено огляд процесів адитивного виробництва та практики застосування ультразвукового контролю готових металевих виробів адитивного виробництва. Зроблені рекомендації щодо використання методів неруйнівного контролю для виявлення дефектів та механічних властивостей готових виробів.

Ключові слова: адитивне виробництво (АМ), 3D-друк, неруйнівний контроль, ультразвуковий контроль, лазерний ультразвуковий контроль, оцінка дефектів.

Адитивне виробництво (АМ), також відоме як 3D-друк, формування твердого тіла або швидке прототипування, є революційною технікою виробництва, яка очікується, що змінить майбутнє виробничих галузей [1]. У 2018 році галузь АМ перевищила 7,3 мільярда доларів США, що на 21% є вищим у порівнянні з 2017 роком, і очікується, що до 2023 року вона підніметься до 26,2 мільярда доларів США [2, 3]. На відміну від традиційного виробництва, при якому продукт формується шляхом введення тиску або вирізання з твердого блоку, в адитивному виробництві матеріал точно наноситься на бажані місця за допомогою комп'ютерно-проектувальної системи (CAD) та 3D-сканерів [4-6]. Матеріал додається шар за шаром для виготовлення компонентів близьких до форми зі складною геометрією. У процесах адитивного виробництва використовуються різні будівельні матеріали, включаючи пластик, метали і кераміку. Однією з основних перешкод у широкому поширенні АМ в промисловості є складність виявлення та оцінки дефектів в АМ-продуктах [7, 8]. Для ефективного виявлення різних дефектів на різних рівнях АМ-продуктів використовуються удосконалені методи неруйнівного контролю (НК). Серед цих дефектів переважна більшість належить пористості. Пори можуть бути або газовими порами, або несплавленими [9]. Багаточисельні

процеси АМ та різні параметри, пов'язані з кожним процесом, ускладнюють НК продуктів адитивного виробництва [10, 11]. Складність геометрії багатьох компонентів АМ вимагає відповідного вибору технології НК для найкращого виявлення дефектів. У деяких випадках використовується комбінація методів НК для більш ефективного виявлення дефектів у важливих компонентах [12-14].

У широкому розумінні технології виробництва можна класифікувати як формувальні, видаляючі і додавальні (адитивні). У формувальних процесах, наприклад, прокатуванні та куванні, бажаний продукт виготовляється шляхом контрольованого навантаження на сировинний матеріал [15]. У видаляючих процесах виробництва, таких як свердління, точіння та фрезерування, кінцевий продукт отримується шляхом контрольованого видалення матеріалу [16].

У таблиці наведені різні матеріали та технології, які використовуються для адитивного виробництва.

Таблиця – Процеси адитивного виробництва [15, 18]

Технологія	Процес	Матеріал
Видування матеріалу	Моделювання розплавленим нанесенням (FDM) Формування з розплавленої нитки (FFF) Робокастинг	Полімери та пластики
Напрявлене нанесення енергії (DED)	Лазерне інженерне формування металевих виробів (LENS®) Надзвукове нанесення частинок (SPD) або холодне розпилення (CS) Лазерне адитивне виробництво (LAM) Лазерне порошкове нанесення (LPD) Дріт + дугове адитивне виготовлення (WAAM) Напрявне металеве нанесення (DMD) Лазерне металеве нанесення (LMD)	Металічний порошок, металевий дріт та керамічний порошок
Сплавлення порошкового ложа (PBF)	Багатострумене сплавлення (MJF) Пряме лазерне спікання металу (DMLS) Пряме лазерне плавлення металу (DMLM) Електронне плавлення пучком (EBM) Вибіркове теплове спікання (SHS) Вибіркове лазерне плавлення (SLM) Вибіркове лазерне синтерування (SLS) HP Jet Fusion Високошвидкісне спікання Лазерне лиття (LaserCUSING) Пряме металеве виробництво (DMP) Лазерне сплавлення металу (LMF) Лазерне сплавлення порошкового ложа (LPBF)	Метали, пластикові, керамічні порошки та пісок

Випускання струменя матеріалу	Поліструменевий Випускання струменя матеріалу, з затвердінням під дією УФ Друк з гладкими кривизнами (SCP) Багатоструменеве моделювання (MJM) Випускання за запитом (DOD) Струменева обробка наночастинками (NPJ)	Фотополімери, воски та композити
Струменеве зв'язування	ExOne (компанія, що розробляє 3D-друкарні) VoxelJet (компанія, що розробляє 3D-друкарні) Друк на порошковому шарі Нанесення крапель на порошок Адитивне виробництво зв'язуючим струменем (BJAM)	Пластмаси, метали, скло, пісок, кераміка
Ламінування листів	Виготовлення ламінованих об'єктів (LOM) Селективне нанесення ламінування (SDL) Ультразвукове адитивне виробництво (UAM) Виробництво композитних об'єктів вибірково ламінуванням (SLCOM) Ламінування пластикових листів (PSL) Ультразвукова консолідація (UC) Комп'ютерне виробництво ламінованих інженерних матеріалів (CAM-LEM)	Пластмаси, паперові і металеві листи
Фотополімеризація у ванні	Апарат для стереолітографії (SLA) Цифрова обробка світла (DLP) Безперервна цифрова обробка світла (cDLP) Сканувальне, обертальне та селективне фотоутворення (3SP) Безперервне виробництво на рідкому інтерфейсі (CLIP)	Фотополімерні смоли

При адитивному виробництві існують два основні виклики: контроль якості процесу та опис характеристик виготовлених виробів [19]. Виробництво АМ може супроводжуватися різними дефектами, які поділяються на поверхневі та внутрішні. Хоча ультразвуковий контроль (УЗК) використовується для виявлення як поверхневих, так і внутрішніх дефектів, здатність методу УЗК виявляти внутрішні дефекти викликає великий інтерес серед дослідників та інженерів на практиці.

Найважливішим дефектом, який потрібно виявити в металевих виробках адитивного виробництва, є пористість [20]. Пористість у виробках АМ є місцем концентрації напружень, що призводить до виникнення тріщин та зменшення несучої спроможності матеріалів [8, 21]. Пористість у виробках АМ поділяється на газову та пористість, пов'язану з відсутністю сплавлення (LOF) [9].

На рисунку показані приклади газової пористості та пористості, пов'язаної з відсутністю сплавлення, що спостерігались в зразках

AlSi10Mg, виготовлених методом селективного лазерного плавлення (SLM) [22]. Газові пори мають кульоподібну форму і утримуються в частках порошку або інертних газах, що утворюються під час процесу плавлення.

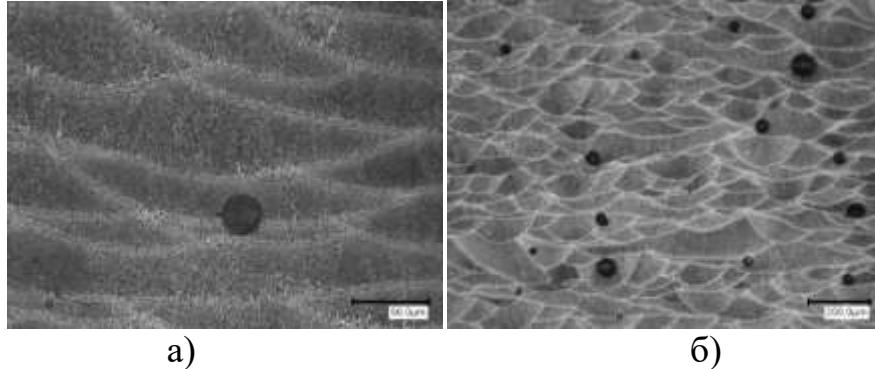


Рисунок – а) газова пористість, б) пористість, пов'язана з відсутністю сплавлення в зразках, виготовлених методом селективного лазерного плавлення (SLM) [22]

Пористість, пов'язана з відсутністю сплавлення (LOF), представляє собою невеликі порожнини, утворені через неналежні параметри обробки, що призводять до неправильного затвердіння матеріалу, перш ніж він повністю злився з іншими частинами [9]. Thijs та ін. [23] вивчали два зразки Ti-6Al-4V, виготовлені методом селективного лазерного плавлення (SLM) із кроками між шарами 50 мкм і 100 мкм і виявили, що збільшення міжшарового кроку сприяє утворенню пористості, пов'язаної з відсутністю зварювання. Taheri та ін. [8] розглядали дефекти, які можуть виникнути в процесі плавлення порошкового ложа (PBF) та методи НК, які можна використовувати для їхнього виявлення та оцінки.

Серед методів НК ультразвуковий контроль має великий потенціал для контролю виробів адитивного виробництва. Встановлено, що серед різних методів НК радіографія та ультразвуковий контроль є найбільш перспективними. Показано, що такі дефекти як пористість, тріщини та мікроструктурні аномалії, ефективно виявляються за допомогою УЗК. Ультразвуковий контроль також доцільно використовувати для визначення характеристик механічних властивостей готових виробів АМ.

Література

1. M. Jiménez, L. Romero, I. A. Domínguez, M. d. M. Espinosa, and M. Domínguez, "Additive Manufacturing Technologies: An Overview about 3D Printing Methods and Future Prospects," *Complexity*, vol. 2019, 2019.
2. M. TJ. "Wohlers Report 2018: 3D Printer Industry Tops Billion." <https://www.forbes.com/sites/tjmccue/2018/06/04/wohlers-report-2018-3d-printer-industry-rises-21percent-to-over-7-billion/#3acd6e412d1>
3. A. A. Hassen and M. M. Kirka, "Additive Manufacturing: The rise of a technology and the need for quality control and inspection techniques," *Materials Evaluation*, vol. 76, no. 4, pp. 438-453, 2018.
4. K. V. Wong and A. Hernandez, "A review of additive manufacturing," *ISRN Mechanical Engineering*, vol. 2012, 2012.
5. E. P. M. Association. *Introduction to Additive Manufacturing Technology*, 2018.
6. *Principles—Terminology, Additive Manufacturing—General*, ISO/ASTM52900, Geneva, Switzerland, 2015.
7. "Measurement Science Roadmap for Metal-Based Additive Manufacturing," National Institute of Standards and Technology (NIST), 2013.
8. H. Taheri, M. R. B. M. Shoaib, L. Koester, T. Bigelow, P. C. Collins, and L. J. Bond, "Powder-based additive manufacturing—a review of types of defects, generation mechanisms, detection, property evaluation and metrology," *International Journal of Additive and Subtractive Materials Manufacturing*, vol. 1, No. 2, p. 172, 2017.
9. F. H. Kim and S. P. Moylan, "Literature Review of Metal Additive Manufacturing Defects," 2018.
10. J. M. Waller, B. H. Parker, K. L. Hodges, E. R. Burke, and J. L. Walker, "Nondestructive evaluation of additive manufacturing state-of-the-discipline report," 2014.

11. L. W. Koester, H. Taheri, T. A. Bigelow, P. C. Collins, and L. J. Bond, "Nondestructive testing for metal parts fabricated using powder-based additive manufacturing," *Materials Evaluation*, vol. 76, No. 4, pp. 514-524, 2018.
12. S. Everton, P. Dickens, C. Tuck, and B. Dutton, "Using Laser Ultrasound to Detect Subsurface Defects in Metal Laser Powder Bed Fusion Components," *JOM*, vol. 70, No. 3, pp. 378-383, 2018.
13. G. Davis, R. Nagarajah, S. Palanisamy, R. A. R. Rashid, P. Rajagopal, and K. Balasubramaniam, "Laser ultrasonic inspection of additive manufactured components," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 1-9, 2019.
14. D. B. Witkin, S. Sitzman, Y. Kim, E. Adelman, P. Adams, and N. Ives, "Experimental nondestructive characterization of an aluminum alloy prepared by powder-bed additive manufacturing," *Materials Evaluation*, vol. 76, No. 4, pp. 489-502, 2018.
15. S. K. Everton, M. Hirsch, P. Stravroulakis, R. K. Leach, and A. T. Clare, "Review of in-situ process monitoring and in-situ metrology for metal additive manufacturing," *Materials & Design*, vol. 95, pp. 431-445, 2016.
16. J. Chenot and R. Wagoner, *Fundamentals of metal forming*. John Wiley & Sons, 1997.
17. H. A. Youssef and H. El-Hofy, *Machining technology: machine tools and operations*. CRC Press, 2008.
18. J. Gonzalez-Gutierrez, S. Cano, S. Schuschnigg, C. Kukla, J. Sapkota, and C. Holzer, "Additive manufacturing of metallic and ceramic components by the material extrusion of highly-filled polymers: a review and future perspectives," *Materials*, vol. 11, No. 5, p. 840, 2018.
19. S. Kerwien, S. Collings, F. Liou, and M. Bytnar, "Measurement science roadmap for metal-based additive manufacturing," *National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, Report*. <https://www.nist>.

gov/sites/default/files/documents/el/isd/NISTAdd_Mfg_Report_FINAL-2.pdf, 2013.

20. W. J. Sames, F. List, S. Pannala, R. R. Dehoff, and S. S. Babu, "The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing," *International Materials Reviews*, vol. 61, No. 5, pp. 315-360, 2016.
21. S. K. Everton, P. Dickens, C. Tuck, and B. Dutton, "Identification of Sub-Surface Defects in Parts Produced by Additive Manufacturing, Using Laser Generated Ultrasound," *Materials Science & Technology*, 2016.
22. S. Patel and M. Vlasea, "Melting Modes in Laser Powder Bed Fusion," *Materialia*, p. 100591, 2020.
23. L. Thijs, F. Verhaeghe, T. Craeghs, J. Van Humbeeck, and J.-P. Kruth, "A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti-6Al-4V," *Acta materialia*, vol. 58, No. 9, pp. 3303-3312, 2010.