

УДК 620.
179.16

¹КРЮКОВА О. А., ²ПАВЛІЙ О. В., ³ГЛАБЕЦЬ С. М., ³КУХТА І. Я.

¹Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

²НВФ «Діагностичні прилади», Київ, Україна

³ТОВ «Науково-виробнича фірма «Ультракон», Київ, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ТА РАДІОГРАФІЧНОГО МЕТОДІВ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ДЛЯ ОЦІНКИ ЯКОСТІ МЕТАЛЕВИХ ВИРОБІВ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА

Мета. З'ясувати можливості використання акустичного та радіографічного методів неруйнівного контролю для виявлення дефектів у виробках електронно-променевої наплавки з титану, сталі, вольфраму, молібдену та бронзи, а також визначити оптимальні технології і параметри контролю.

Методика. Порівняльний контроль акустичного дослідження проводився контактними перетворювачами, поздовжніми (компресійними) ультразвуковими хвилями наступних частот/діаметрів робочої поверхні: 2 МГц/24мм; 2,5 МГц/10мм і 5 МГц/14мм. Радіографічне дослідження проводилось за технологією класичної плівкової радіографії та DR (цифрова пряма радіографія).

Результати. Показано, що ультразвуковий та радіаційний методи контролю дозволяють провести оцінку якості виробів адитивних технологій відповідно до нормативних документів.

Наукова новизна. За результатами досліджень зроблені рекомендації щодо використання методів неруйнівного контролю для виявлення дефектів та механічних властивостей готових виробів.

Практична значимість. Використання сучасних ультразвукових дефектоскопів з фазованими антенними решітками (ФАР), з одночасним використання режимів TFM (Total Focusing Method) і FMC (Full Matrix Capture) для виявлення дефектів довільної орієнтації, розташованих на різній глибині є перспективним для дослідження якості виробів адитивних технологій.

Ключові слова: адитивні технології; неруйнівний контроль; акустичний метод; радіографічний метод.

Вступ. У теперішній час адитивні технології знаходять застосування практично в усіх сферах людської діяльності. Серед них є: виробництво, медицина, наука, мистецтво та ін. Найбільш широкого застосування 3D технології отримали у машинобудуванні. Новітні технології досить активно застосовуються у разовому та дрібносерійному виробництві, а також впроваджуються для виготовлення деталей складної форми, наприклад лопаток турбін, крильчаток та ін. Виробники такої продукції відзначають високий рівень властивостей металу виробів у зв'язку з формуванням дрібнозернистої структури, яка може бути оцінена розміром зерна, що відповідає 6–10 номерів [1].

При використанні 3D технологій для виготовлення деталей з тугоплавких металів і сплавів ($T_{пл} > 2000^{\circ}\text{C}$) виникають проблеми високого градієнту температур, що призводить до утворення внутрішніх напружень у металі, і як наслідок до дефектів. Щодо тугоплавких металів, то відома невелика кількість робіт, у яких наведено інформацію про застосування 3D технологій для отримання виробів з молібдену, танталу, вольфраму [2, 3].

Розвиток сучасних адитивних технологій виробництва потребує нових або адаптації вже існуючих методів контролю якості готової продукції. Металеві та неметалеві вироби, які виготовлені методом 3D-друку, лазерної або електронно-променевої наплавки вимагають нових методів досліджень якості готової продукції та розробки критеріїв, за якими можливо оцінити дефекти у виробках складної форми.

Для виявлення дефектів у виробках останнього десятиліття, оцінки фізичних, механічних властивостей та прогнозування строку експлуатації виробу вже використовуються надійні та сучасні та методи неруйнівного контролю (НК) [4–6].

Постановка завдання. Переважну більшість вже існуючих методів контролю цілком можливо застосовувати і для контролю продукції адитивного виробництва (АМ). Найважливішим дефектом, який потрібно виявити в металевих виробках адитивного виробництва є пористість. Пористість у виробках АМ виступає як місце концентрації напружень, що призводить до виникнення тріщин та зменшення несучої спроможності матеріалів.

Метою роботи було з'ясувати можливості та межі застосування класичних методів НК (радіографічний, акустичний) для контролю таких дефектів, як пористість та несучільність після електронно-променевої наплавки з титану, сталі, вольфраму, молібдену та бронзи, а також визначити оптимальні технології і параметри контролю.

Результати досліджень. Для акустичного методу НК досліджувані зразки були виготовлені з вольфраму та молібдену, одержані технологією комбінованого плазмово-індукційного нагріву для вирощування монокристалічних пластин, заготовок для широкоформатної монокристалічної прокатки, монокристалічних зливків і тиглів [7, 8].

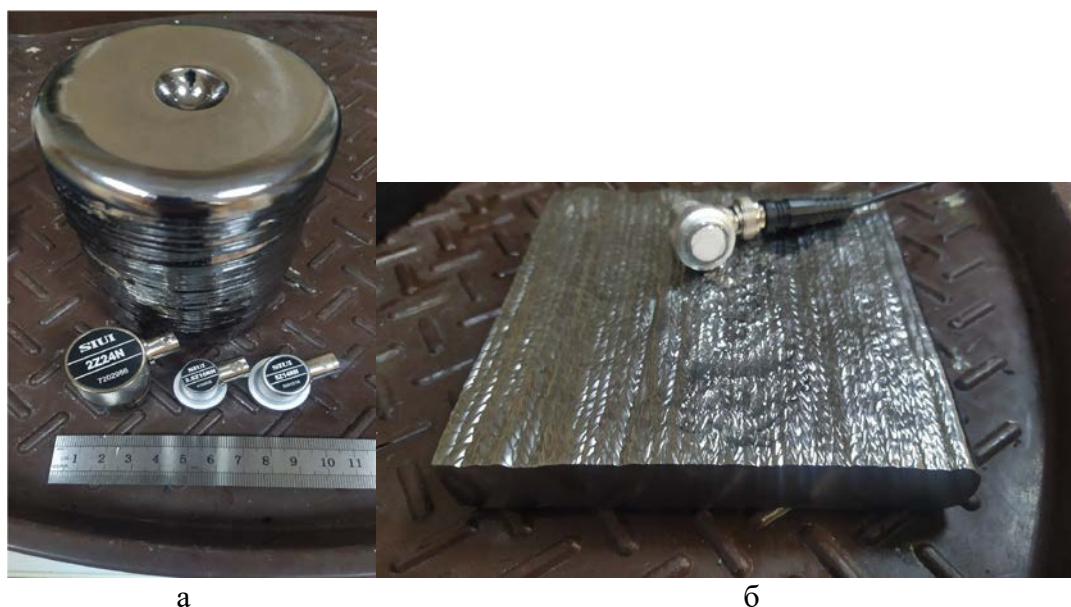


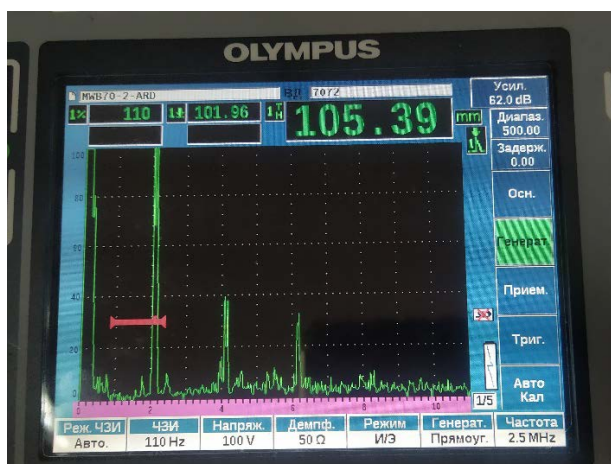
Рис. 1. Зразок з вольфраму (а) та молібдену (б)

Порівняльний контроль проводився контактними перетворювачами, поздовжніми (компресійними) ультразвуковими хвилями наступних частот/діаметрів робочої поверхні: 2 МГц/24мм; 2,5 МГц/10мм і 5 МГц/14мм.

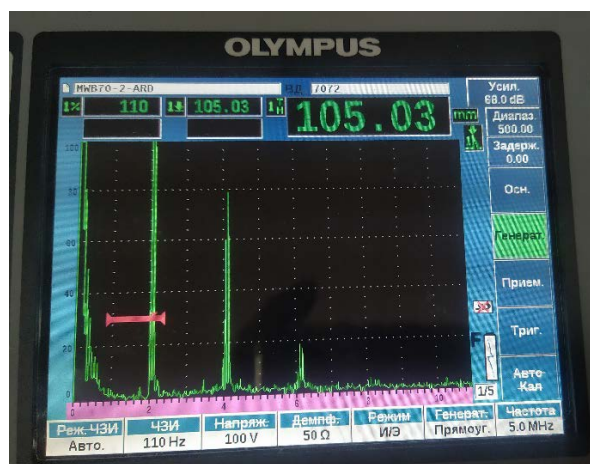
За результатами контролю луна-імпульсним методом, прямими контактними перетворювачами різної частоти зафіксована наявність донних сигналів. Наявність повторень донних сигналів на розгортці свідчить про порівняно незначне затухання ультразвукових коливань у зразку, та як результат – гарну контролепридатність, що обмежується тільки станом поверхні та формою зразка. Перетворювач з частотою 5 МГц забезпечив краще співвідношення сигнал-шум без втрати амплітуди корисного сигналу (рис. 2).

Під час сканування поверхні циліндричного зразка виявлені індикації на різній глибині, що можуть свідчити про наявність дефектів (рис. 3).

За результатами акустичних досліджень можна зробити висновок, що металеві зразки адитивного виробництва є контролепридатними для ультразвукового методу контролю. Кращі результати продемонстрував перетворювач з робочою частотою 5МГц, що може бути пов'язано з відносно невеликим розміром дефектів.

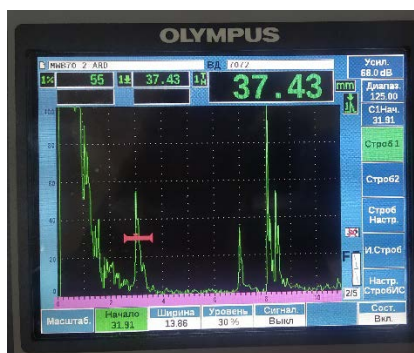


1)

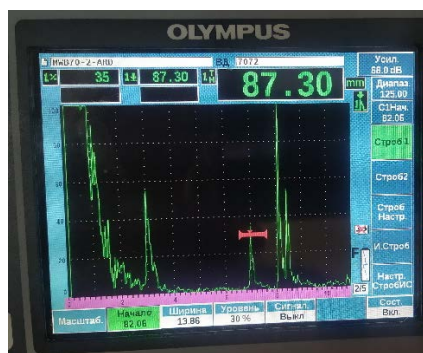


2)

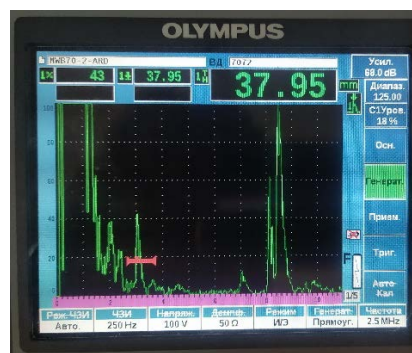
Рис. 2. Донні сигнали: 1) перетворювач з частотою 2,5 МГц;
2) перетворювач з частотою 5,0 МГц



1)



2)



3)

Рис. 3. Акустичні дослідження на різних глибинах: 1) частота 5 МГц, індикація на глибині 37 мм; 2) частота 5 МГц, індикація на глибині 87 мм;
3) частота 2,5 МГц, індикація на глибині 37 мм

Перспективним є використання сучасних ультразвукових дефектоскопів з фазованими антенними решітками (ФАР), з одночасним використання режимів TFM (Total Focusing Method) і FMC (Full Matrix Capture) для виявлення дефектів довільної орієнтації, розташованих на різній глибині.

Для радіографічного методу НК зразки були виготовлені:

- з титану, технологією пошарового наплавлення порошковим дротом з використанням технології 3D друку профільним електронним променем (xBeam 3D Metal Printing) (ТОВ «Червона Хвиля», Київ) [9, 10];

- зі сталі й бронзи, виготовлені за технологією Gas Metal Arc Welding (GMAW) наплавлення плавким електродом у середовищі захисних газів (НТУУ «КПІ» ім. Ігоря Сікорського).

Радіографічне дослідження проводилось за технологією класичної плівкової радіографії та DR (цифрова пряма радіографія). Дослідження металевих виробів проведені у лабораторії неруйнівного контролю ТОВ «Науково-виробнича фірма «Діагностичні прилади». Джерело випромінювання: генератор рентгенівського випромінювання Baltospot GFD165 (максимальна прискорююча напруга на рентгенівській трубці 160 кВ, струм 5 мА). Фокусна відстань 600 мм, напруга – 100 кВ, струм 5 мА. Дослідження виконані на рентгенівській плівці

Fujifilm IX 80 (C4 згідно ISO 11699-1), час експозиції для виробів товщиною 10 мм склав 1 хвилину та 30 секунд, для виробів з товщиною 5 мм – 25 секунд. Час експозиції залежить від номограм експозиції для кожного типу плівки, а також від особливостей генератора рентгенівського випромінювання.

На рис. 4–6 наведені результати радіографічних досліджень для зразків титану, сталі та бронзи.

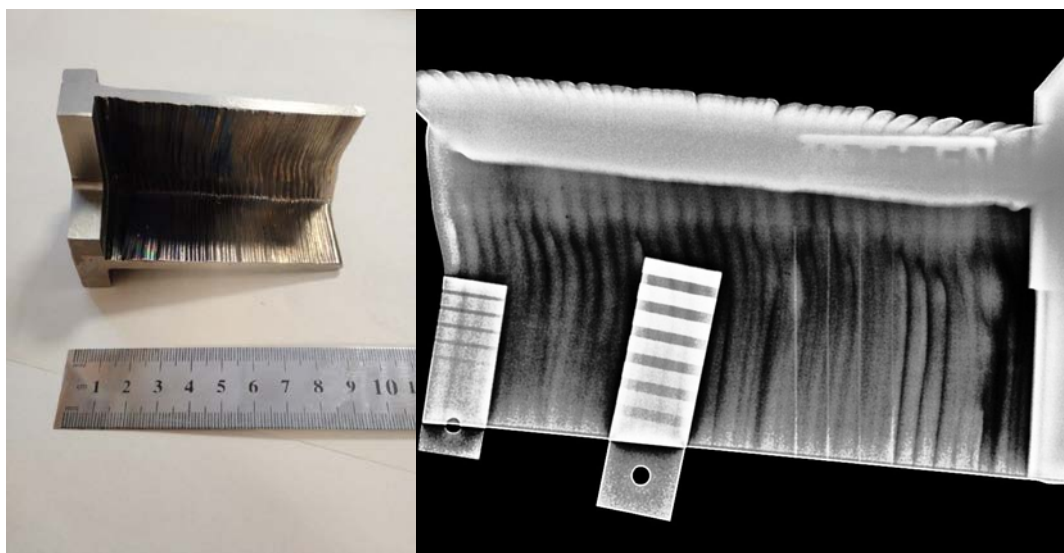


Рис. 4. Радіографічне дослідження зразку з титану

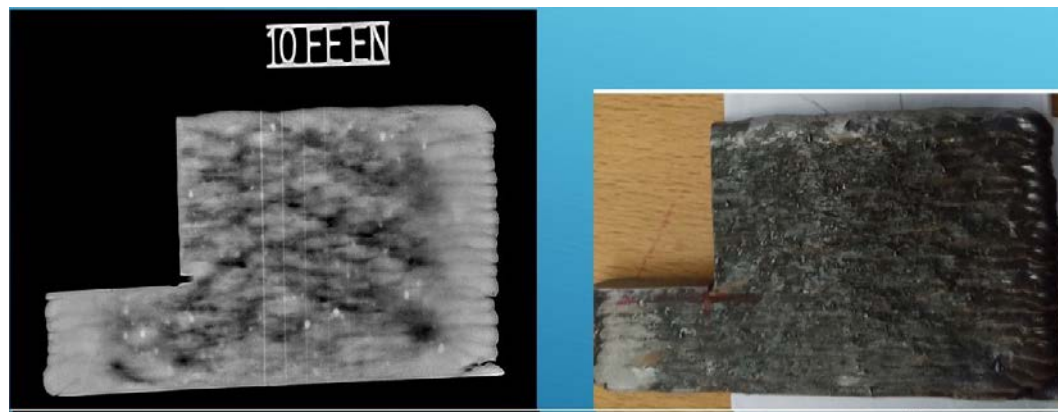


Рис. 5. Радіографічне дослідження зразку зі сталі

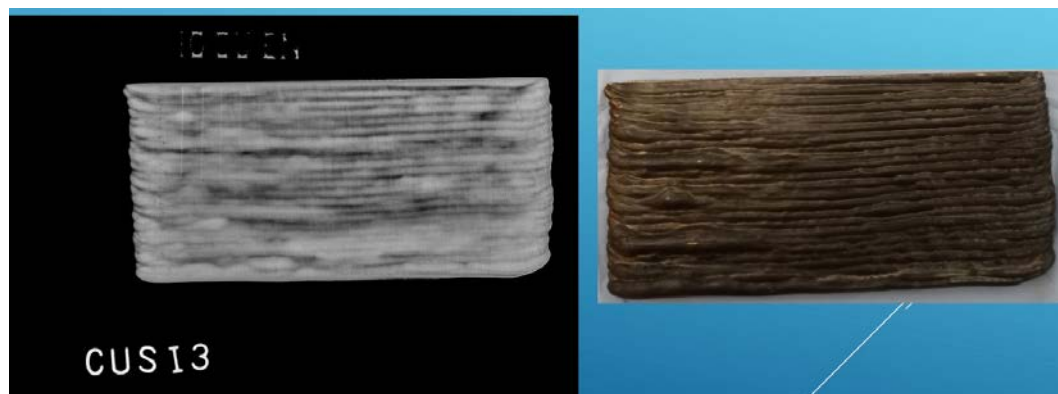


Рис. 6. Радіографічне дослідження зразку з бронзи

Детектор – рентгенівська плівка, система комп'ютерної радіографії GOSCAN 1510HR. Також використовувались індикатори якості зображень відповідно до ДСТУ ISO 19232-1 відповідного матеріалу.

Для зразка Т-подібної форми (рис. 4) кут опромінення склав 60° , що призвело до зміни радіаційної товщини на різних ділянках зразка. На знімку чітко видно неоднорідність оптичної густини. Для достовірного контролю виробів складної форми потрібно робити декілька експозицій з різним часом (розрахувати час експозиції для кожної радіаційної товщини). Отриманий результат демонструє, що чутливість цього методу відповідає 4% відповідно до ДСТУ EN ISO 19232-1:2016.

Отримані рентгенівські знімки демонструють, що вироби можна роздивитись та провести оцінку відповідно до нормативних документів. Індикатори якості зображення фіксуються та по номеру еталонного дроту або канавки можна оцінити наявність недопустимих дефектів об'ємного типу.

Висновки. Результати проведених досліджень показали можливість застосування та високу ефективність ультразвукового та радіаційного методів неруйнівного контролю для виробів адитивних технологій виготовлених з вольфраму, молібдену, титану, сталі та бронзи. Індикації при акустичному методі дослідження свідчать про наявність таких дефектів, як пористість. За глибиною індикації можна встановити розташування дефекту. Рентгенівські знімки дозволяють оцінити якість готового виробу з точки зору наявності несущільностей, які пов'язані з поганою наплавкою металу. Для виявлення дефектів у виробах складної форми рекомендовано розраховувати час експозиції для кожної радіаційної товщини та використання дефектоскопів з фазованими антенними решітками для виявлення дефектів довільної орієнтації на різній глибині. Також ультразвуковий контроль доцільно використовувати для визначення механічних характеристик готових виробів. При подальших дослідженнях якості металевих виробів рекомендовано на етапі розробки конструкторської документації на вироби та технологію ввести коректні критерії прийомки у відповідності до міцнісних характеристик адитивних матеріалів.

References

1. ISO 643:2019 Steels – Micrographic determination of the apparent grain size. URL: <https://www.iso.org/standart/72193.html>.
2. Marinelli, G., Martina, F., Lewtas, H. et al. (2019). Microstructure and thermal properties of unalloyed tungsten deposited by Wire+Arc additive manufacture. *Journal of Nuclear Materials*, 522, 45–53. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2019.04.049>.
3. Marinelli, G., Martina, F., Ganguly, S., Williams, S. (2020). Grain refinement in an unalloyed tantalum structure by combining Wire+Arc additive manufacturing and vertical cold rolling. *Additive Manufacturing*, 32, 101009. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.101009>.
4. Everton, S., Dickens, P., Tuck, C., Dutton, B. (2018). Using Laser Ultrasound to Detect Subsurface Defects in Metal Laser Powder Bed Fusion Components. *JOM*, Vol. 70, No. 3, P. 378–383.
5. Davis, G., Nagarajah, R., Palanisamy, S., Rashid, R. A. R., Rajagopal, P., Balasubramaniam, K. (2019).

Література

1. ISO 643:2019 Steels – Micrographic determination of the apparent grain size. URL: <https://www.iso.org/standart/72193.html>.
2. Marinelli G., Martina F., Lewtas H. et al. Microstructure and thermal properties of unalloyed tungsten deposited by Wire+Arc additive manufacture. *Journal of Nuclear Materials*. 2019. Vol. 522. P. 45–53. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2019.04.049>.
3. Marinelli G., Martina F., Ganguly S., Williams S. Grain refinement in an unalloyed tantalum structure by combining Wire+Arc additive manufacturing and vertical cold rolling. *Additive Manufacturing*. 2020. 32. 101009. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.101009>.
4. Everton S., Dickens P., Tuck C., Dutton B. Using Laser Ultrasound to Detect Subsurface Defects in Metal Laser Powder Bed Fusion Components. *JOM*. 2018. Vol. 70, No. 3. P. 378–383.
5. Davis G., Nagarajah R., Palanisamy S., Rashid R. A. R., Rajagopal P., Balasubramaniam K. Laser

Laser ultrasonic inspection of additive manufactured components. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, P. 1–9.

6. Witkin, D. B., Sitzman, S., Kim, Y., Adelman, E., Adams, P., Ives, N. (2018). Experimental nondestructive characterization of an aluminum alloy prepared by powder-bed additive manufacturing. *Materials Evaluation*, Vol. 76, No. 4, P. 489–502.

7. Shapovalov, V. O., Nikitenko, Yu. O., Yakusha, V. V. et al. (2020). Manufacture of super large tungsten single crystals in the form of rotation bodies. *PAST*, 1 (125), 60–63. <https://doi.org/10.46813/2020-125-060>.

8. Shapovalov, V. O., Nikitenko, Yu. O., Yakusha, V. V. et al. (2023). 3D technology of growing tungsten single-crystal. *The Paton Welding Journal*, 2023, No. 11, P. 30–34. <https://doi.org/10.37434/tpwj2023.11.03>.

9. Gupta, P., Duarte, C. A., Dhankhar, A. (2017). Accuracy and Robustness of Stress Intensity Factor Extraction Methods for the Generalized/eXtended Finite Element Method. *Engineering Fracture Mechanics*. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.03.035>.

10 Lin, Z., Song, K., Yu, X. (2021). A review on wire and arc additive manufacturing of titanium alloy. *Journal of Manufacturing Processes*, 70, 24–45. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.08.018>.

ultrasonic inspection of additive manufactured components. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019. P. 1–9.

6. Witkin D. B., Sitzman S., Kim Y., Adelman E., Adams P., Ives N. Experimental nondestructive characterization of an aluminum alloy prepared by powder-bed additive manufacturing. *Materials Evaluation*. 2018. Vol. 76, No. 4. P. 489–502.

7. Shapovalov V. O., Nikitenko Yu. O., Yakusha V. V. et al. Manufacture of super large tungsten single crystals in the form of rotation bodies. *PAST*. 2020. Vol. 1 (125). P. 60–63. <https://doi.org/10.46813/2020-125-060>.

8. Shapovalov V. O., Nikitenko Yu. O., Yakusha V. V. et al. 3D technology of growing tungsten single-crystal. *The Paton Welding Journal*. 2023. No. 11. P. 30–34. <https://doi.org/10.37434/tpwj2023.11.03>.

9. Gupta P., Duarte C. A., Dhankhar A. Accuracy and Robustness of Stress Intensity Factor Extraction Methods for the Generalized/eXtended Finite Element Method. *Engineering Fracture Mechanics*. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.03.035>.

10. Lin Z., Song K., Yu X. A review on wire and arc additive manufacturing of titanium alloy. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021. Vol. 70. P. 24–45. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.08.018>.

KRYUKOVA OLENA

PhD, Associate Professor,
Department of Chemical Technologies and
Resource Saving, Kyiv National University
of Technologies and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-8638-3580>
Scopus Author ID: 24335433200
E-mail: kryukova.og@knuutd.com.ua

HLABETS SERHIY

Master's student
Department of Chemical Technologies and
Resource Saving, Kyiv National University of
Technologies and Design, Ukraine
E-mail: s.glabets@gmail.com

PAVLIY OLEKSANDR

Master's student
Department of Chemical Technologies and
Resource Saving, Kyiv National University of
Technologies and Design, Ukraine
E-mail: alpavliy@gmail.com

KUKHTA IHOR

Master's student
Department of Chemical Technologies and
Resource Saving, Kyiv National University of
Technologies and Design, Ukraine
E-mail: kukhtaiy@gmail.com

¹KRYUKOVA O. A., ²PAVLIY O. V., ³HLABETS S. M., ³KUKHTA I. YA.

¹ Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

² NVF "Diagnosticschni prylady", Kyiv, Ukraine

³ LLC "Scientific and Production Firm "Ultrakon", Kyiv, Ukraine

**APPLICATION OF ULTRASOUND AND RADIOGRAPHIC METHODS
OF NON-DESTRUCTIVE CONTROL FOR QUALITY ASSESSMENT
OF METAL PRODUCTS OF ADDITIVE PRODUCTION**

Purpose. Find out the possibilities of using acoustic and radiographic methods of non-destructive testing to detect defects in products of electron beam surfacing made of titanium, steel, tungsten, molybdenum and bronze, as well as to determine optimal technologies and control parameters.

Methodology. Comparative control of the acoustic research was carried out by contact transducers, longitudinal (compression) ultrasonic waves of the following frequencies/diameters of the working surface: 2 MHz/24 mm; 2.5 MHz/10mm and 5 MHz/14mm. The radiographic examination was carried out using the technology of classic film radiography and DR (digital direct radiography).

Findings. It is shown that ultrasonic and radiation control methods allow to assess the quality of products of additive technologies in accordance with regulatory documents.

Originality. Based on the research results, recommendations were made regarding the use of non-destructive testing methods to detect defects and mechanical properties of finished products.

Practical value. The use of modern ultrasonic flaw detectors with phased antenna arrays (PHAs), with the simultaneous use of TFM (Total Focusing Method) and FMC (Full Matrix Capture) modes to detect defects of arbitrary orientation located at different depths is promising for researching the quality of products of additive technologies.

Keywords: additive technologies; non-destructive testing; acoustic method; radiographic method.