

Голуб І. В., Носко О. А., Коваль Д. О., Ковзик А. М., Кушнір Ю. О.

Дослідження властивостей спеченої хром-нікель-ніобієвої сталі

Holub I. V., Nosko O. A., Koval D. O., Kovzik A. M., Kushnir Yu. O.

Study of properties of sintered chrome-nickel-niobium steel

Мета. Проведення аналізу сучасних технологій виготовлення порошкових матеріалів для адитивних технологій виробництва, визначення їх ключових характеристик та з'ясування впливу виробництва на кінцеву якість виробів при заданих умовах експлуатації. Дослідження механічних властивостей та корозійної стійкості виробу з спеченої хром-нікель-ніобієвої сталі виготовленого адитивною технологією.

Методика. Теоретичні та експериментальні дослідження зразків спечених порошкових сталей за ISO 2738, ISO 4003 для порошків, а також для механічних властивостей зразків за ISO 3325:2017; ISO 3928:2014; ISO 6892:2019; ISO 6506-1:2019.

Результати. Досліджено механічні властивості та корозійну стійкість спеченої хром-нікель-ніобієвої сталі при заданих умовах експлуатації виробів. Встановлено вплив пористості на жаростійкість та механічні властивості спечених матеріалів при виробництві виробів методом Selective laser melting.

Наукова новизна. Отримання нової інформації, що до механічних та жаростійких характеристик для сталей які запропоновані для адитивної технології при підвищених температурних умовах експлуатації виробів. З'ясування впливу контактів спечених частинок порошку на механічні властивості порошкового виробу.

Практична значущість. Встановлено, що спечені матеріали, що містять більшу кількість термостійких компонентів, мають нижню відкриту пористість та більш корозійностійкі при підвищених температурах. Запропоновані технологічні методи підвищення корозійної стійкості спечених хром-нікель-ніобієвої сталей. Розширення сортаменту порошкових матеріалів для адитивних технологій.

Ключові слова: нержавіюча сталь, хром, нікель, selective laser melting, корозійна стійкість, порошок, спечені вироби

Goal. Conducting an analysis of modern technologies for the production of powder materials for additive manufacturing technologies, determining their key characteristics and clarifying the impact of production on the final quality of products under given operating conditions. Study of the mechanical properties and corrosion resistance of a sintered chrome-nickel-niobium steel product made by additive technology.

Method. Theoretical and experimental studies of samples of sintered powder steels according to ISO 2738, ISO 4003 for powders, as well as for mechanical properties of samples according to ISO 3325:2017; ISO 3928:2014; ISO 6892:2019; ISO 6506-1:2019.

The results. The mechanical properties and corrosion resistance of sintered chrome-nickel-niobium steel under the specified operating conditions of the products were studied. The effect of porosity on the heat resistance and mechanical properties of sintered materials during the production of products by the Selective laser melting method was established. Scientific novelty. Obtaining new information regarding the mechanical and heat-resistant characteristics of steels proposed for additive technology at elevated temperature conditions of product operation. Elucidation of the effect of contacts of sintered powder particles on the mechanical properties of the powder product.

Practical significance. It has been established that sintered materials containing a greater number of heat-resistant components have lower open porosity and are more corrosion-resistant at elevated temperatures. Proposed technological methods of increasing the corrosion resistance of sintered chromium-nickel-niobium steels. Expansion of the range of powder materials for additive technologies

Key words: stainless steel, chrome, nickel, selective laser melting, corrosion resistance, powder, sintered products

Вступ. Розвиток адитивних технологій активно стимулює пошук нових матеріалів та методів їх виробництва [1]. Завдяки значному прогресу в цій області зростає інтерес до вдосконалення порошкових матеріалів. Ринок матеріалів постійно оновлюється зокрема, спостерігається зростання інтересу до матеріалів, що мають поліпшені механічні та фізико-хімічні властивості.

Дослідження і аналіз різних технологій виробництва металевих порошків для адитивного виробництва, їх характеристика та вплив на якість готових виробів є актуальним завданням для порошкової металургії у теперішній час. З розвитком адитивних технологій до виробництва порошкових матеріалів висувається все більше суттєві вимоги до якості порошків, що в свою чергу потребує суттєвих змін у технології виробництва не тільки порошків, а також

і до матеріалів з яких вони виробляються. Адитивні технології, які також відомі як 3D друк, на сьогоднішній день є одними з найбільш перспективних напрямків розвитку сучасної порошкової промисловості [1, 2]. Ця технологія дозволяє виготовляти вироби будь-якої складності, мінімізуючи кількість матеріальних витрат і часу на виробництво. Однак, ефективність і якість кінцевого продукту значною мірою залежить від якості та властивостей порошкових матеріалів, що використовуються в процесі адитивного виробництва [3-5]. Саме тому технологічні аспекти виробництва порошків для 3D друку є актуальною темою для дослідження, оскільки від них залежить успіх впровадження нових адитивних технологій у виробництво. Порошкові матеріали використовуються в різних галузях адитивного виробництва: від виготовлення прототипів до серійного

© Голуб І. В. – к.т.н., доц. УДУНТ
Носко О. А. – к.т.н., доц. УДУНТ
Коваль Д. О. – к.т.н., доц. УДУНТ
Ковзик А. М. – к.т.н., доц. УДУНТ
Кушнір Ю. О. – к.т.н., доц. УДУНТ

Holub I. – c.t.s., docent USUST
Nosko O. – c.t.s., docent USUST
Koval D. – c.t.s., docent USUST
Kovzik A. – c.t.s., docent USUST
Kushnir Yu. – c.t.s., docent USUST



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk>

виробництва деталей для аерокосмічної, медичної, автомобільної та інших.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Технології тривимірного друку розвиваються швидкими темпами. Від першої спроби японця Хідео Кодами запатентувати процес швидкого прототипування (1981 р., до речі, спроба не вдалася) та появи перших робочих зразків 3D-принтера (1983-1986 р.р.) до сьогодні минуло трохи більше 40 років. Технологія, яка використовує друк металевим порошком відносно нова, її комерційне використання розпочалося на початку 2000-х років. Сучасні апарати тривимірного друку дозволяють виготовляти просторові вироби із чистих металів та їхніх сплавів, включаючи конструкційні, нержавіючі та інструментальні сталі [2, 6-7]. Незважаючи на велику кількість назв процесів 3D друку металами всі вони засновані на принципі плавлення порошкового шару. Технологія виробництва полягає у шаровому твердофазному або рідкофазному спіканні металевих порошоків необхідного хімічного складу під впливом зовнішніх джерел енергії [8]. Сучасне виробництво стрімко рухається в напрямку підвищення ефективності, зменшення матеріальних витрат і часу, необхідного для виготовлення деталей. 3D друк технологія є одним із ключових напрямків розвитку сучасної порошкової металургії, завдяки своїй здатності створювати вироби складної форми без потреби у використанні додаткових інструментів або матриць [9, 10].

Значна частина адитивних технологій базується на використанні характеристик порошкових матеріалів, таких як розмір частинок, морфологія, хімічний склад і фізичні властивості, залежить не тільки якості друку, але й продуктивності процесу в цілому. Це робить процес виготовлення порошоків одним із найбільш критичних етапів у всьому ланцюзі адитивного виробництва. Тому до порошоків, що використовуються для 3D друку, пред'являються особливі вимоги. Так, наприклад, для того щоб мати високу продуктивність друку, необхідно використовувати порошки з високою текучістю. Це прийнято для порошоків сферичною формою часток, які виготовляють розпиленням розплавів газом [11].

Порошки, що використовуються для 3D друку, класифікуються за кількома основними ознаками: хімічний склад, гранулометричний склад, морфологія частинок, метод отримання порошку. Металеві порошки, зокрема зі сталі, алюмінію, титану та їхніх сплавів, є основними матеріалами для промислового 3D друку [3, 4, 8, 9].

3D друк металом зараз нараховує досить великий набір сталей, таких як: інструментальні, нержавіючі, жароміцні, конструкційні, що містять хром, кобальт, титан; а також спеціальні суміші та склади, що розробляються під конкретне завдання. Розробка нових матеріалів та вдосконалення існуючих технологій їх виробництва дозволяє значно розширити межі застосування 3D друку [4, 10]. Однак, разом із широкими можливостями, існує низка

технологічних викликів, пов'язаних із виготовленням порошкових матеріалів, що мають необхідні характеристики для забезпечення високої якості кінцевого продукту. Це необхідність створення досконалого контакту між окремими шарами, отримання структури, що відповідає вимогам, та інше. Саме тому при розробці виробу, який буде експлуатуватися в конкретних умовах необхідно обирати порошок з заданими властивостями експлуатації виробу та вдосконалену технологію виробництва, які б відповідали вимогам сучасних 3D принтерів і забезпечували високу якість кінцевих виробів. Зростаюча конкуренція у промисловості вимагає від виробників постійного пошуку інноваційних рішень, що стосуються як властивостей матеріалів, так і технологічних процесів їх виготовлення.

Основною вимогою до порошкових матеріалів і виробів є безвідмовність роботи машин, апаратів або приладів в заданих умовах експлуатації, що характеризуються рівнем і характером діючих навантажень, тривалістю їх застосування, температурою, періодичному або безперервному впливу агресивного середовища при мінімальних витратах матеріальних, трудових і енергетичних ресурсів. Тому метою роботи обрано вивчення впливу складу, структури, методу отримання на корозійні та фізико-механічні властивості матеріалу для задовільнення умов експлуатації, який зроблено адитивною технологією. Тобто, необхідно, підібрати порошковий матеріал, який позитивно поводить себе при заданих умовах експлуатації виробу, який виготовлено 3D друком для забезпечення зменшення кількості відходів і підвищення екологічної стійкості виробничих процесів з меншим впливом на навколишнє середовище, що також додає актуальності цій темі.

Матеріали та методи дослідження.

Основними параметрами, від яких залежить якість пористого матеріалу, є загальна пористість, розмір пір, механічні характеристики дослідних зразків.

Загальну пористість визначали, виходячи з об'єму і маси зразку, та порівнюючи її з щільністю безпористого матеріалу. Для цього зважували зразок на повітрі і у воді. Визначення загальної пористості проводили за стандартом ISO 2738:2009, розмір пор - за ISO 4003. Для аналізу механічних властивостей обрані наступні методи: визначення тимчасового опору та межі текучості за ISO 3325:2017; модулю пружності за ISO 6892:2019; визначення відносного подовження за ISO 3928:2014; визначенням твердості по Брінеллю ISO 6506-1:2019.

Форма і розміри зразків для визначення тимчасового опору та відносного подовження відповідали вимогам і мали наступні розміри (рисунку 1). Товщина зразка ($6,0 \pm 0,3$) мм. На поверхні зразків не повинне бути виступів, тріщин, задирок, розшарувань, раковин і механічних ушкоджень значення параметрів шорсткості оброблених поверхонь робочої частини плоского зразка була не більше 20 мкм.

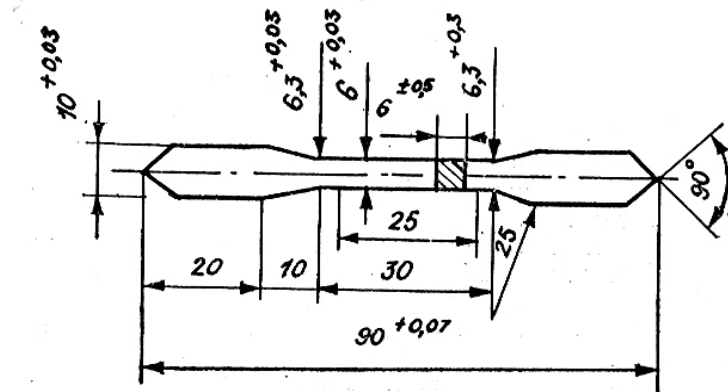


Рисунок 1 – Зразок для випробувань

Випробування на твердість по Брінеллю (НВ) здійснювався вдавненням у випробуваний зразок сталеві кульки визначеного діаметра під дією заданого навантаження протягом визначеного часу. Діаметр кульки і навантаження для випробувань обирали так, щоб діаметр відбитка дорівнював $d = (0,25 \dots 0,5)D$. Використовувалася кулька діаметром $D = 2,5$ мм. Товщина зразків 6 мм. Діаметр відбитка вимірювався за допомогою лупи, на окулярі якої нанесена шкала з розподілами.

Крім того, прогнозуючи підвищену корозійну стійкість матеріалу оцінювали його жаростійкість. Основним методом дослідження обрано оцінку жаростійкості зразків на повітрі при температурі 800 °С з розрахунком і аналізом показників корозії, за методикою викладеною в [12].

Мета і завдання дослідження. Вплив основних структурних і технологічних факторів на механічні властивості порошкових нержавіючих сталей є об'єктом численних досліджень. Значно менше вивчена корозійна стійкість [13]. Однак слід зазначити, що порівняти корозійні властивості порошкових матеріалів досить важко у зв'язку з відсутністю єдиної методики випробувань. Також відомо, що висока корозійна стійкість нержавіючих порошків обумовлена пасивацією поверхні часток і порушення півки призводить до різкого зниження опору матеріалу корозії.

Найважливішими структурними характеристиками порошкових нержавіючих сталей є пористість, структура частинок порошку та їх контакт. Інтенсивність впливу пористості на швидкість корозії визначається складом матеріалу, умовами його отримання і експлуатації (склад середовища, температура, тривалість роботи та інші). Встановлено [14], що опір корозії порошкових нержавіючих сталей істотно залежить від способу отримання порошку у зв'язку з сильно розвиненою поверхнею (підвищення дисперсійності структури). Також на швидкість корозії впливає збільшення числа концентратів напруги (мікропори, мікротріщини). Тому при виборі порошкових нержавіючих сталей слід прагнути до отримання рівноважної структури з великим зерном і максимальним радіусом кривизни в вершинах тріщин і мікротріщин.

Підвищення корозійної стійкості також відбувається при введенні у сталь таких елементів як хром, нікель (більше 14 %), марганець (більше 14 %), титан, ніобій, молибден (більше 1%) та зниженням вмісту вуглецю [15]. Дана робота присвячена дослідженню спеченої хром-нікель-ніобієвої сталі. Така лита сталь за своїм складом є жаростійкою. Однак особливості виготовлення виробів методом адитивного друку потребують досліджень механічних характеристик та корозійної поведінки в окислювальній атмосфері при високих температурах. Тому завданням дослідження було вивчення властивостей виробу з хром-нікель-ніобієвої сталі, та видача рекомендацій для заданих умов експлуатації виробів.

Результати дослідження. Проведено дослідження виробу отриманого 3D друком за selective laser melting методом зі спеченої сталі складу, %: 0.9 вуглецю, 20 хрому, 32 нікелю, 0.9 ніобію, марганцю 1.9, кремнію 1.0, молибден 0.5 та інші у зв'язку з збільшенням температури експлуатації на 250 °С. Сталевий порошок, отримано методом газової атомізації - розпилення розплавленого металу струменем аргону. Цей метод дозволяє отримати сферичні частинки металевого порошку з контрольованим розміром бо виробництво порошків це один з головних етапів що впливає на якість кінцевого виробу. При дослідженні отриманого порошку з'ясовано, що якісний склад відповідає основним вимогам до форми частинок (сферична форма спостерігається у 92 % часток), фракційного складу (95 % виходу задовільної фракції частинок металу 40-60-мкм).

Після друку елемент зразку готової деталі проаналізовано за механічними та корозійністкими показниками.

При проведенні досліджень механічних властивостей за обраними методиками отримані наступні результати (таблиця 1).

Таблиця 1 – Властивості матеріалу який досліджувався.

| Властивість | Од. виміру | Значення |
|----------------------------|------------|----------|
| Твердість по Брінеллю (НВ) | Од. | 141 |
| Подовження при розриві | % | 23 |
| Тимчасовий опір | МПа | 495 |
| Межа текучості | МПа | 215 |
| Модуль пружності | ГПа | 205 |

Також отримані термічні властивості обраного матеріалу:

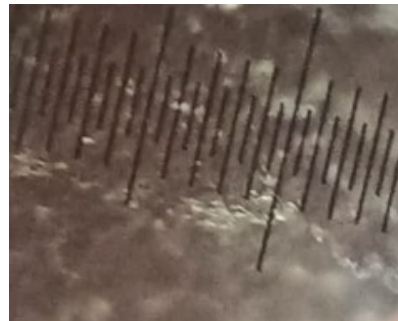
- максимальна жароміцність 1050 °С;
- теплопровідність 13 Вт/м·град;
- коефіцієнт теплового розширення $16,3 \cdot 10^{-6}/\text{град}$.

Отриманий розподіл частинок порошку у об'ємі виробу не є достатньо рівномірним (рисунок 2, а –

у натуральному вигляді, б – при 25 кратному збільшенні) спостерігаємо відсутність плавлення, нерозплавлені частки, пористість, що може привести до зниження механічних властивостей виробу у області скупчення пустот де у виробі спостерігається звуження та зменшення діаметру та збільшує можливі зменшення стійкості до точкової та щілинної корозії.



а)



б)

Рисунок 2. Макроструктура розподілу частинок порошку після друку

На рисунку 3 наведено один із зразків на якому було проведено дослідження на корозійну стійкість: а - при натуральному розмірі, б – при 25 кратному збільшенні. Інтенсивність окислювальних процесів оцінювалось по приросту маси на одиницю площі зразка в одиницю часу. Візуальне спостереження за зразками, що витримані до температури 800 °С показало наступні зміни. В початковому періоді високотемпературної витримки усі зразки мали однакову тонку плівку світло-сірого кольору. Після півгодинної витримки зразки змі-

нили колір від сріблясто-сірого до темно-сірого. Після години витримки на зразках з'явилася чітко виражена окалина сіро-зеленого кольору з ледь помітними буруватими плямами, які нерівномірно розташовані по поверхні. Збільшення часу витримки привело до збільшення окисненості поверхні зразків, але суттєвих змін кольору та об'єму не спостерігалось. Разом с тим спостерігалось скупчення окисної плівки, що утворилася, та нерівномірний її розподіл по поверхні зразків.



а)

б)

Рисунок 3. Зразок після проведеного дослідження на корозійну стійкість

Обговорення результатів. Відомо що при виробництві деталей складної конфігурації використовують 3D друк з порошків нержавіючих сталей 03X17H14M2 (AISI 316), 03X17H13M2 (AISI 316L) [16]. Ці порошки, що містять молібден та мають низький вміст вуглецю, використовують для друку міцних та довговічних деталей зі складною геометрією за допомогою різних процесів 3D-друку, таких як селективне лазерне спікання (SLS), пряме лазерне спікання металів (DMLS), електронно-променеве плавлення (EBM) та інші. Вироби мають високу міцність і відмінні антикорозійні властивості, де що підвищену температуру експлуатації. Для збільшення жаростійкості у якості матеріалу обрано сталь, яка задовольняє вимогам до експлуатації виробу при високих температурах. Таку сталь обрано з урахуванням наступного: підвищення жаростійкості можливо за рахунок вводу в сталь металів, що дають суцільну плівку на поверхні виробу, яка за своїми властивостями відповідає умові Пілінга-Бедвордса [12]. До таких металів відносять алюміній, титан, кадмій, ніобій та інші. Саме тому обрано сталь, що містить у своєму складі ніобій.

Аналіз макроструктури готового зразку показав наявність невеликих не спечених об'ємів металу, що в свою чергу може знижати механічні властивості у деяких ділянках виробу. При аналізі зразків на корозійну стійкість, виявлено, що масометричний показник дорівнює 2,07 г/м²·рік, а глибиний показник становить 6 балів по 10 бальній шкалі і відповідає IV групі стійкості (відносно стійкі метали).

Такий показник задовольняє умовам експлуатації виробу, але не є відмінним, а з урахуванням нерівномірності розподілу окисленої плівки може привести до зниження корозійної стійкості в цілому. Тому доцільно розглянути можливість використання сталевих виробів, які можуть вироблятися за адитивними технологіями та відповідати умовам експлуатації.

Висновки.

Для обраних умов експлуатації деталей складної конфігурації, які виробляються 3D-друком і мають витримувати температуру 1050 °С можна рекомендувати використання сталі наступного хімічного складу основних елементів: вуглець до 0,1 %, хром 19-21 %, нікель 32-35 %, ніобій (на основі проведених досліджень) а також добавка міді 1-2 %, що дозволить зменшити ймовірність отримання не спечених між собою частинок. Це сприяє зменшенню пористості, підвищенню міцності і жорсткості за рахунок наявності легкоплавких фаз. Це надасть можливість при лазерному спеченні зменшити пористість виробу та міцність зв'язку частинок між собою та підвищить механічні та корозійні властивості виробу при заданих умовах експлуатації. Водночас слід враховувати, що надлишок міді може спричинити зміну інших властивостей, таких як крихкість або зміну структури сплаву, тому важливо проводити додаткові дослідження при переході до іншого хімічного складу сталі металевого порошку з обов'язковим урахуванням умов експлуатації виробів.

Перелік посилань

1. Kumar S. Additive Manufacturing: Applications and Innovations / S. Kumar, J. P. Kruth. Singapore Springer. 2020. – 317 p.
2. Tofail, S. A., Koumoulos, E. P., Bandyopadhyay, A., Bose, S., O'Donoghue, L., & Charitidis, C. (2018). Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. *Materials today*, 21(1), 22-37.
3. Callister, W. D. (2018). *Materials Science and Engineering: An Introduction*. Wiley.
4. Levy, G. N., Schindel, R., & Kruth, J. P. (2003). "Rapid manufacturing and rapid tooling with layer manufacturing (LM) technologies, state of the art and future perspectives." *CIRP Annals*, 52(2), 589-609.
5. Srivatsan, T. S., & Sudarshan, T. S. (2015). *Additive Manufacturing: Innovations, Advances, and Applications*. CRC Press.
6. Gao, M., Li, L., Wang, Q., Ma, Z., Li, X., & Liu, Z. (2021). Integration of additive manufacturing in casting: advances, challenges, and prospects. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 1-18.
7. Gu D.D. Meiners W. Laser Additive Manufacturing of High-Performance Materials / D.D. Gu, W. Meiners - Berlin Springer. 2019. - 356 p.
8. Порошкова металурія – основа 3D-друку металевих виробів. <https://metinvest-smc.com/ua/articles/poroskova-metalurgija-osnova-3d-druku-metalevix-virobiv/>
9. Zäh M.F. Proceedings of the 26th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference / Zäh, M.F., Lutzmann, S. // University of Texas at Austin. 2015. - 123-125 p.
10. Bai, J., & Zhang, Y. (2021). "Recent advances in the development of metallic powders for additive manufacturing." *Journal of Materials Science and Technology*, 49, 65-76.
11. Федорченко И.М. Порошковая металлургия. Материалы, технология, свойства, области применения: справочник / И.М. Федорченко, И.Н. Радомы сельский [и др.]. – Киев: Наук. Думка, 1985. 624 с.
12. Жук Н.П. Курс коррозии и защиты металлов. – Москва, Металлургия, 1968, 408 с.
13. Давиденкова А.В. Технология получения материалов с свойствами конструкционных деталей из медных порошков/ А.В. Давиденкова, И.Д. Радомы сельский. – Москва, 1979. – 351 с.
14. Радомы сельский И.Д. Производство и использование порошковых материалов в легкой промышленности. – Киев, 1982, - с.124-126.
15. Радомы сельский И.Д. Конструкционные порошковые материалы/ И.Д. Радомы сельский, Г.Г. Сердюк, Н.И. Щербань. – К.: Техніка, 1985. – 152 с.
16. ASTM F2924-14. (2014). *Standard Specification for Additive Manufacturing Titanium-6 Aluminum-4 Vanadium with Powder Bed Fusion*. ASTM International.

References

1. Kumar, S. & Kruth, J. P. (2020). *Additive Manufacturing: Applications and Innovations*. Singapore Springer
2. Tofail, S. A., Koumoulos, E. P., Bandyopadhyay, A., Bose, S., O'Donoghue, L., & Charitidis, C. (2018). Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. *Materials today*, 21(1), 22-37
3. Callister, W. D. (2018). *Materials Science and Engineering: An Introduction*. Wiley
4. Levy, G. N., Schindel, R., & Kruth, J. P. (2003). Rapid manufacturing and rapid tooling with layer manufacturing (LM) technologies, state of the art and future perspectives. *CIRP Annals*, 52(2), 589-609
5. Srivatsan, T. S., & Sudarshan, T. S. (2015). *Additive Manufacturing: Innovations, Advances, and Applications*. CRC Press
6. Gao, M., Li, L., Wang, Q., Ma, Z., Li, X., & Liu, Z. (2021). Integration of additive manufacturing in casting: advances, challenges, and prospects. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 1-18
7. Gu D. D., & Meiners W. (2019). *Laser Additive Manufacturing of High-Performance Materials*. Berlin Springer
8. Powder metallurgy – the basis of 3D metal products. <https://metinvest-smc.com/ua/articles/poroskova-metalurgiiia-osnova-3d-druku-metalevix-virobiv/>
9. Záh, M. F. & Lutzmann, S. (2015). *Proceedings of the 26th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference*. (pp. 123-125). University of Texas at Austin
10. Bai, J., & Zhang, Y. (2021). Recent advances in the development of metallic powders for additive manufacturing. *Journal of Materials Science and Technology*, 49, 65-76.
11. Fedorchenko, I. M. et al. (1985). *Powder metallurgy. Materials, technology, properties, areas of application: reference book*. Nauk. Dumka
12. Zhuk, N. P. (1968). *Corrosion course and protection of metals*. Metallurgy
13. Davidenkova, A. V. & Radomyselsky, I. D. (1979). *The technology of obtaining the properties of structural parts from copper powders*. Moscow.
14. Radomyselsky, I. D. (1982). *Production and use of powder materials in light industry*. (pp. 124-126). Kyiv
15. Radomyselsky, I. D., Serdyuk, G. G., & Shcherban, N.I. (1985). *Structural powder materials*. Tekhnika
16. ASTM F2924-14. (2014). *Standard Specification for Additive Manufacturing Titanium-6 Aluminum-4 Vanadium with Powder Bed Fusion*. ASTM International.

Надійшла до редколегії / Received by the editorial board: 14.12.2023

Прийнята до друку / Accepted for publication: 20.02.2024