

**Олексій Манжос<sup>1</sup>, Андрій Пожуєв<sup>2</sup>, Олена Михайлуца<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>аспірант кафедри фундаментальної та прикладної математики  
Запорізький національний університет (Запоріжжя, Україна)  
E-mail: [ojekca1996@gmail.com](mailto:ojekca1996@gmail.com)

<sup>2</sup>кандидат фізико-математичних наук, професор кафедри фундаментальної та прикладної математики  
Запорізький національний університет (Запоріжжя, Україна)  
E-mail: [scorpio6828@gmail.com](mailto:scorpio6828@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4083-5139>  
ResearcherID: [AAE-6507-2019](https://orcid.org/AAE-6507-2019). Scopus Author ID: [6506407054](https://orcid.org/6506407054)

<sup>3</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення  
Запорізький національний університет (Запоріжжя, Україна)  
E-mail: [elenamikhaylutsa7@gmail.com](mailto:elenamikhaylutsa7@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2935-7997>.  
ResearcherID: [AAФ-4942-2019](https://orcid.org/AAФ-4942-2019). Scopus Author ID: [16407827200](https://orcid.org/16407827200)

## НЕСТАЦІОНАРНА РЕАКЦІЯ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ОБОЛОНКИ З ПРУЖНИМ ШАРОМ НА ДІЮ РУХОМОГО РАДІАЛЬНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Для нескінченно довгої циліндричної оболонки з м'яким невагомим пружним шаром розглянуто перехідні процеси, що виникають у момент прикладання навантаження та в наступні безпосередньо після цього моменту проміжки часу. Досліджено випадки руху радіального осесиметричного навантаження як із постійною, так і зі змінною швидкістю. Для аналізу несталих процесів запропоновано алгоритм, що ґрунтується на застосуванні інтегрального перетворення Фур'є за осовою координатою. Для інтегрування в просторі зображень перетворених диференціальних рівнянь руху оболонки використано чисельний метод Рунге-Кутти. Розглянуто випадки руху навантаження з різною за величиною швидкістю, а також отримано результати для рівношвидкованого руху хвилі тиску.

**Ключові слова:** нестационарна реакція; циліндрична оболонка; перехідні процеси; інтегральне перетворення Фур'є.  
Рис.: 3. Бібл.: 11.

**Актуальність теми дослідження.** Конструкції у вигляді пластин та оболонок широко використовуються в сучасній техніці, поєднуючи в собі малу вагу та високу жорсткість. Тонкостінні оболонки знаходять застосування в різних галузях, включаючи кораблебудування, авіабудування, ракетобудування, машинобудування, а також будівництво споруд. У процесі експлуатації складові конструкції піддаються динамічним навантаженням, які викликають у них коливання та нестационарні хвильові процеси. У зв'язку зі збільшенням вимог до точності розрахунків зростає роль динамічного моделювання роботи конструкцій, а також урахування перехідних процесів, що виникають у моменти часу, які йдуть за початком навантаження.

**Постановка проблеми.** Вивченню питань, пов'язаних з нестационарними реакціями пластин та оболонок, присвячені останні роботи авторів [4-8]. В представленій статті нескінченно довгі циліндричні оболонки з м'яким невагомим пружним заповнювачем розглянуті в аспекті вивчення перехідних процесів, що виникають як у момент прикладання навантаження, так і в наступні, безпосередньо після цього моменту, проміжки часу. Досліджено випадки руху радіального осесиметричного навантаження як з постійною, так і зі змінною швидкістю.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питанням аналізу нестационарних динамічних процесів в складних оболонках присвячено достатню кількість наукових праць [1-5]. Зокрема авторами публікації [5] отримано розв'язок нестационарної задачі для циліндричної оболонки у тривимірному пружному інерційному напівпросторі з вільною поверхнею. Акцент зроблено на випадок, коли до внутрішньої поверхні оболонки прикладаються врівноважені імпульсивні нормальні навантаження. Досліджено вплив нестационарної деформації оболонки на напружено-деформований стан напівпростору та на переміщення поверхні напівпростору. Для аналізу динамічного напружено-деформованого стану такої системи застосовано метод скінченних елементів. Картину нестационарної деформації нескінченної тришарової циліндричної оболонки під дією навантаження, яке прикладається в початковий момент часу до внутрішньої оболонки, а потім рухається зі сталою швидкістю в осьовому напрямку, вивчено авторами у статті [4]. Побудована

математична модель тришарової циліндричної оболонки із заповнювачем, яка занурена в ідеальну рідину. Запропонований підхід розширює математичні методи розв'язку початково-крайових задач механіки, у яких застосовуються інтегральні перетворення. Досліджено час встановлення процесу та перехід до стаціонарної задачі. Отримані результати можливо використовувати у якості еталонних для побудови моделей тонкостінних елементів конструкцій під дією навантажень.

У роботі [1] розглянуто задачу визначення напружено-деформованого стану циліндричних оболонок, підсилених вертикальними ребрами жорсткості під дією несиметричного квазірівномірного навантаження відповідно до моментної теорії. Припускаючи, що відсутній зсув в серединній поверхні оболонки, а також той факт, що оболонка є нерозтяжною в кільцевому напрямку, авторами розв'язана задача пошуку функції для визначення зусиль і переміщень корпусу циліндричної ємності при дії квазірівномірного навантаження, розрахунок проведено при заданих величинах коефіцієнта реакції та безрозмірної висоти. Розроблені спеціальні номограми, які дають змогу знаходити значення функцій складових напружено-деформованого стану за заданими величинами коефіцієнта реакції та безрозмірної висоти.

Задачу визначення напружено-деформованого стану тонкостінної циліндричної оболонки під дією зовнішнього тиску розглянуто в статті [3]. Отримано рівняння для окружних, поздовжніх і осьових переміщень в залежності від геометричних розмірів і пружних властивостей складових, не висуваючи при цьому гіпотезу про негерметичність оболонки в окружному напрямку та не приймаючи відсутність зміщення. Такі умови значно наближають розрахункову схему до реальних умов експлуатації циліндричної оболонки.

З розвитком рівня техніки зростає складність застосовуваних конструкцій та вимога до їхньої міцності та надійності. Поряд з експериментальними дослідженнями, елементи таких конструкцій слід піддавати ретельному теоретичному аналізу та розрахунковому обґрунтуванню міцності та стійкості. Застосування аналітичних методів обмежено рамками грубої ідеалізації, тому ефективне вирішення прикладних завдань динамічного деформування оболонок в умовах інтенсивного навантаження можливе лише із залученням чисельних методів. Авторами праці [2] для вивчення динамічного відгуку герметичної тонкостінної круглої трубчастої конструкції, підданої підводному вибуху в ближньому полі, проводились випробування на деформацію та пошкодження герметичної циліндричної трубчастої оболонки з різними внутрішніми тисками. Для виконання відповідного чисельного моделювання для дослідження було використано програмне забезпечення кінцевих елементів LS-DYNA. Однак, при розрахунку конструкцій, необхідно враховувати геометричну та фізичну нелінійність задачі; різні умови закріплення та навантаження, що робить чисельне моделювання нетривіальним та трудомістким завданням. В наукових дослідженнях [9-10] приділено увагу оберненим задачам механіки деформівного твердого тіла для циліндричної оболонки. Представлена в роботі [10] методика дозволяє ефективно ідентифікувати невідоме нестационарне навантаження, а її використання дозволяє побудувати теоретичну базу для реалізації управління параметрами пружно-деформівного стану елементів конструкцій у вигляді циліндричних оболонок. В публікації [9] наведено розв'язок граничної оберненої задачі для циліндричної оболонки під дією нерівномірного зовнішнього тиску. Запропонована постановка задачі пов'язана з відновленням напружено-деформованого стану системи за наявності недоступної для спостереження її частини.

Аналіз проведеного огляду показав, що завдання знаходження динамічних характеристик накладають обмеження на використовувані методи дослідження. Деякі з них виявляються практично не застосовними для конкретних прикладних задач. Тому для більш повного врахування всіх явищ застосовуються аналітичні, експериментальні, чисельні методи розрахунку та їх комбінації. Отже, проблема отримання доступних для огляду аналітичних формул, що дозволяють спростувати чисельні схеми дослідження залишається актуальною.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Проведений аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що питанням дослідження перехідних процесів у елементах складених конструкцій приділено недостатньо уваги. При цьому корисним є порівняння результатів досліджень у випадках, коли елементи конструкції описуються різними за складністю моделями, що дозволить визначити межі достовірності отриманих результатів для кожної з них. Крім того, для побудованих моделей практично важливо побудувати картини деформації для різних типів поведінки навантаження, що прикладається.

**Метою статті** є розробка аналітичного методу розрахунку циліндричних оболонок з м'яким невагомим пружним шаром під дією рухомого радіального навантаження. Розглянуто випадки руху навантаження з різною за величиною швидкістю, а також рівноспівільнений рух хвилі тиску. Для аналізу таких несталих процесів поставлена задача розробки алгоритму, що ґрунтується на застосуванні інтегрального перетворення Фур'є за осью координатою, а також використанні чисельного методу Рунге-Кутта для інтегрування в просторі зображень перетворених диференціальних рівнянь руху оболонки.

### Виклад основного матеріалу.

1. Рух оболонки описується рівняннями, заснованими на гіпотезі Кірхгофа-Лява:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\nu}{R} \frac{\partial w}{\partial x} = \rho \frac{1-\nu}{2G} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2}; \quad (1.1)$$

$$\frac{\nu}{R} \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{h^2}{12} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \frac{w}{R^2} = -\rho \frac{1-\nu}{2G} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \frac{1-\nu}{2Gh} (q_c - \rho),$$

де  $q_c$  – реакція з боку шару;  $\rho$  – інтенсивність заданого радіального навантаження;  $h$ ,  $R$  – товщина та радіус серединної поверхні оболонки.

При записі рівнянь (1.1) враховано, що контакт між оболонкою і пружним шаром ковзкий, а зв'язок – двосторонній.

Зовнішній пружний шар приймається невагомим. Таке припущення є досить обґрунтованим для шару з великою жорсткістю або малою густиною. Для визначення реакції такого середовища застосовні три підходи. По-перше, можна використовувати рівняння теорії пружності, які в переміщеннях мають вигляд:

$$(\lambda_c + 2\mu_c) \frac{\partial \theta}{\partial z} + 2\mu_c \frac{\partial w_\varphi}{\partial x} = 0$$

$$(\lambda_c + 2\mu_c) \frac{\partial \theta}{\partial x} + 2\mu_c \frac{1}{z} \frac{\partial}{\partial z} (r w_\varphi) = 0 \quad (1.2)$$

$$\theta = \frac{1}{z} \frac{\partial}{\partial z} (z U_z) + \frac{\partial U_x}{\partial x}; \quad 2w_\varphi = \frac{\partial U_z}{\partial x} - \frac{\partial U_x}{\partial z}$$

Пружний шар можна представити наближеною моделлю, у якій ураховується тільки радіальне переміщення. Можливість застосування подібних наближених моделей для розв'язання задач про радіальні коливання такої складеної конструкції аналізувалася раніше в роботах [4; 5], а для задачі про рухоме навантаження подібний підхід використовувався в [11]. При цьому радіальні переміщення пружного шару задовольняють рівнянню:

$$\frac{\partial^2 U_z}{\partial z^2} + \frac{1}{z} \frac{\partial U_z}{\partial z} - \frac{U_z}{z^2} + \frac{\mu_c}{\lambda_c + 2\mu_c} \frac{\partial^2 U_z}{\partial x^2} = 0. \quad (1.3)$$

Рівняння (1.3) ще раз спроститься, якщо уявити пружний шар моделлю, складеною з «дисків», не пов'язаних за координатою. Для такої моделі замість (1.3) маємо таке рівняння:

$$\frac{\partial^2 U_z}{\partial z^2} + \frac{1}{z} \frac{\partial U_z}{\partial z} - \frac{U_z}{z^2} = 0 \quad (1.4)$$

Пружний шар має скінчені розміри із ненавантаженою зовнішньою поверхнею. Тоді граничні умови на його бічних поверхнях мають вигляд:  
при використанні рівнянь (1.2)

$$\begin{aligned} \text{при } z = R \quad \sigma_{zx} = 0; \quad \sigma_{zz} = -q_c; \quad U_z = w; \\ \text{при } z = b \quad \sigma_{zx} = 0; \quad \sigma_{zz} = 0. \end{aligned} \quad (1.5)$$

У разі використання рівнянь (1.3) або (1.4) необхідно в (5) відкинути умови для дотичних напружень.

Початкові умови при для рівнянь (1) мають вигляд:

$$U = w = 0; \quad \frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial w}{\partial t} = 0. \quad (1.6)$$

Необхідно проінтегрувати систему (1.1) при початкових умовах (1.6), попередньо визначивши з (1.2)–(1.5) реакцію з боку пружного шару.

2. Визначимо залежність радіальних переміщень оболонки від реакції пружного шару для кожної з трьох моделей. Переходячи до безрозмірних змінних і застосовуючи перетворення Фур'є за  $x'$ , загальний розв'язок перетворених рівнянь (2.1) у просторі зображень запишемо у вигляді:

$$\begin{aligned} U_r' = \frac{1}{\beta} \{ C_1 [\zeta r' I_0(\xi r') - 4(1 - \nu_c) I_1(\xi r')] + C_2 I_1(\xi r') + \\ + C_3 [\xi r' K_0(\xi r') - 4(1 - \nu_c) K_1(\xi r')] - C_4 K_1(\xi r') \}; \end{aligned} \quad (2.1)$$

$$U_x' = \frac{1}{\beta} \{ C_1 \zeta r' I_1(\xi r') + C_2 I_0(\xi r') - C_3 \zeta r' K_1(\xi r') + C_4 K_0(\xi r') \},$$

де  $\beta = \frac{h}{R}$ ;  $\{U_r', U_x'\} = \frac{1}{h} \{\bar{U}_r, \bar{U}_x\}$ ;  $\xi$  – параметр перетворення Фур'є,  $I_n(x)$ ,  $K_n(x)$  – функції Бесселя від уявного аргументу першого та другого роду, а функції  $C_k(\xi)$  визначаються з граничних умов (1.5).

Закон Гука, переписаний з використанням співвідношень Коші, у просторі зображень має вигляд:

$$\frac{\sigma_{rr}}{\beta \mu_r} = \frac{2\nu_c}{1 - 2\nu_c} \left( i \xi U_x' + \frac{U_r'}{r'} \right) + \frac{2(1 - \nu_c)}{1 - 2\nu_c} \cdot \frac{dU_r'}{dr'}; \quad (2.2)$$

$$\frac{\bar{\sigma}_{rx}}{\beta \mu_c} = \frac{dU_x'}{dr'} + i \xi U_r'. \quad (2.3)$$

Підставляючи (2.1) (2.2) – (2.3), отримуємо вирази для трансформант напружень через бесселеві функції. Задовольняючи потім перетвореним граничним умовам (1.5), отримуємо аналогічно до роботи [11] вираз трансформанти нормальної реакції пружного шару через трансформанту радіального переміщення оболонки. Цей вираз має громіздкий вигляд [11] і тут не виписується. Якщо пружний шар нескінчений, то (2.1) необхідно покласти  $C_1 = 0$ ,  $C_2 = 0$ , і тоді зазначена вище залежність реакція-переміщення оболонки набуде вигляду:

$$q_c = -\mu_c f(\xi) \bar{\omega}; \quad (2.4)$$

$$f(\xi) = \frac{\xi^2}{2(1 - \nu_c^2)} \left[ \frac{I_0^2(\xi)}{I_1^2(\xi)} - 1 \right] - \frac{1}{1 + \nu_c}. \quad (2.5)$$

При використанні рівнянь (1.3) у випадку нескінченного пружного шару функцію  $f(\xi)$  в (2.4) необхідно обчислити за формулою

$$f(\xi) = \frac{1}{v_1^2} \left[ v_1 \xi \frac{I_0(v_1 \xi)}{I_1(v_1 \xi)} - 2v_1^2 \right]; \quad v_1^2 = \frac{1 - 2\nu_c}{2(1 - \nu_c)}. \quad (2.6)$$

Для моделі (1.4) у разі пружного шару скінченного розміру залежність реакція-переміщення оболонки має вигляд:

$$q_c = -\beta \mu_c \left( \frac{2(1 - \varepsilon^2)}{1 + \varepsilon^2 - 2\nu_c} \right) \omega; \quad \varepsilon = \frac{b}{R} \quad (2.7)$$

У разі нескінченного пружного шару тут необхідно покласти  $\varepsilon = 0$ . Для всіх моделей після отримання залежності пружний шар – переміщення оболонки подальший розв’язок зводиться до розгляду у просторі зображень диференціальних рівнянь руху оболонки. Опишемо одержання остаточного розв’язку при використанні зв’язку у формі (2.7). Для співвідношень (2.4) – (2.6) алгоритм аналогічний.

3. У просторі зображень, переходячи до безрозмірних величин, рівняння (1.1) переписуємо у вигляді:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 U}{d\tau^2} &= -\frac{2}{1-\nu} \xi^2 \bar{U} + i \frac{2\nu}{1-\nu} \xi \bar{\omega}; \\ \frac{d^2 \bar{\omega}}{d\tau^2} &= -i \frac{2}{1-\nu} \xi \bar{U} - \varphi_1(\xi) \bar{\omega} - \frac{1}{G\beta^2} \bar{P}(\xi, \tau); \\ \varphi_1(\xi) &= \frac{2}{1-\nu} \left( 1 + \frac{\beta^2}{12} \xi^4 + \frac{1}{\gamma\beta} \cdot \frac{2(1-\varepsilon^2)}{(1+\varepsilon^2-2\nu_c)} \right); \quad \gamma = \frac{G}{G_c}; \\ \tau &= \frac{c_S t}{R}; \quad c_S = \sqrt{\frac{G}{\rho}}; \quad x' = \frac{x}{R}; \quad \{U, \omega\} = \frac{\{U', \omega'\}}{h}. \end{aligned} \quad (3.1)$$

Розглянемо випадок, коли в початковий момент часу  $t = 0$  до оболонки раптово прикладається кільцеве осесиметричне навантаження, яке потім переміщується вздовж поверхні оболонки в осьовому напрямку з постійною швидкістю, тоді

$$p(x, t) = p_0 \delta(x - ct). \quad (3.3)$$

Переходячи до безрозмірних змінних згідно з (3.2) та застосовуючи перетворення Фур’є, отримуємо

$$\bar{p}(\xi, \tau) = p_0 [f_1(\xi, \tau) - i f_2(\xi, \tau)]; \quad M_s = \frac{c}{c_S}. \quad (3.4)$$

$$f_1(\xi, \tau) = \cos(M_s \xi \tau); \quad f_2(\xi, \tau) = \sin(M_s \xi \tau). \quad (3.5)$$

Віднесемо переміщення оболонки до величини  $p_0/G\beta^2$  й шукатимемо розв’язок рівнянь (3.1) у вигляді

$$U = U_1 + iU_2; \quad \omega = \omega_1 + i\omega_2 \quad (3.6)$$

Тоді для визначення  $\bar{U}_1 \div \bar{\omega}_2$  приходимо до наступної задачі Коші:

$$\frac{d^2 \bar{U}_1}{d\tau^2} = -\frac{2}{1-\nu} \xi^2 \bar{U}_1 - \frac{2\nu}{1-\nu} \xi \bar{\omega}_2;$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \bar{U}_2}{d\tau^2} &= -\frac{2}{1-\nu} \xi^2 \bar{U}_2 + \frac{2\nu}{1-\nu} \xi \bar{\omega}_1; \\ \frac{d^2 \omega_1}{d\tau^2} &= \frac{2\nu}{1-\nu} \xi \bar{U}_2 - \varphi_1(\xi) \omega_1 - f_1(\xi, \tau); \\ \frac{d^2 \omega_2}{d\tau^2} &= -\frac{2\nu}{1-\nu} \xi \bar{U}_1 - \varphi_1(\xi) \omega_2 + f_2(\xi, \tau); \end{aligned} \quad (3.7)$$

$$\bar{U}_1 = \bar{U}_2 = \omega_1 = \omega_2 = 0; \quad \frac{dU_1}{d\tau} = \frac{dU_2}{d\tau} = \frac{d\omega_1}{d\tau} = \frac{d\omega_2}{d\tau} = 0; \quad (\tau = 0). \quad (3.8)$$

Система (3.7) з початковими умовами (3.8) інтегрувалася для усіх необхідних значень параметра перетворення Фур'є  $\xi$  на ЕОМ методом Рунге-Кутта. Після цього за формулами обернення знаходилися необхідні величини, наприклад, радіальні переміщення оболонки подаються у вигляді

$$\omega^* = \frac{\omega G}{p_0} = \frac{1}{\pi \beta} \int_0^\infty (\omega_1 \cos(\xi x) - \omega_2 \sin(\xi x)) d\xi. \quad (3.9)$$

Програма розрахунку складена в такий спосіб, при якому з обчислення інтегралів виду (3.9) за методом Файлона система (3.7) інтегрується за всіма  $\xi$  у вузлах інтегрування, причому масиви величин для усіх необхідних значень  $\tau$  запам'ятовуються. Ці масиви потім багаторазово використовуються в методі Файлона для різних значень  $x'$ , що дозволяє будувати картини розподілу переміщень оболонки за її довжиною в різні моменти часу.

При розрахунках приймали так значення безрозмірних параметрів:  $\beta = 0,004$ ;  $\varepsilon = 0,8$ ;  $\nu = \nu_c = 0,3$ ;  $\gamma = 125$ . Безрозмірна швидкість руху навантаження  $M_S$ , а також безрозмірний час  $\tau$ , для якого будується картина деформування, змінювалися. Збіжність інтегралів у (3.9), а також точність розв'язання задачі Коші (3.7)–(3.8) контролювалися шляхом чисельних експериментів.

На рис. 1 показано розподіл прогинів оболонки за довжиною для різних моментів часу під час руху навантаження з постійною швидкістю, причому  $M_S = 0,1$ . Для кривої 1 –  $\tau = 0,2$ ; 2 –  $\tau = 0,4$ ; 3 –  $\tau = 0,8$ ; 4 –  $\tau = 1,2$ ; 5 –  $\tau = 2$ .

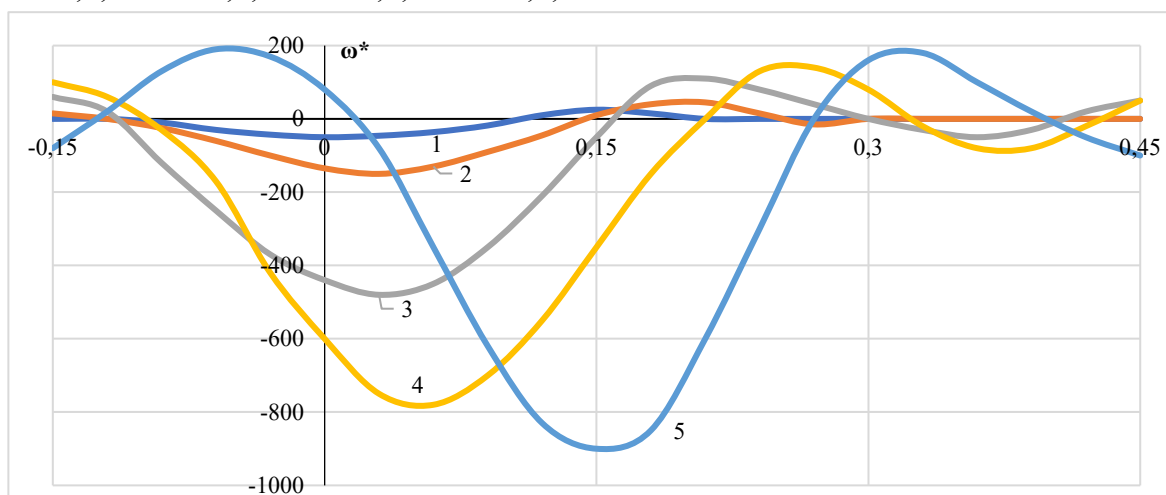


Рис. 1. Розподіл прогинів оболонки за довжиною для різних моментів часу під час руху навантаження зі швидкістю  $M_S = 0,1$

Як видно з рис. 1, на відміну від стаціонарного розв'язку, симетрія щодо місця застосування кільцевого навантаження тут порушується, причому максимуми прогинів відстають від навантаження і в перші моменти часу після початку руху інтенсивно зростають, проте вже для  $\tau = 2$  зростання практично припиняється і при подальшому збільшенні часу прогини

у межах дії навантаження починають зменшуватися, прагнучі до стаціонарних значень. Паралельно з цим максимуми кривої прогинів поступово зміщуються під навантаження, що також вказує на початок встановлення процесу, оскільки при  $M_s = 0,1$  у відповідній стаціонарній задачі картина деформування для кільцевого навантаження повністю симетрична щодо початку системи координат, яка переміщається разом з навантаженням.

Зазначена вище тенденція до встановлення процесу деформування ще помітніша у разі меншої швидкості руху навантаження. Так, на рис. 2 показано результати прорахунків для  $M_s = 0,03$ , причому тут крива 1 відповідає  $\tau = 1,0$ ; 2 –  $\tau = 2,0$ ; 3 –  $\tau = 5,0$ .

Розглянуто також випадок рівноуповільненого руху кільцевого навантаження, коли замість (3.3) маємо

$$p(x,t) = p_0 \delta \left( x - \left( V_0 t - \frac{at^2}{2} \right) \right). \quad (3.10)$$

Тут  $V_0$  – початкова швидкість;  $a$  – сповільнення.

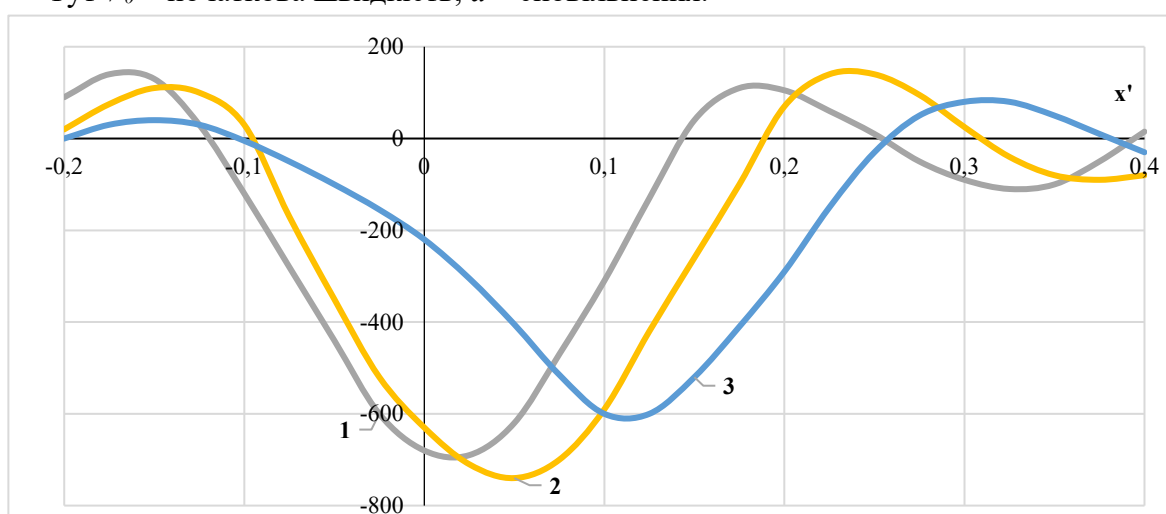


Рис. 2. Розподіл прогинів оболонки за довжиною для різних моментів часу під час руху навантаження зі швидкістю  $M_s = 0,03$

Переходячи до безрозмірних параметрів та застосовуючи перетворення Фур'є, отримуємо замість (3.5) для функцій  $f_1$  та  $f_2$  наступні уявлення

$$f_1(\xi, \tau) = \cos \left( M_s \tau \left( 1 - \frac{1}{2} M_s \omega \tau \right) \xi \right); \quad f_2(\xi, \tau) = \sin \left( M_s \tau \left( 1 - \frac{1}{2} M_s \omega \tau \right) \xi \right), \quad (3.11)$$

де  $\omega$  – безрозмірне уповільнення, що обчислюється за формулою  $\omega = aR/V_0^2$ . Для такого навантаження викликає інтерес поведінка оболонки на проміжку часу від початку руху до зупинки, причому час зупинки визначається за формулою  $\tau_k = 1/M_s \omega$ .

На рис. 3 побудовані прогини оболонки для уповільненого руху кільцевого навантаження, причому  $M_s = 0,1$ ;  $\omega = 5$ . Для кривої 1 –  $\tau = 0,4$ ;  $V = 0,8 V_0$ ;  $x' = 0,036$ ; для кривої 2 –  $\tau = 0,8$ ;  $V = 0,6 V_0$ ;  $x' = 0,064$ ; для кривої 3 –  $\tau = 1,2$ ;  $V = 0,4 V_0$ ;  $x' = 0,084$ ; для кривої 4 –  $\tau = 1,6$ ;  $V = 0,2 V_0$ ;  $x' = 0,096$ ; для кривої 5 –  $\tau = 2$ ;  $V = 0$ ;  $x' = 0,1$ . Як видно з рис. 3 з моменту застосування навантаження прогини спочатку наростають швидко (криві 1, 2, 3), потім за той же проміжок часу зростання стає значно меншим (криві 3 і 4), а з моменту зупинки прогини починають зменшуватися (криві 4 і 5), хоча ще деякий час ефект динамічного застосування навантаження продовжує позначатися.

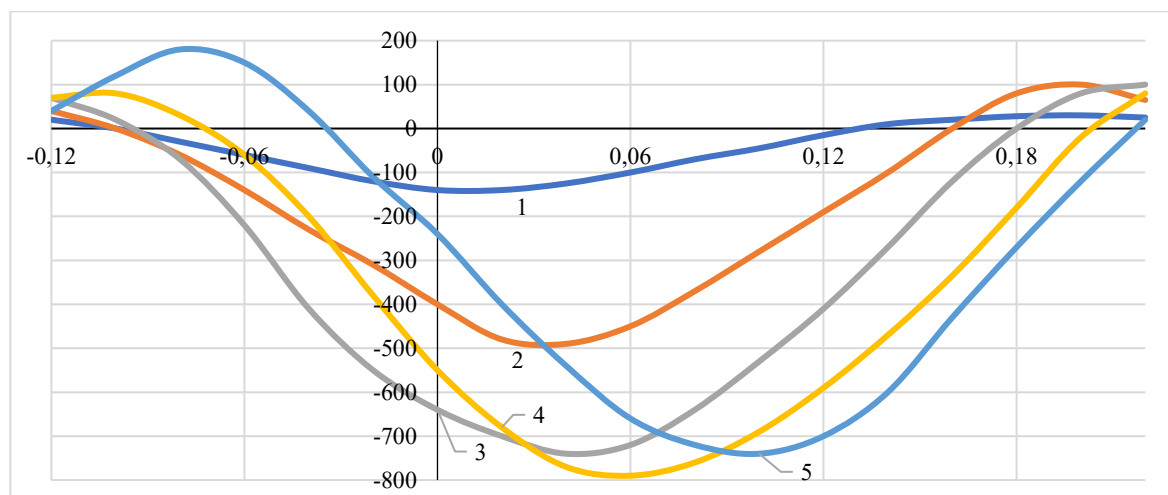


Рис. 3. Розподіл прогинів оболонки при уповільненому русі кільцевого навантаження зі швидкістю  $M_S = 0,1$

Аналогічним чином можна отримати результати для прискореного навантаження і, взагалі, навантаження, швидкість якого змінюється у часі довільним чином. При цьому змінюється лише вид функцій  $f_1$  і  $f_2$ , що входять до правих частин рівнянь (3.7). Без принципів змін, лише заміною функції (3.2), алгоритм придатний для будь-яких безінерційних моделей пружного шару. При заміні рівнянь руху оболонки (1.1) рівняннями типу Тимошенко зміниться порядок системи (3.1) та відповідно (3.7), проте хід розв'язку залишається таким самим, як і описаний у цій статті.

**Висновки.** У представленій роботі вперше побудовано математичну модель нестационарної поведінки оболонки із зовнішнім шаром під дією рухомого навантаження. Проведено порівняльний аналіз різних моделей оболонки та побудовано картини деформації як для прискореного, так і для уповільненого руху. Отримано величини коефіцієнтів динамічного перевантаження та час встановлення процесу для різних швидкостей руху, що дозволить встановити межі застосування стаціонарних розв'язків. Отримана методика може бути використана при побудові як інженерних розрахунків складових конструкцій, так і для дослідження перехідних процесів у моделях, які базуються на більш точних рівняннях руху.

### Список використаних джерел

1. Махінко Н. О. Розрахунок тонкостінних циліндричних оболонок на асиметричне навантаження за моментною теорією / Н. О. Махінко // Збірник наукових праць УкрДУЗТ. – 2019. – Вип. 184. – С. 51-61.
2. Research on the dynamic response of pressurized cylindrical shell structures subjected to a near-field underwater explosion / W.-s. Mao, M.-s. Zhong, X.-b. Xie, H.-y. Ma, G.-l. Yang, L. Fan // AIP Advances 13, 025046. – 2023. – No. 2(64). – P. 68-71.
3. Deformation of cylindrical shell by external pressure / N. Fidrovskaya, E. Slepuzhnikov, I. Perevoznik, S. Khursenko // Sciences of Europe. – 2021. – No. 2(64). – P. 68-71.
4. Пожуєв А. В. Нестационарна реакція тришарової циліндричної оболонки, яка занурена у рідину / А. В. Пожуєв, О. М. Михайлуца // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2018. – № 1. – С. 119-123.
5. Пожуєв В. І. Нестационарна деформація циліндричної оболонки у пружному півпросторі з вільною поверхнею / В. І. Пожуєв, А. В. Пожуєв, А. В. Фасоляк // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2016. – № 1. – С. 119-126.
6. Антоненко Н. М. Плоска термпружна деформація багатошарової плити з пружними зв'язками між шарами / Н. М. Антоненко // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія: Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління. – 2018. – Вип. 39. – С. 4-13.



7. Pozhuev A. V. Action non-stationary load on a two-layer cylindrical shell with an elastic interlayer / A. V. Pozhuev, E. N. Mihaylutsa // *Journal of the Sevastopol National Technical University. Series: Mechanics, Power Engineering, Ecology.* – 2008. – Vol. 88. – P. 5-12.

8. Пожуев А. В. Нестационарна просторова деформація двошарової пластини скінчених розмірів з неідеальним зв'язком / А. В. Пожуев, О. М. Михайлуца // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні.* – 2011. – № 1. – С. 139-143.

9. Ободан Н. І. Визначення напружено-деформівного стану точок оболонки, спостережної на частині її поверхні / Н. І. Ободан, В. О. Громов // *Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій: зб. наук. праць.* – 2012. – № 18. – С. 140-147.

10. Воропай О. Дві обернені нестационарні задачі осесиметричного деформування пружної циліндричної оболонки скінченної довжини / О. Воропай, С. Поваляєв, А. Шарапата // *Автомобільний транспорт.* – 2022. – № 51. – С. 74-84.

11. Українець В. Н. Динамика трехслойной оболочки в упругом полупространстве под воздействием подвижной нагрузки / В. Н. Українець, С. Р. Гирнис // *Наука и техника Казахстана.* – 2020. – № 1. – С. 7-20.

### References

1. Makhinko, N.A. (2019). Rozrakhunok tonkostinnykh tsylindrychnykh obolonok na asymetrychne navantazhennia za momentnoiu teoriieiu [Calculation of thin-walled cylindrical shells for an asymmetric load according to the moment theory]. *Zbirnyk naukovykh prats UkrDUZT – Collection of scientific works of UkrGUZT*, (184), 51-61.

2. Mao, W.S, Zhong, M. S., Xie, X.B., Ma, H.Y., Yang, G.L, & Fan., L. (2023). Research on the dynamic response of pressurized cylindrical shell structures subjected to a near-field underwater explosion. *AIP Advances*, 2(64), 68–71.

3. Fidrovskaya, N., Slepuzhnikov, E., Perevoznik, I., & Khursenko, S. (2021). Deformation of cylindrical shell by external pressure. *Sciences of Europe*, 2(64), 68–71.

4. Pozhuyev, A.V., & Mikhaylutsa, O.M. (2018). Nestatsionarna reaktsiia trysharovoi tsylindrychnoi obolonky, yaka zanurena u ridynu [Non-stationary reaction of a three-layer cylindrical shell immersed in a liquid]. *Novi materialy i tekhnologii v metalurhii ta mashynobuduvanni – New materials and technologies in metallurgy and mechanical engineering: scientific and technical journal*, (1), 119–123.

5. Pozhuyev, V.I., Pozhuyev, A.V., & Fasolyak, A.V. (2016). Nestatsionarna deformatsiia tsylindrychnoi obolonky u pruzhnomu pivprostori z vilnoiu poverkhneiu [Unsteady deformation of a cylindrical shell in an elastic half-space with a free surface]. *Novi materialy i tekhnologii v metalurhii ta mashynobuduvanni – New materials and technologies in metallurgy and mechanical engineering: scientific and technical journal*, (1), 119–126.

6. Antonenko, N.M. (2018). Ploska termopruzha deformatsiia bahatosharovoi plyty z pruzhnyy zviyazkamy mizh sharamy [Plane thermoelastic deformation of a multilayer plate with elastic bonds between layers]. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho universytetu imeni V. N. Karazina. Seriya: Matematychno modeliuвання. Informatsiini tekhnologii. Avtomatyzovani systemy upravlinnia – Bulletin of V. N. Karazin Kharkiv National University. Ser. Math modeling. Information Technology. Automated control system*, (39), 4–13.

7. Pozhuyev, A.V., & Mikhaylutsa, O.M. (2008). Action non-stationary load on a two-layer cylindrical shell with an elastic interlayer. *Journal of the Sevastopol National Technical University. Series: Mechanics, Power Engineering, Ecology*, (88), 5–12.

8. Pozhuyev, A.V., & Mikhaylutsa, O.M. (2011). Nestatsionarna prostoroova deformatsiia dvoшarovoi plastyny skinchenykh rozmiriv z neidealnym zviyazkom [Non-stationary spatial deformation of a two-layer plate of finite dimensions with a non-ideal bond]. *Novi materialy i tekhnologii v metalurhii ta mashynobuduvanni – New materials and technologies in metallurgy and mechanical engineering: a scientific and technical journal*, (1), 139–143.

9. Obodan, N.I., & Gromov, V.O. (2012). Vyznachennia napruzhenno-deformivnoho stanu tochk obolonky, sposterezhoi na chastyni yii poverkhni [Determination of the stress-strain state of the shell points observed on part of its surface]. *Problemy obchysluvalnoi mekhaniky i mitsnosti konstruksii – Problems of Computational Mechanics and Structural Strength: Sat. scientific wash*, (18), 140–147.

10. Voropay, O., Povalyaev, S., & Sharapata, A. (2022). Dvi obrnenni nestatsionarni zadachi osesymetrychnoho deformuvannya pruzhnoi tsylindrychnoi obolonky skinchennoi dovezhyzny [Two inverse non-stationary problems of axisymmetric deformation of an elastic cylindrical shell of finite length]. *Avtomobilnyi transport – Automobile transport*, (51), 74–84.

11. Ukrainets, V.N., & Girmis, S.R. (2020). Dynamyka trekhsloinoi obolochky v uprugom polupros-transtve pod vozdeistvyem podvyzhnoi nahruzky [Dynamics of a three-layer shell in an elastic half-space under the influence of a moving load]. *Nauka y tekhnika Kazakhstana – Science and technology of Kazakhstan*, (1), 7-20.

Отримано 24.04.23

UDC 539.3

**Oleksiy Manzhos<sup>1</sup>, Andriy Pozhuyev<sup>2</sup>, Olena Mikhailutsa<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Graduate student of the Department of Fundamental and Applied Mathematics  
Zaporizhzhia National University (Zaporizhia, Ukraine)

E-mail: [ojiekca1996@gmail.com](mailto:ojiekca1996@gmail.com)

<sup>2</sup>PhD in Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Fundamental and Applied Mathematics  
Zaporizhzhia National University (Zaporizhia, Ukraine)

E-mail: [scorpio6828@gmail.com](mailto:scorpio6828@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4083-5139>

ResearcherID: [AAE-6507-2019](https://orcid.org/AAE-6507-2019). Scopus Author ID: [6506407054](https://orcid.org/6506407054)

<sup>3</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electronics, Information Systems and Software  
Zaporizhzhia National University (Zaporizhia, Ukraine)

E-mail: [elenamikhaylutsa7@gmail.com](mailto:elenamikhaylutsa7@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2935-7997>.

ResearcherID: [AAФ-4942-2019](https://orcid.org/AAФ-4942-2019). Scopus Author ID: [16407827200](https://orcid.org/16407827200)

## NON-STATIONARY REACTION OF A CYLINDRICAL SHELL WITH A SPRING LAYER TO THE ACTION OF A MOVED RADIAL LOAD

*An analysis of studies and publications on the issues of determining the stress-strain state of constituent structures has shown that the problems of choosing and modeling the operation of structures in the form of infinitely long cylindrical shells with a soft, weightless elastic layer have not received enough attention in the scientific literature today. The use of modern approaches to the construction of mathematical models and algorithms makes it possible to take into account various kinds of dynamic loads that are transferred to structural elements in the form of cylindrical shells.*

*The aim of the article is to develop an analytical method for calculating cylindrical shells with a weightless soft elastic layer under the action of a moving radial load.*

*Based on the principles and approaches to the analysis of non-stationary dynamic processes in complex shells, the paper presents an algorithm based on the application of the integral Fourier transform along the axial coordinate, as well as the use of the Runge-Kutta numerical method for integrating the transformed differential equations of shell motion in the image space. Cases of load movement with different speeds and uniform pressure wave movement are considered. The dependence of the radial displacements of the shell on the reaction of the elastic layer, represented by an approximate model, taking into account only the radial displacement, is determined. The cases of motion of a radial axisymmetric load both with constant and with varying speed are investigated. The distribution of shell deflections along the length is given for different moments of time during the movement of the load at a constant speed, as well as for the slow movement of the ring load.*

*In this work, for the first time, a mathematical model of the non-stationary behavior of a shell with an outer layer under the action of a moving load is constructed. A comparative analysis of various shell models has been carried out and deformation patterns of both accelerated and slow motion have been constructed. The transient processes that occur at the moment of load application and the subsequent time intervals immediately after this moment are considered. The presented materials can be used for dynamic modeling of the operation of structures in the form of plates and shells.*

**Keywords:** non-stationary reaction; cylindrical shell; transitional processes; integral Fourier transform.

Fig.: 3. References: 11.

**Ігор Петренко<sup>1</sup>, Максим Болотов<sup>2</sup>, Тімур Ганєєв<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>аспірант

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: [igor.petrenko0511@gmail.com](mailto:igor.petrenko0511@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-2103-4324>. ResearcherID: [IQV-2134-2023](https://orcid.org/0009-0006-2103-4324)

<sup>2</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій зварювання та будівництва

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: [Bolotovmg@gmail.com](mailto:Bolotovmg@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0915-4132>. ResearcherID: [H-4183-2014](https://orcid.org/0000-0002-0915-4132)

<sup>3</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій зварювання та будівництва

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: [gatavltim@ukr.net](mailto:gatavltim@ukr.net). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6037-5494>. ResearcherID: [G-5191-2014](https://orcid.org/0000-0001-6037-5494)

## КОМПАРАТИВНИЙ АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА В ГАЛУЗІ МАШИНОБУДУВАННЯ

*Технології адитивного виробництва існує понад 30 різновидів і кожного року їх стає дедалі більше, які також патентуються, стають новими, по-різному називаються, але всі вони так чи інакше мають відношення до якогось конкретного типу технологій адитивного виробництва або комбінації типів. Ця стаття містить компаративний аналіз основних технологій адитивного виробництва, опис унікальності використання кожного типу технологій, застосування технологій, їх переваги, недоліки та можливість реалізації у машинобудуванні. У роботі наведено систематизацію даних, приведення вищеперахованих показників у табличний вигляд, стан технологій адитивного виробництва та перспективи розвитку в галузі машинобудування.*

**Ключові слова:** 3D-друк; адитивне виробництво; галузеве машинобудування; Binder Jetting; Directed Energy Deposition; Material Extrusion; Material Jetting; Powder Bed Fusion; Sheet Lamination; Vat Photopolymerization.

Рис.: 15. Табл.: 2. Бібл.: 75.

**Актуальність теми дослідження.** Темпи розвитку виробничих галузей вимагають сучасних технологій виробництва, які можливо реалізувати з мінімальними витратами часу та інвестицій з отриманням якісного робочого вихідного продукту. Цим вимогам відповідають адитивні технології, які знаходять дедалі більше застосування в усіх сферах життєдіяльності людини і є одним із найбільш перспективних напрямів промислового виробництва [1]. Остання промислова революція, Industry 4.0, заохочує інтеграцію інтелектуальних виробничих систем і передових інформаційних технологій. Адитивне виробництво (АВ) вважається важливою частиною цього нового руху. В еру використання сучасних виробничих навичок у контексті інтеграції нових інформаційних технологій відіграє важливу роль для економічної конкурентоспроможності [2]. Дослідження адитивних технологій у галузевому машинобудуванні (ГМ) має великий потенціал для розвитку й покращення якості виготовлення деталей і компонентів. Однією з головних переваг адитивного виробництва є можливість виготовлення складних форм, які дуже складно або неможливо отримати за допомогою традиційних методів виробництва.

**Постановка проблеми.** Зростаючі вимоги до якості та складності виробів у галузі машинобудування потребують швидкого та ефективного вирішення завдань щодо організації виробництва. У цьому контексті адитивні технології можуть бути ефективним рішенням, оскільки вони дозволяють створювати складні вироби з високою точністю та якістю, знижуючи при цьому час та витрати на виробництво. Існує близько 30 різноманітних технологій АВ і кожного року їх кількість зростає, проте досліджень, присвячених систематизації даних та аналізу практичного застосування АВ, досить мало. Для вирішення цієї проблеми необхідно провести літературний аналіз та систематизувати дані про технології адитивного виробництва в галузі машинобудування, зокрема порівняти їхню вартість, якість, продуктивність і можливості застосування, щоб визначити найбільш ефективні та перспективні види технологій для вирішення завдань галузей машинобудування.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Тема адитивних технологій активно досліджується як закордонними, так і вітчизняними авторами, їхні роботи присвячені аналізу технологій АВ, параметрам друку, міцнісним характеристикам матеріалів, значущості АВ у четвертій промисловій революції.

Наприклад, у дослідженні [3] Sanjay Shrestha та Guha Manogharan аналізується вплив різних технологічних параметрів технології Binder Jetting на механічні властивості спечених металевих деталей АВ та вплив вибраних параметрів процесу на характеристики TRS спечених зразків SS 316L вивчається за допомогою стандартного методу випробування ASTM. Однак автор не акцентує увагу лише на поведінці матеріалу, що робить опис зосередженим на конкретному аспекті технології, забуваючи про її базові особливості.

Beth E. Carroll, Todd A. Palmera та Allison M. Beese у роботі [4] дослідили анізотропні механічні властивості тривимірному хрестоподібного компонента Ti-6Al-4V, виготовленого за допомогою процесу АВ спрямованого енергетичного осадження (CEO). Досліджено механічні властивості компонента в поздовжній і поперечній орієнтаціях щодо шарів побудови при одновісному розтягу. У процесі дослідження авторами виявлено покращені фізико-механічні властивості компоненту з матеріалу Ti-6Al-4V створеного методом CEO у порівнянні з альтернативними методами. Представлені результати показують достатній рівень міцності матеріалу.

Останні досягнення, а також основні аспекти, що регулюють взаємодію лазерного випромінювання з матеріалом під час процесу DED, термічну поведінку ванни розплаву, передовий моніторинг на місці та механізми взаємодії розглядаються у роботі [5]. Також визначено та обговорено найбільш критичні змінні параметри обробки та їхній вплив на властивості нанесеного матеріалу, а також механізми утворення дефектів і методи визначення характеристик. Представлено огляд програм високого класу, поточні проблеми, пов'язані з використанням DED, і критичний погляд на технологію. Не висвітлено переваги та галузі застосування даної технології.

З матеріалів представлених у роботі [6] можна виділити таке: дослідження та розробка гібридних машин, вивчення та розробка нових матеріалів. Стаття являє собою огляд останніх тенденцій в адитивному виробництві.

У дослідженні [7] описано, як АВ підтримує потребу в інструментах нового покоління, проходячи перевірку якості, моніторинг, контроль та оптимізацію процесів за допомогою великого потоку даних. Автори окреслили нові цікаві напрямки для досліджень, пов'язуючи нові виклики передового виробництва з деякими поточними тенденціями в статистичній інженерії якості. Проте у статті відсутня конкретика щодо застосування до конкретного виду промисловості, лише поверхнево наводить спроможності використання АВ.

Роботи [8; 9] присвячені огляду полімерних композитів, застосуванню в науці та інженерії. Опису тенденцій технологій фотополімеризації, огляду методів кубової полімеризації, їх унікальне застосування в галузі доставки ліків і виготовлення медичних пристроїв, прикладам матеріалів і перевагам, які вони надають у сфері охорони здоров'я присвячені роботи [10; 11].

**Виділення недосліджених частин.** У більшості з розглянутих робіт по технології АВ основна увага приділяється особливостям використання сировини, оптимізації процесів та фізико-механічним характеристикам виробів, що породжує нерозуміння використання певних видів технологій для конкретних технологічних задач. Більше того, наявна література з цього приводу або надто розрізнена, що ускладнює її вивчення для професіоналів, або обмежена лише фундаментальними концепціями. На сьогодні відсутня достатня кількість досліджень присвячених порівняльному аналізу технологій АВ та висвітленню проблематики застосування їх у галузі машинобудування.

**Мета** цієї роботи полягає в зібранні та систематизації інформації з різних літературних джерел про використання сучасних технологій автоматизованого виробництва в галузі машинобудування. Основна увага приділяється визначенню найбільш перспективних технологій та їх аналізу з техніко-економічного погляду. Мета полягає в з'ясуванні, які технології найбільш ефективні для вирішення завдань, пов'язаних із машинобудуванням, з огляду на показники ефективності та рентабельності.

**Виклад основного матеріалу.** Відмітивши актуальність цього огляду та визначившись з метою дослідження, розглянемо широкоживані типи адитивних технологій і проведемо аналіз щодо доцільності їх використання в галузі машинобудування.

Типи технологій адитивного виробництва: принцип роботи, перспективи застосування.

Найбільш поширеними видами технологій адитивного виробництва є:

- 1) Струменеве нанесення в'язучого/ Binder Jetting (BJ);
- 2) Пряме підведення енергії та матеріалу/ Directed Energy Deposition (DED);
- 3) Екструзія матеріалів/ Material Extrusion (ME);
- 4) Струменеве нанесення матеріалу/Material Jetting (MJ);
- 5) Синтез на підкладці/ Powder Bed Fusion (PBF);
- 6) Листова ламінація/ Sheet Lamination (SL);
- 7) Фотополімеризація у ванні/ Vat Photopolymerization (VP).

Провівши аналіз досліджень у напрямку впровадження виготовлених деталей за допомогою АВ у галузі машинобудування, розглянемо перспективи застосування кожного з видів.

**Перший вид** технології адитивного виробництва це Binder Jetting (BJ). Метод схожий на роботу звичайного офісного принтера, але замість нанесення чорнила на папір, тривимірний принтер за технологією BJ наносить клей, так звану в'язучу речовину в порошок, таким чином формуючи модель. Висота шару при друці за даною технологією 50-200 мкм.

Принцип роботи принтеру за технологією BJ (рис. 1) можна розділити на такі стадії:

1. Переміщення головки друку над платформою.
2. Розподілення крапель в'язучої речовини по шару матеріалу.
3. Переміщення платформи вниз на задану висоту шару.
4. Нанесення нового шару порошку над попереднім.

Стадії 1-4 повторюються послідовно до завершення формування всіх шарів.

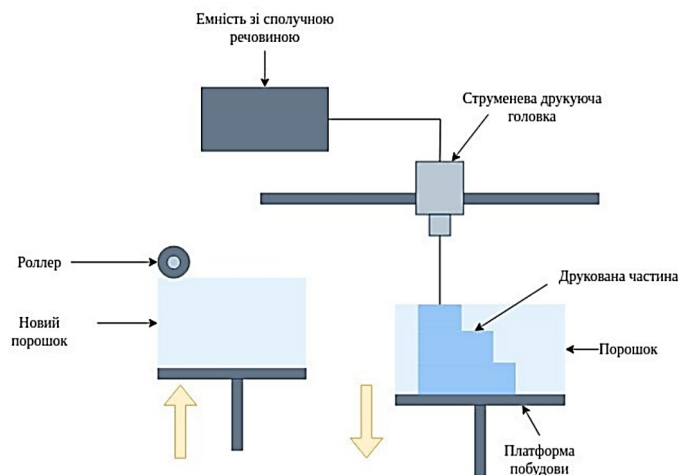


Рис. 1. Принцип роботи принтеру за технологією BJ

Джерело: розроблено авторами.

Серед інших технологій АВ, BJ відрізняється високою роздільною здатністю та можливістю друку однієї деталі різними матеріалами [12]. Як витратну сировину використовують: алюміній, бронзу, кераміку, гіпс, пісок, інконель та нержавіючу сталь [13]. Технологія дозволяє створювати об'єкти швидше ніж більшість інших процесів АВ, в залежності від типу принтера 1100-3120 см<sup>3</sup>/год, у повній кольоровій гаммі за рахунок додавання барвнику до в'язучої речовини [14].

Найчастіше для покращення механічних властивостей деталі до в'язучої речовини додають ущільнювачі, такі як цианокрілатний клей при використанні кераміки або бронзи. Друк на керамічній основі ідеально підходить для створення архітектурних моделей, форм для лиття у піщану форму, сувенірів або прикрас. Металеві деталі можуть бути використані як функціональні компоненти, вони мають нижчу вартість ніж ті що виготовлені за технологією SLM або DMSL але і їх механічні властивості гірше [2].

Широко досліджено виготовлення за допомогою ВJ провідних доріжок плат керування [15; 16], досліджували виробництво, за допомогою ВJ, світловипромінюючих речовин [17; 18] та електрично активних пристроїв [19; 20; 21].

Вартість принтерів за технологією ВJ сягає від 5 тис. до 1,8 млн дол. США.

**Другий вид** технологій адитивного виробництва це Directed Energy Deposition (DED). Технологія має багато спільних рис з технологією де використовується екструзія пластикових матеріалів (FDM), але замість полімеру використовується метал [22].

Принцип роботи принтеру за технологією DED можна розділити на такі стадії:

1. Вихідний металевий матеріал у вигляді порошку або дроту безперервно подається через сопло де відбувається розплавлення матеріалу лазером, електронним променем або дугою. У місці осадження він охолоджується та твердіє.

2. Триосьова машина друкує форму поперечного перерізу відбитка вздовж осей X та Y, накладаючи перерізи один на одного вздовж осі Z для створення об'ємної деталі.

П'ятиосьові DED принтери не обмежені пошаровим нарощуванням деталі, оскільки вони можуть наносити матеріал під будь-яким кутом. Такі принтери можуть використовуватись навіть більше ніж просто машини для створення виробів з нуля, вони також застосовуються для ремонту інших наявних металевих виробів, оскільки мають можливість наносити матеріал безпосередньо на них, за рахунок чого відбувається відновлення вихідної геометрії, зробити нарощування, якого раніше не було [4]. Технологію Directed Energy Deposition інколи називають Directed Metal Deposition, причиною являється те, що фактично це те ж саме, адже DMD (Directed Metal Deposition) це технологія осадження металів.

З технологію прямого підведення енергії та матеріалу можна виділити два основні типи технологій:

- Laser Engineered Net Shape (LENS Building) – плавлення шляхом створення форми лазером;
- Electron Beam Additive Manufacture (EBAM) – електронно-променеве адитивне виробництво.

В LENS Building використовується головка осадження, яка складається з лазерної головки, сопел для дозування порошку і трубок з інертним газом.

Принцип роботи принтеру за технологією LENS (рис. 2) можна поділити на такі стадії:

- 1) лазер проходить через центр головки створюючи басейн розплаву;
- 2) у місці побудови виробу з боків відбувається розпилення порошку, де він розплавляється після чого твердне;
- 3) інертний газ утворює покриття, яке не містить кисню і вологи, що запобігає окисленню поверхні та сприяє покращеній адгезії шарів.

Стадії 1-3 повторюються послідовно до завершення формування всіх шарів.

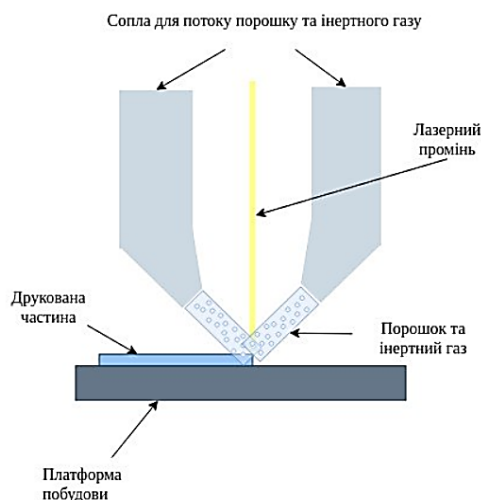


Рис. 2. Принцип роботи принтеру за технологією LENS Building

Джерело: розроблено авторами.

У принтері працюючому за технологією EBAM (рис. 3) металевий зварювальний дріт подається через сопло й розплавляється електронним променем у місці контакту із зоною збірки.

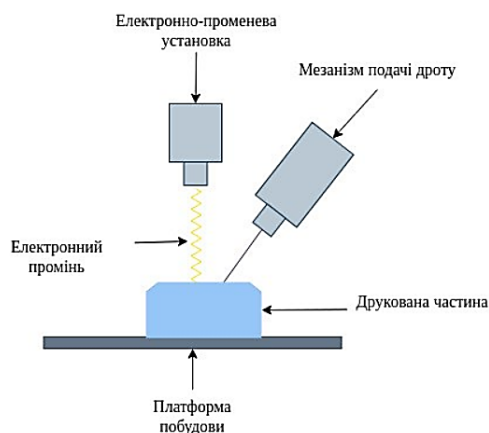


Рис. 3. Принцип роботи принтеру за технологією EBAM

Джерело: розроблено авторами.

Технологія LENS може друкувати як на поверхні металів, так і на кераміці, кераміка є більш поширеним матеріалом. Матеріали, які можна використовувати для технологій LENS та EBAM, містять практично будь-які метали та сплави, що зварюються, такі як алюміній, сталь, титан, інконель, тантал, вольфрам, нікель та ніобій.

Недоліки DED технології.

- Supporting structures – конструкції, що використовуються для підтримання нависаючих частин (кут понад  $75^\circ$ ). Використання конструкцій можливе, але складне, оскільки великий басейн рідкого розплаву в точні осадження не дозволяє робити випирання і ця ж властивість означає, що складні геометричні форми також неможливі;

- низька роздільна здатність у порівнянні з іншими 3D-принтерами, які використовують технології друку металами, висота шару становить 250-5000 мкм;

- розмір частинок порошку становить від 50 до 150 мікрон, а дріт для зварювання варіюється від 1 до 3 міліметрів у діаметрі.

- гострі кути можуть бути отримані лише у процесі постобробки, зазвичай на фрезерному станку ЧПУ;

- мають погану якість поверхні, що потребує вторинної обробки.

Велика кількість енергії, яка необхідна для підтримання температури розплаву в точці осадження, викликає великі теплові градієнти, що можуть викликати велику залишкову напругу, але DED виробляє повністю щільні деталі з механічними властивостями, які не поступаються кованим металевим виробам.

Одним із найважливіших секторів, у якому процес DED активно використовується для виробництва, є аерокосмічний сектор. Основною причиною, яка спонукає до використання процесу DED у цьому секторі, є можливість виробляти компоненти великих розмірів, на які у процесі традиційного виробництва витрачається дуже велика кількість енергії та сировини, при цьому швидкість нарощування матеріалу сягає 3-11 кг/год або  $430-1570 \text{ см}^3/\text{год}$  [23; 24]. У 2003 році Північно-Західний політехнічний університет виготовив центральний лонжерон крила для пасажирського літака Comac C313, центральний лонжерон крила має довжину 5 м [25].

Вартість принтерів за технологією DED сягає від 200 тис. до 5 млн дол. США.

**Третій вид** технологій адитивного виробництва – це Material Extrusion (ME). Технологія є однією з найпоширеніших систем 3DP, яка широко розглядалася більшістю дослідників в усьому світі. Статистичні дані наведені в Parandoush і Lin [26] підкреслили, що комерційні системи FDM (Fused Deposition Modeling) займали 41,5 % частки ринку, із

загальною кількістю проданих 15 000 машин до кінця 2010 року. Однак сьогодні майже неможливо порахувати продажі систем FDM, оскільки після краху патенту на технологію, який раніше належав Stratasys Inc., різні фірми почали виробництво економічно ефективних принтерів. FDM дотримується принципу екструзії, як обговорювалося в безлічі публікацій [27-31]. Крім того, залежно від обладнання принтери мають продуктивність 720-4680 см<sup>3</sup>/год [32] і процесу параметри [33; 34; 35] виділені іншими.

МЕ має високу спорідненість з DED технологією, МЕ обмежена використанням лише синтетичних та штучних полімерів [36].

Принцип роботи принтеру за технологією типу FDM (Fused Deposition Modeling) або моделювання пошаровим наплавленням (рис. 4) можна розділити на такі стадії:

1. Розплав філаменту та його проштовхування через розігріте сопло.
2. Переміщення головки друку відповідно до траєкторії.
3. Охолодження він твердіння укладеного матеріалу.
4. Утворення готового шару деталі.

Стадії 1-4 повторюються послідовно до завершення формування всіх шарів.

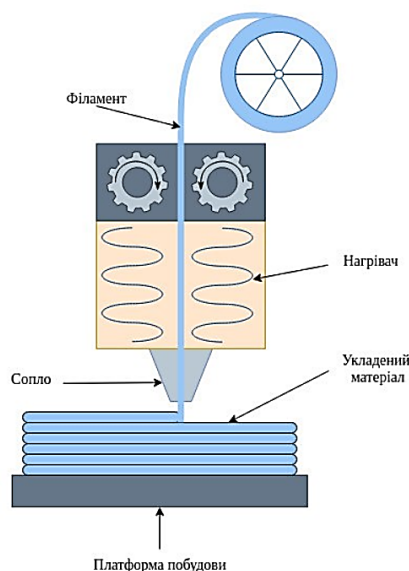


Рис. 4. Принцип роботи принтеру за технологією FDM

Джерело: розроблено авторами.

Матеріалів, які використовуються для FDM друку, велика кількість. Це і класичні ABS (Акрилонітрилбутадієнстирол), PLA (Полілактид), PET-G (Поліетилентерефлататгліколь), PP (Поліпропілен), PC (Полікарбонат), та композитні (армовані) матеріали. Композити можуть бути армовані вуглецевими волокнами, скловолокнами або базальтовими волокнами. Це збільшує їхню міцність на розрив, стиск, згин, сколювання та надає матеріалам нові фізико-механічні властивості. Також існують композити з включенням металевого порошку, не так багато виробників, які випускають такого роду матеріали [37].

Крім технології типу FDM, до виду технології адитивного виробництва Material Extrusion належить і технологія друку типу FGF (Fused Granulate Fabrication), або побудова розплавленням гранул, адитивне виробництво зі шнековою екструзією для швидкого виробництва великогабаритних виробів з використанням гранульованих термопластиків (рис. 5).



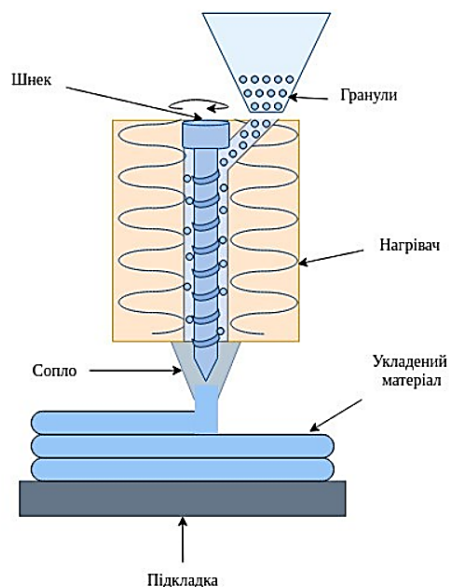


Рис. 5. Принцип роботи принтера за технологією FGF

Джерело: розроблено авторами.

Ця технологія як сировина використовує найперший початковий матеріал пластикового виробництва – гранули, значно зменшуючи витрати часу на виробництво. Робота з гранулами достатньо складна і поки ще не забезпечує тієї якості та контролю за процесом, які забезпечують принтери технології FDM. Найбільш значимою перевагою технології FGF є велика швидкість виробництва компонентів до  $4380 \text{ см}^3/\text{год}$ . У порівнянні з технологією FDM – до  $1600 \text{ см}^3/\text{год}$ .

Вартість принтерів за технологією ME сягає від 0,2 тис. до 400 тис. дол. США.

**Четвертий вид** технологій адитивного виробництва – це Material Jetting (MJ). Подібно струменевому друку на в'язучому при струменевому друку – на поверхню наноситься шар матеріалу і створюється об'єкт.

Однак замість того, щоб наносити клей на шар порошку, MJ використовує воскоподібні матеріали, розплавляє їх і точково каплями наносить на поверхню друку і по мірі нарощування шарів об'єкт набуває своєї заданої форми [7]. MJ принтер друкує модель шар за шаром, наносячи фотополімери із сотень дрібних сопел головки друку, кількість сопел варується від 96 до 448. Продуктивність технології в залежності від принтеру  $900\text{-}2530 \text{ см}^3/\text{год}$  [38]. MJ принтери наносять на платформу весь шар одразу, його висота становить 16-32 мкм. Коли краплі матеріалу опиняються на платформі, вони обробляються ультрафіолетовим світлом і шар твердне (рис. 6). Усі опори моделі можна друкувати одночасно із самою моделлю, використовуючи при цьому розчинний матеріал. Коли виріб готовий, опори легко можна видалити за допомогою води під тиском або зануливши виріб в ультразвукову ванну [39].

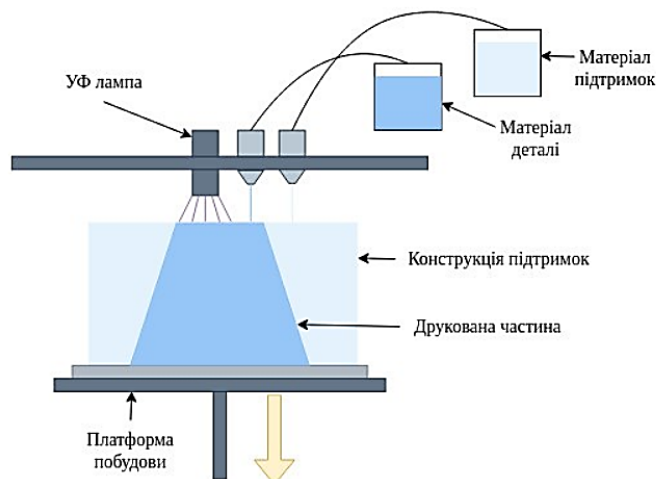


Рис. 6. Принцип роботи принтера за технологією MJ

Джерело: розроблено авторами.

У цій технології використовуються різні за властивостями матеріали: жорсткі, тверді, прозорі, різнокольорові фотополімери.

Ще один тип технології, який відноситься до струменевого друку є NPG (Nano Particle Jetting) або струменевий друк наночастинками. У струменевому друці наночастинками використовується рідина, яка містить у собі наночастинки металів, які оператор завантажує в принтер у вигляді картриджу. Сопла принтера розподіляють рідину по платформі струменем або невеликими краплями, у той час коли висока температура всередині корпусу призводить до випаровування рідини, після чого на платформі залишається лише шар з металу (рис. 7).

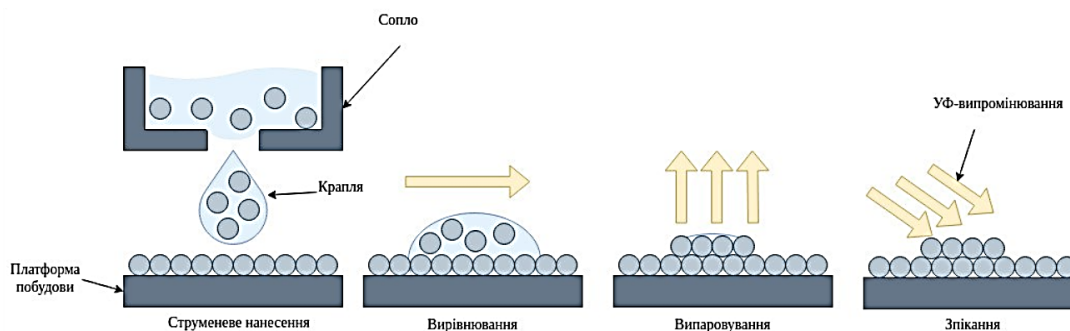


Рис. 7. Принцип роботи принтера за технологією NPG

Джерело: розроблено авторами.

Як матеріал використовується нержавіюча сталь і кераміка [40].

Третій тип технології, який належить до струменевого друку, – це DOD (Drop-On-Demand) або наплавлення з вирівнюванням шару летючим різцем.

У DOD принтерів є дві друкуючі головки. Перша розподіляє воскоподібний матеріал на платформі, а друга створює опори з розчинного матеріалу. Подібно до FDM та SLA принтерам, DOD слідують попередньо заданій траєкторії і розподіляють матеріал точково [41]. У принтерах DOD використовується різець для вирівнювання кожного шару, для покращення якості друківаних деталей необхідно створювати рівну поверхню перед друком наступного шару (рис. 8).

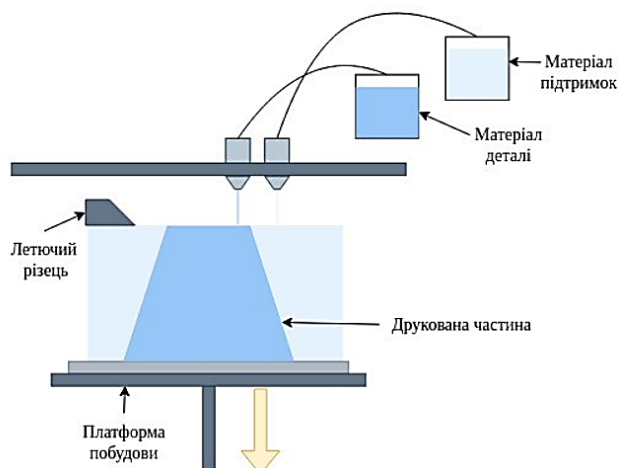


Рис. 8. Принцип роботи принтеру за технологією DOD

Джерело: розроблено авторами.

Вартість принтерів за технологією MJ сягає від 20 тис. до 600 тис. дол. США.

**П'ятий вид** технологій адитивного виробництва – це Powder Bed Fusion (PBF) або синтез на підкладці. Друк відбувається за допомогою термічної обробки порошкоподібного матеріалу [42].

Під тепловим впливом порошок шар за шаром твердне, спікається тим самим утворюється модель. Методи PBF відрізняються між собою різноманітними джерелами енергії та типами порошків, які використовуються. Більшість PBF принтерів обладнані механізмом для розгладжування тонкого шару порошку, товщиною 30-120 мкм. Швидкість друку невелика в порівнянні з іншими технологіями і становить 30-400 см<sup>3</sup>/год [43].

Після друку деталей, яка затвердла дістається, а порошок, який залишився, можна використовувати вторинно.

Технологія типу SLS (Selective Laser Sintering) або селективного (вибіркового) лазерного спікання дозволяє створювати міцні пластикові деталі за допомогою спікання тонких шарів порошку лазером шар за шаром [44]. Як витратний матеріал використовують полімери та кераміку.

Принцип роботи принтеру за технологією SLS (рис. 9) можна розділити на такі стадії:

1. Нанесення на платформу першого шару матеріалу.
2. Спікання порошку лазером згідно до геометрії моделі.
3. Опускання платформи на товщину шару.
4. Нанесення нового шар матеріалу.

Стадії 1-4 повторюються послідовно до завершення формування всіх шарів. Після чого готову деталь дістають із робочої області, очищують і за потреби піддають вторинній обробці.

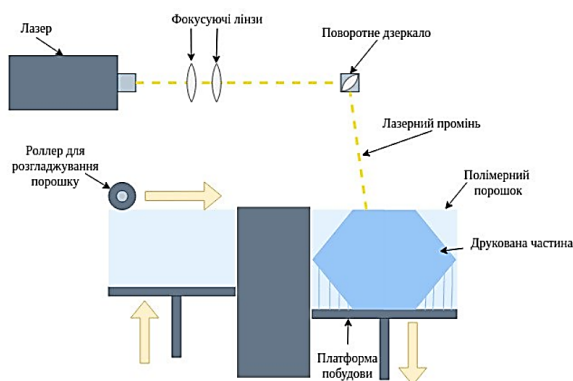


Рис. 9. Принцип роботи принтера за технологією SLS

Джерело: розроблено авторами

Технологія типу MJF (Multi Jet Fusion) або мультиструменева плавка – це, по суті, комбінація технологій SLS та MJ [45].

Принцип роботи принтера за технологією MJF (рис. 10) можна поділити на такі стадії:

1. Головка друку із соплами аналогічними соплам 2D-принтера розповсюджує речовину на тонкий шар порошкоподібного пластику, який засипаний у спеціальну ємність.

2) По межах шару моделі сопла друкують речовиною, яка запобігає процес спікання, оскільки створюється контур шару.

3) Потужне джерело інфрачервоного випромінювання проходить над ємністю з порошком і спікає зони вкриті речовиною.

4) Опускання платформи на товщину шару.

5) Нанесення нового шару матеріалу.

Стадії 1-5 повторюються послідовно до завершення формування всіх шарів.

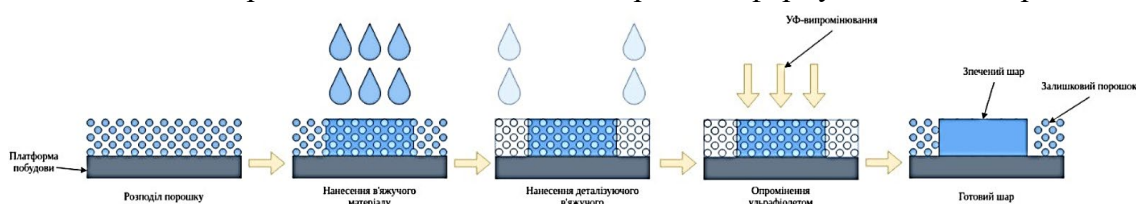


Рис. 10. Принцип роботи принтера за технологією MJF

Джерело: розроблено авторами.

Технологія типу SLM/DMLS (Selective Laser Melting/Direct Metal Laser Sintering) або селективної (вибіркової) лазерної плавки, або прямого лазерного спікання металів працює за таким самим принципом, що і SLS принтери тільки з металевого порошку (рис. 11). SLM передбачає собою повну плавку порошку [46], у той час як DMLS розігріває порошок майже до температури плавлення і часточки порошку сплавляються через хімічну реакцію [47].

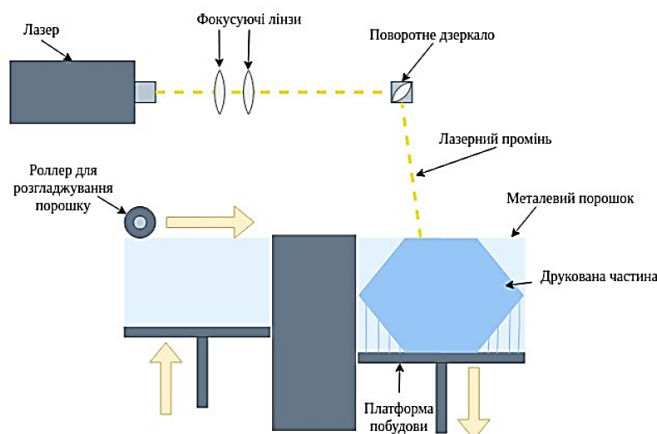


Рис. 11. Принцип роботи принтера за технологією SLM/DMLS

Джерело: розроблено авторами.

При DMLS друку використовуються нікелієві сплави, титан та ін. SLM принтери можуть працювати і з чистими металами, наприклад алюмінієм. SLM і DMLS моделі друкуються з опорами, щоб вилучити деформації роздрукованої деталі від залишкового механічного напруження.

Технологія типу EBM (Electron Beam Melting) або електронно-променева плавка. Принтери EBM використовуються для друку металевих об'єктів. Принцип роботи технології (рис. 12) можна поділити на такі стадії:

1. У робочу камеру засипається металевий порошок.

2. Принтер плавить порошок потужним електронним випромінювачем шар за шаром згідно поперечним перерізам цифрової моделі.

Стадії 1-2 повторюються послідовно до завершення формування всіх шарів.

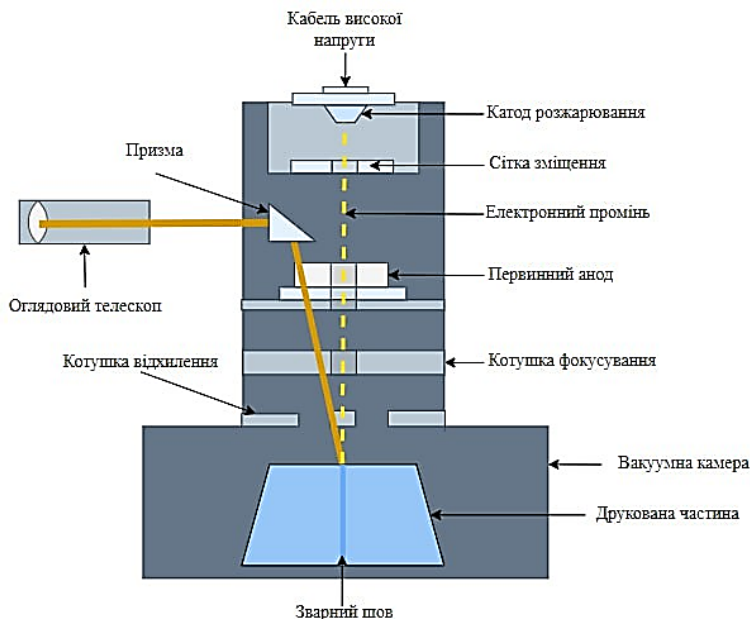


Рис. 12. Принцип роботи принтера за технологією EBM

Джерело: розроблено авторами.

Увесь процес відбувається у вакуумному середовищі. Електронно-променевий друк не вимагає побудови опорних конструкцій для моделі зважаючи на відсутність залишкового механічного напруження, який виникає в результаті градієнту температур між охолодженими та гарячими шарами [48]. Крім того, EBM використовує менше енергії і може виробляти шари швидше, ніж SLM/DMLS, але якість цих моделей гірша.

Вартість принтерів за технологією PBF сягає від 20 тис. до 2 млн. дол. США.

**Шостий вид** технологій адитивного виробництва – це Sheet Lamination (SL), або листовна ламінація. Ламінування листів відоме також як ультразвукове адитивне виробництво або виробництво ламінованих об'єктів.

Це процес адитивного виробництва при якому тонкі листи матеріалу, 70-200 мкм, укладаються стопкою і з'єднуються разом за допомогою ультразвукового зварювання, склеювання або пайки [9]. У міру укладання шарів об'єкт набуває форму. Коли всі шари укладені й ламіновані станок з ЧПУ або лазерний різак видаляє надлишковий матеріал, створюючи кінцеву форму об'єкта.

Технологія друку LOM (Laminated Object Manufacturing), друк об'єктів шляхом ламінування є досить тривалим, швидкість формування виробу становить 30-320 см<sup>3</sup>/год [49].

Принцип роботи принтера за технологією LOM (рис. 13) можна поділити на такі стадії:

1. На платформу або готові об'єкти розігрітим ролером наклеюється лист матеріалу.
2. Лазер вирізає об'єкт по контуру згідно з геометрією моделі.
3. Залишки матеріалу видаляються.
4. Платформа опускається і наступний лист клейкого матеріалу подається до робочої камери.

5. Платформа піднімається вгору і новий шар прилипає до попереднього.

Стадії 1-5 повторюються послідовно до завершення формування всіх шарів.

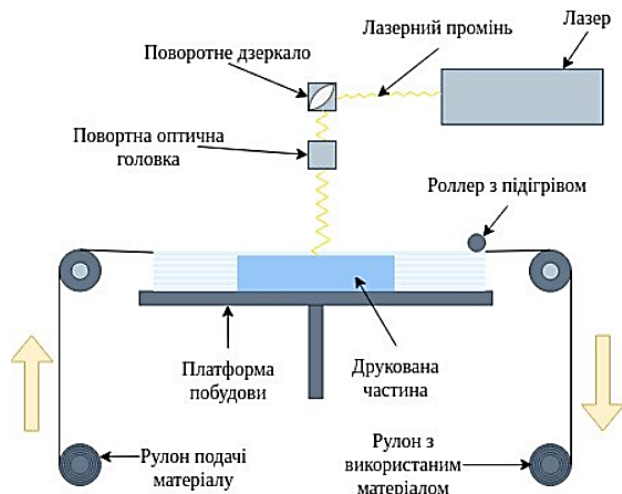


Рис. 13. Принцип роботи принтеру за технологією LOM

Джерело: розроблено авторами.

Вартість принтерів за технологією SL сягає від 9 тис. до 37 тис. дол. США.

**Сьомий вид** технологій адитивного виробництва це Vat Photopolymerization (VP) або фотополімеризація у ванні. У цьому типі технології фотополімерна смола твердне під впливом джерела світла з різною довжиною хвилі і весь цей процес носить назву фотополімеризація. Швидкість побудови за цією технологією становить 192-600 см<sup>3</sup>/год.

Технологія SLA (Stereolithography) або стереолітографія належить до виду адитивного виробництва VP [10].

Принцип роботи принтера за технологією SLA (рис. 14) можна поділити на такі стадії:

1. Платформа, на якій тримається майбутня модель, занурюється у резервуар з рідкою фотополімерною смолою.
2. Один або декілька точкових лазерів, які розташовані всередині принтера, починають засвічувати знизу ті зони, які згідно з тривимірною цифровою моделлю повинні тверднути для створення шару деталі.
3. Формування першого шару об'єкта.
4. Підняття платформи на відстань рівну товщині шару.

Стадії 1-4 повторюються послідовно до завершення формування всіх шарів. Після чого роздрукована деталь промивається і здебільшого піддається додатковому ультрафіолетовому опроміненню поза межами принтера для завершення процесу фотополімеризації і збільшення міцності об'єкта.

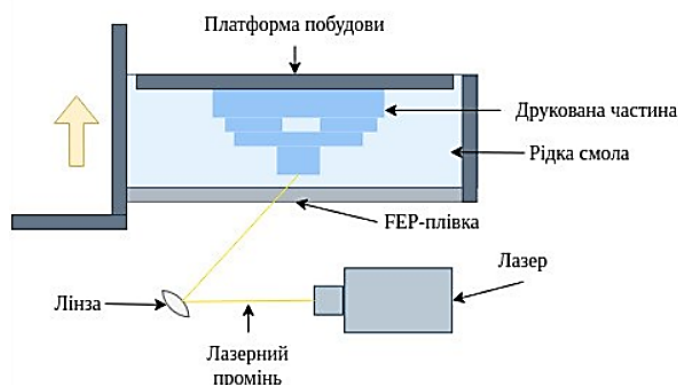


Рис. 14. Принцип роботи принтера за технологією SLA

Джерело: розроблено авторами.

Деталі роздруковані SLA у своїй більшості вимагають наявності опор для нависаючих елементів моделі, які додаються до цифрової моделі перед друком, після чого видаляються вручну по завершенню постобробки виробу ультрафіолетовим випроміненням [50].

Альтернативною і більш дешевою технологією є технологія DLP (Direct Light Processing) або цифрова світлодіодна проекція [11]. Технологія друку DLP дуже схожа на SLA, різниця у тому, що замість дорогих точкових лазерів у DLP принтерах використовують цифрову світлодіодну проекцію для опромінення всього шару [51].

Принцип роботи принтера за технологією DLP (рис. 15) можна поділити на такі стадії:

1. Платформа, на якій тримається майбутня модель, занурюється у резервуар з рідкою фотополімерною смолою.
2. Цифровий проектор передає проекцію зображення цілого шару на рідку фотополімерну смолу до її повного затвердіння.
3. Формування першого шару об'єкта.
4. Підняття платформи на відстань рівну товщині шару.

Стадії 1-4 повторюються послідовно до завершення формування всіх шарів.

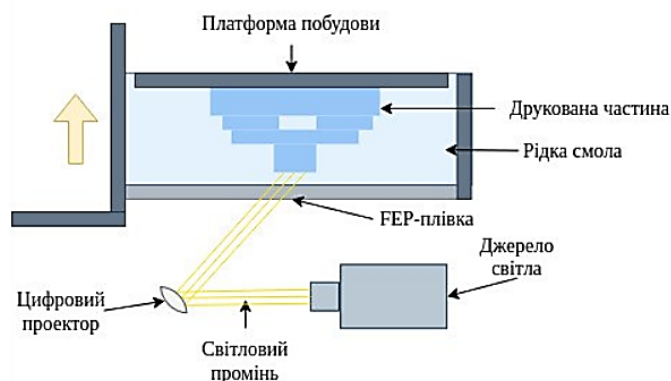


Рис. 15. Принцип роботи принтера за технологією DLP

Джерело: розроблено авторами.

Технологія типу CDLP (Continuous Direct Light Processing) або безперервна цифрова світлодіодна проекція. Технологія така сама, як і у DLP, єдина відмінність це те, що друк передбачає постійний рух платформи вгору вздовж осі Z, що збільшує швидкість виробництва моделей до 1500 см<sup>3</sup>/год [52].

На основі проведеного літературного аналізу існуючих способів адитивного виробництва нами систематизовано та представлено у вигляді табл. 1 та табл. 2 ключові відомості про технології та їхні особливості.

Таблиця 1 – Технологічні особливості методів адитивного виробництва

Вид технології	Метод виробництва	Переваги	Недоліки	Сфери застосування
1	2	3	4	5
Binder Jetting	BJ	<ul style="list-style-type: none"> <li>• довговічність деталей друку;</li> <li>• друк декількома матеріалами одночасно.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• крихкість друкованих деталей;</li> <li>• необхідність вторинної обробки.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• прототипування [53];</li> <li>• розробка електронних компонентів [15; 16; 19-21];</li> <li>• ливарна справа [54].</li> </ul>
Directed Energy Deposition	LENS	<ul style="list-style-type: none"> <li>• швидкість друку;</li> <li>• вартість матеріалів;</li> <li>• дуже велика область друку.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• дуже великі витрати енергії;</li> <li>• низька роздільна здатність.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• виробництво деталей високої відповідальності [55];</li> <li>• ремонт та додавання деталей [56].</li> </ul>
	EBAM			

Продовження табл. 1

1	2	3	4	5
Material Extrusion	FDM	<ul style="list-style-type: none"> <li>• низька вартість обладнання та матеріалів для друку;</li> <li>• відкритий вихідний код;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• обмежена точність друку;</li> <li>• анізотропія.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• виготовлення функціональних прототипів [57];</li> </ul>
	FGF	<ul style="list-style-type: none"> <li>• можливість придбати такий принтер у розібраному вигляді за низькою ціною або зібрати самостійно</li> <li>• друк декількома матеріалами одночасно.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• обмежена точність друку;</li> <li>• анізотропія;</li> <li>• низька швидкість друку.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• виробництво деталей високої відповідальності [58].</li> </ul>
Material Jetting	MJ	<ul style="list-style-type: none"> <li>• висока точність друку;</li> <li>• друк декількома матеріалами одночасно;</li> <li>• висока деталізація.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• висока вартість принтерів та матеріалів для друку;</li> <li>• крихкість друкованих деталей.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• виготовлення функціональних прототипів [59, 60];</li> <li>• розробка електронних компонентів [61];</li> <li>• ювелірне виробництво [62];</li> <li>• промисловий і архітектурний дизайн [63].</li> </ul>
	NPJ			
	DOD	<ul style="list-style-type: none"> <li>• висока вартість принтерів та матеріалів для друку;</li> <li>• обмежений вибір матеріалів для друку;</li> <li>• крихкість друкованих деталей.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• високоточне прототипування [60];</li> <li>• створення форм для подальшого лиття [64];</li> <li>• ювелірне виробництво [62].</li> </ul>	
Powder Bed Fusion	SLS	<ul style="list-style-type: none"> <li>• друк об'єктів зі складною геометрією;</li> <li>• відсутність підтримок;</li> <li>• дуже висока міцність друкованих деталей;</li> <li>• високі механічні властивості з'єднанні з самим матеріалом.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• висока вартість принтерів;</li> <li>• неможливість друку деяких пористих деталей.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• виготовлення функціональних прототипів [65];</li> <li>• ливарна справа [66];</li> <li>• виробництво деталей високої відповідальності [65].</li> </ul>
	MJF	<ul style="list-style-type: none"> <li>• друк об'єктів зі складною геометрією;</li> <li>• відсутність підтримок;</li> <li>• дуже висока міцність друкованих деталей;</li> <li>• високі механічні властивості з'єднанні з самим матеріалом.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• шорстка поверхня;</li> <li>• пористість деталей без постобробки;</li> <li>• усадка або деформація деталей під час обробки.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• виготовлення функціональних прототипів [67];</li> <li>• виробництво деталей високої відповідальності [67].</li> </ul>
	SLM	<ul style="list-style-type: none"> <li>• друк об'єктів зі складною геометрією;</li> <li>• друк пористих об'єктів;</li> <li>• дуже висока міцність друкованих деталей;</li> <li>• високі механічні властивості з'єднанні з самим матеріалом;</li> <li>• різноманітність доступних матеріалів;</li> <li>• висока роздільна здатність друкованих деталей;</li> <li>• безвідходне виробництво;</li> <li>• швидкість вища ніж у ливарного процесу;</li> <li>• відсутність зварних швів.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• дуже висока вартість принтерів;</li> <li>• великі витрати енергії.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• виготовлення функціональних прототипів [68];</li> <li>• виробництво деталей високої відповідальності [68];</li> <li>• друк імплантів [69];</li> <li>• аерокосмічна промисловість [70].</li> </ul>
	DMLS			
	EBM	<ul style="list-style-type: none"> <li>• висока щільність та механічна міцність об'єктів;</li> <li>• друк об'єктів зі складною геометрією;</li> <li>• відсутність підтримок;</li> <li>• безвідходне виробництво;</li> <li>• друк у вакуумній камері.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• шорстка поверхня;</li> <li>• дуже висока вартість принтерів;</li> <li>• великі витрати енергії;</li> <li>• низька роздільна здатність.</li> </ul>	



Закінчення табл. 1

1	2	3	4	5
Sheet Lamination	LOM	<ul style="list-style-type: none"> <li>• дешевий матеріал для друку;</li> <li>• різноманітність варіантів постобробки;</li> <li>• виробництво крупних моделей;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• дуже повільна швидкість друку;</li> <li>• невисока міцність моделей;</li> <li>• низька роздільна здатність друку.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• прототипування та створення макетів [71].</li> </ul>
Vat Photopolymerization	SLA	<ul style="list-style-type: none"> <li>• висока точність друку;</li> <li>• друк дуже тонких шарів.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• крихкість друкованих деталей;</li> <li>• висока вартість принтерів та матеріалів.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• стоматологія [72];</li> <li>• медицина [73];</li> <li>• ювелірна справа [74];</li> </ul>
	DLP	<ul style="list-style-type: none"> <li>• висока точність друку;</li> <li>• висока швидкість друку (вище ніж SLA принтер);</li> <li>• наявність домашніх та промислових моделей.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• крихкість друкованих деталей;</li> <li>• висока вартість матеріалів.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ливарна справа [75].</li> </ul>
	CDLP	<ul style="list-style-type: none"> <li>• висока точність друку;</li> <li>• висока швидкість друку (вище ніж SLA та DLP принтер);</li> <li>• наявність домашніх та промислових моделей.</li> </ul>		

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 2 – Техніко-економічні показники технологій адитивного виробництва

Вид технології	Продуктивність, см <sup>3</sup> /год	Різнманітність матеріалу	Якість, мкм	Вартість обладнання, \$
Binder Jetting	1100 – 3120	Алюміній, бронза, кераміка, гіпс, пісок, інконель, нержавіюча сталь	50-200	від 5 тис. до 1,8 млн
Directed Energy Deposition	430 – 1570	Сплави які зварюються, кераміка	250-5000	від 200 тис. до 5 млн
Material Extrusion	720 – 4680	Полімери, композити, метали, біоматеріали	50-5000	від 0,2 тис. до 400 тис.
Material Jetting	900 – 2530	Фотополімери, нержавіюча сталь, кераміка, віск	16-32	від 20 тис. до 600 тис.
Powder Bed Fusion	30 – 400	Алюміній, кераміка, кобальт, інконель, золото, полімери, титан, сплави які зварюються	30-120	від 20 тис. до 2 млн.
Sheet Lamination	20 – 320	Папір, кевлар, бронза, металева фольга, листовий пластик	70-200	від 9 тис. до 37 тис.
Vat Photopolymerization	192 – 1500	Фотополімери, композити	25-100	від 3 тис. до 800 тис.

Джерело: розроблено авторами.

**Висновки.** Аналіз досліджень показав, що сфера застосування технологій АВ всеохоплююча, універсальність застосування кожної з технологій дозволяє охопити майже весь спектр задач, які вимагає суспільство (створення дешевих малосерійних виробів), наука (створення протопитів, корисних моделей, макетів), медицина (застосування в ортодонції, протезуванні, ортезуванні, імплантуванні та заміщенні органів), аерокосмічна промисловість (виробництво нескладних авіаційних компонентів) тощо, кожна з технологій має безліч напрямків застосування. В даний час відбувається перехід від традиційних технологій виробництва до технологій АВ. Причиною заміщення є можливість точного контролю над процесом, більша вірогідність отримання деталей з попередньо заданими фізико-механічними характеристиками, значне зменшення часу і витрат на виробництво, створення деталей з високою роздільною спроможністю, створення індивіду-

альних виробів (запчастин) за короткий час без необхідності зміни параметрів устаткування, створення виробів зі складними геометричними формами та конструкціями, дуже велика кількість матеріалів, які використовуються у якості сировини.

Загалом, технології адитивного виробництва займають все більш важливе місце у галузі машинобудування, оскільки вони дозволяють швидко та ефективно створювати фізичні об'єкти з цифрових моделей. Проте, вибір найбільш оптимальної технології може бути складним, оскільки варується залежно від конкретного завдання.

На основі проведеного літературного аналізу можемо зробити висновки щодо незручності/недоцільності використання у ГМ таких технологій, як VJ і MJ через великі матеріальні витрати які не супроводжуються високою міцністю отриманих деталей, і неможливості використання технологій SL та VP через крихкість отриманих деталей шляхом виготовлення даними технологіями. Результат зумовлений тим, що технології, переважно, використовують у якості витратного матеріалу фотополімерні смоли, які не володіють достатніми міцнісними характеристиками для використання у ГМ.

У процесі дослідження виявлено, що найефективнішими технологіями АВ у ГМ застосовуються такі види, як DED, ME та PBF. Використання цих технологій забезпечує швидке отримання деталей з високим рівнем відповідальності та з попередньо заданими фізико-механічними характеристиками. Технології можуть використовувати достатньо великий спектр матеріалів, не обмежені виготовленням надскладних геометричних форм та володіють високим коефіцієнтом використання матеріалу.

На фоні двох інших технологій, які володіють можливістю друку металами, вирізняється технологія можливість якої обмежена використанням лише матеріалів з полімерною матрицею. Основними перевагами технології ME є швидкість, доступність і стрімкі розвідки устаткування та витратних матеріалів. Ця технологія поступається по міцності отриманих деталей таким технологіям, як DED та PBF але ME здатна виготовляти деталі з поліпшеними характеристиками, а інколи поєднання цих характеристик, наприклад, термостійкість з підвищеною механічною чи хімічною стійкістю, за рахунок створених полімерних композитів. Деталі, виготовлені за допомогою технології ME, забезпечують значно нижчу масу виробів, що у деяких вузлах механізмів грає значну роль. Такий огляд свідчить про постійний розвиток адитивних технологій, що своєю чергою впливає на розвиток економіки, науки, техніки. Розвиток технології це необхідність у нових матеріалах, спеціалістах та промисловій революції.

Перспективними дослідженнями у напрямку технологій АВ, а саме технології ME, є створення нових матеріалів (наприклад матеріалів наповнених металевим порошком), розширення можливостей програмного забезпечення для контролю точності друку, оптимізація параметрів швидкості друку, умови масштабування технології.

Загалом технології АВ, а саме технологія ME, має великий потенціал у різних галузях. Розвиток технології є важливим, у роботі [2] адитивне виробництво називають ключовим напрямом у четвертій промисловій революції, який потребує подальших досліджень та вдосконалень.

### Список використаних джерел

1. Diegel O. A Practical Guide to Design for Additive Manufacturing / O. Diegel, A. Nordin, D. Motte // Additive Manufacturing Technologies. – 2019. – P. 19-39. DOI: 10.1007/978-981-13-8281-9\_2.
2. The role of additive manufacturing in the era of Industry 4.0 / U. M. Dilberoglu, B. Gharehpagh, U. Yaman, M. Dolen // Procedia Manufacturing. – 2017. – Vol. 11. – P. 545-554. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.148>.
3. Shrestha S. Optimization of Binder Jetting Using Taguchi Method / S. Shrestha, G.P. Manogharan // Article JOM: the journal of the Minerals, Metals & Materials Society. – 2017. – Vol. 69, No3. DOI: 10.1007/s11837-016-2231-4.
4. Carroll B. E. Anisotropic tensile behavior of Ti-6Al-4V components fabricated with directed energy deposition additive manufacturing / B. E. Carroll, T. A. Palmer, A. M. Beese // Acta Materialia. – 2015. – Vol. 87, 1 April. – P. 309-320. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.12.054>.

5. Directed energy deposition (DED) additive manufacturing: Physical characteristics, defects, challenges and applications / D. Svetlizky, M. Das, B. Zheng, A. L. Vyatskikh, S. Bose, A. Bandyopadhyay, J. M. Schoenung, E. J. Lavernia, E. Noam // *Materials Today*. – 2021. – Vol. 49, October. – P. 271-295. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2021.03.020>.
6. Current advances in additive manufacturing / M. Perez, D. Carou, E. M. Rubio, R. Teti // 13th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering. – 2019. – 17-19 July.
7. Opportunities and challenges of quality engineering for additive manufacturing / B. M. Colosimo, Q. Huang, T. Dasgupta, F. Tsung // *Quality Engineering for Advanced Manufacturing*. – 2018. – Is. 3; Vol. 50. DOI: <https://doi.org/10.1080/00224065.2018.1487726>.
8. Singh S. 3D Printing of polymer composites: A short review / S. Singh, S. Ramakrishna, F. Berto // *MDPS*. – 2020. – Vol. 2, Is. 2, April. DOI: <https://doi.org/10.1002/mdp2.97>.
9. Mechanical property evaluation of glass-jute fiber reinforced polymer composites / Md. Rafiquz-zaman, Md. M. Islam, Md. H. Rahman, Md. S. Talukdar, Md. N. Hasan // *Polymers for advanced technologies*. – 2016. – Vol. 27, Is. 10, October. – P. 1308-1316. DOI: <https://doi.org/10.1002/pat.3798>.
10. A robotic cell for performing sheet lamination-based additive manufacturing / P. M. Bhatt, A. M. Kabir, M. Peralta, H. A. Bruck, S. K. Gupta // *Additive Manufacturing*. – 2019. – Vol. 27, May. – P. 278-289. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.02.002>.
11. Vat photopolymerization 3D printing for advanced drug delivery and medical device applications / X. Xu, A. Awad, P. Robles-Martinez, S. Gaisford, A. Goyanes, A. W. Basit // *Journal of Controlled Release*. – 2021. – Vol. 329, 10 January. – Pp. 743-757. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2020.10.008>.
12. Calvert P. Inkjet printing for materials and devices / P. Calvert // *Chem Mater*. – 2001. – № 13(10), Oct 15. – Pp. 3299-3305.
13. Calvert P. Chemical solid free-form fabrication: making shapes without molds / P. Calvert, R. Crockett // *Chem Mater*. – 1997. – № 9 (3), Mar. 18. – Pp. 650-663.
14. Vat Photopolymerization 3D Printing of Nanocomposites: A Literature Review / A. Medellin, W. Du, G. Miao, J. Zou, Z. Pei, C. Ma // *J. Micro Nano-Manuf*. – 2019. – № 7(3), Sep. – 031006 (11 pages). DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4044288>.
15. Inkjet printing of narrow conductive tracks on untreated polymeric substrates / O. T. H. Van, J. Perelaer, A. W. Laet, U. S. Schubert // *Adv Mater*. – 2008. – № 20(2), Jan 18. – Pp. 343-345.
16. Siringhaus H. High-resolution inkjet printing of all-polymer transistor circuits / H. Siringhaus, T. Kawase, R. H. Friend // *Science*. – 2000. – № 290(5499), Dec 15. – Pp. 2123-2126.
17. Inkjet printing of light-emitting polymer displays / T. Shimoda, K. Morii, S. Seki, H. Kiguchi // *Mrs Bulletin*. – 2003. – P. 28(11), Nov. – Pp. 821-827.
18. Bharathan J. Polymer electroluminescent devices processed by inkjet printing: I. Polymer light-emitting logo / J. Bharathan, Y. Yang // *Appl Phys Lett*. – 1998. – № 72(21), May 25. – Pp. 2660-2662.
19. Kordás K. Inkjet printing of electrically conductive patterns of carbon nanotubes / K. Kordás, T. Mustonen, G. Tóth // *Small*. – 2006. – № 2 (8-9), Aug. – Pp. 1021-1025.
20. One-step inkjet printing of conductive silver tracks on polymer substrates / J. Perelaer, C. E. Hendriks, A. W. de Laet, U. S. Schubert // *Nanotechnology*. – 2009. – № 20(16), Mar 31. – 165303.
21. Liu Y. All-polymer capacitor fabricated with inkjet printing technique / Y. Liu, T. Cui, K. Varahramyan // *Solid State Electron*. – 2003. – № 47(9), Sep 1. – Pp. 1543-1548.
22. Ziaee M. Binder jetting: A review of process, materials, and methods / M. Ziaee, N. B. Crane // *Additive Manufacturing*. – 2019. – Vol. 28, August. – Pp. 781-801. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.05.031>.
23. Aerospace applications of laser additive manufacturing / R. Liu, Z. Wang, T. Sparks, F. Liou, J. Newkirk // *Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials*. – 2017. – Pp. 351-371. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100433-3.00013-0>.
24. Najmon J. C. Review of additive manufacturing technologies and applications in the aerospace industry / J. C. Najmon, S. Raeisi, A. Tovar // *Additive Manufacturing for the Aerospace Industry*. – 2019. – Pp. 7-31. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814062-8.00002-9>.
25. Морі Д. Адитивне виробництво в якості фрезерування / Д. Морі. – 2014.
26. Parandoush P. A review on additive manufacturing of polymer-fiber composites / P. Parandoush, D. Lin // *Composite Structures*. – 2017. – Vol. 182, 15 December. – Pp. 36-53. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.08.088>.
27. Temperature FDM 3D Printing for the Manufacture of Patient-Specific Immediate Release Tablets A Lower / T. C. Okwuosa, D. Stefaniak, B. Arafat, A. Isreb, K.-W. Wan, M. A. Alhnan // *Pharmaceutical Research*. – 2016. – Vol. 33. – Pp. 2704-2712.

28. Hot-melt extruded filaments based on pharmaceutical grade polymers for 3D printing by fused deposition modeling / A. Melocchi, F. Parietti, A. Maroni, A. Foppoli, A. Gazzaniga, L. Zema // *International Journal of Pharmaceutics*. – 2016. – Vol. 509, Is. 1–2, 25 July. – P. 255-263. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2016.05.036>.

29. Ravi A. K. An in-process laser localized pre-deposition heating approach to inter-layer bond strengthening in extrusion based polymer additive manufacturing / A. K. Ravi, A. Deshpande, K. H. Hsu // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2016. – Vol. 24, P. 1, October. – Pp. 179-185. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.08.007>.

30. Comparison of Stainless Steel 316L Parts Made by FDM- and SLM-Based Additive Manufacturing Processes / H. Gong, D. Snelling, K. Kardel, A. Carrano // *JOM*. – 2019. – Vol. 71. – Pp. 880-885.

31. Jeffrey Plott. Voids and tensile properties in extrusion-based additive manufacturing of moisture-cured silicone elastomer / Jeffrey Plott, Xiaoqing Tian, Albert J. Shih // *Additive Manufacturing*. – August 2018. – Vol. 22. – Pp. 606-617. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.06.010>.

32. Turner B. N. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling / B. N. Turner, R. Strong, S. A. Gold // *Rapid prototyping journal*. – 2014. – Vol. 20, Is. 3, 14 Apr. – P. 192-204. DOI: 10.1108/RPJ-01-2013-0012.

33. 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective. *Composites Part B* / X. Wang, M. Jiang, Z. Zhou, J. Gou, D. Hui // *Engineering*. – 2017. – Vol. 110, 1 February. – Pp. 442-458. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.11.034>.

34. Kalsoom U. Recent developments in 3D printable composite materials / U. Kalsoom, P. N. Nesterenko, B. Paull // *RSC Adv*. – 2016. – № 6. – Pp. 60355-60371. DOI: <https://doi.org/10.1039/C6RA11334F>.

35. Parandoush P. A review on additive manufacturing of polymer-fiber composites / P. Parandoush, D. Lin // *Composite Structures*. – 2017. – Vol. 182, 15 December. – Pp. 36-53. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.08.088>.

36. Directed energy deposition (DED) additive manufacturing: Physical characteristics, defects, challenges and applications / D. Svetlizky, M. Das, B. Zheng, A. L. Vyatskikh, S. Bose, A. Bandyopadhyay, J. M. Schoenung, E. J. Lavernia, N. Eliaz // *Materials Today*. – 2021. – Vol. 49, October. – Pp. 271-295. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2021.03.020>.

37. A survey of design methods for material extrusion polymer 3D printing / J. Huang, Q. Chen, H. Jiang, B. Zou, L. Li // *Virtual and Physical Prototyping*. – 2020. – Vol. 15, Is. 2. DOI: <https://doi.org/10.1080/17452759.2019.1708027>.

38. Process–Structure–Properties in Polymer Additive Manufacturing via Material Extrusion: A Review / G. D. Goh, Y. L. Yap, H. K. J. Tan, S. L. Sing, G. L. Goh, W. Y. Yeong // *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*. – 2020. – Vol. 45, Is. 2. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408436.2018.1549977>.

39. Gülcan O. The State of the Art of Material Jetting—A Critical Review / O. Gülcan, K. Günaydın, A. Tamer // *Additive Manufacturing II, Polymers*. – 2021. – Special Issue: Process–Structure–Properties in Polymer 13(16). – 2829. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13162829>.

40. Material Jetting / I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker, M. Khorasani // *Additive Manufacturing Technologies*. – 2020. – Pp. 203-235.

41. Kunchala P. 3D printing high density ceramics using binder jetting with nanoparticle densifiers / P. Kunchala, K. Kappagantula // *Materials & Design*. – 2018. – Vol. 155, 5 October. – Pp. 443-450. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.06.009>.

42. Dong H. An experimental study of drop-on-demand drop formation / H. Dong, W. W. Carr // *Physics of Fluids*. – 2006. – № 18. – 072102. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.2217929>.

43. Sun S. Powder bed fusion processes: An overview / S. Sun, M. Brandt, M. Easton // *Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials*. – 2017. – Pp. 55-77. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100433-3.00002-6>.

44. Powder Bed Fusion / I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker, M. Khorasani // *Additive Manufacturing Technologies*. – 2020. – Pp. 125-170.

45. 3D printing: Principles and pharmaceutical applications of selective laser sintering / A. Awad, F. Fina, A. Goyanes, S. Gaisford, A. W. Basit // *International Journal of Pharmaceutics*. – 2020. – Vol. 586, 30 August. – 119594. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2020.119594>.

46. Comparative study on 3D printing of polyamide 12 by selective laser sintering and multi jet fusion / C. Cai, W. S. Tey, J. Chen, W. Zhu, X. Liu, T. Liu, L. Zhao, K. Zhou // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2021. – Vol. 288, February. – 116882. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116882>.
47. Fatigue behaviour of selective laser melting steel components / L. M. S. Santos, J. A. M. Ferreira, J. S. Jesus, J. M. Costa, C. Capela // *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. – 2016. – Vol. 85, Part A, October. – P. 9-15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2016.08.011>.
48. Nandy J. A. Review on Direct Metal Laser Sintering: Process Features and Microstructure Modeling / J. Nandy, H. Sarangi, S. Sahoo // *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*. – 2019. – Vol. 6. – Pp. 280-316.
49. Körner C. Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting – a review / C. Körner // *International Materials Reviews*. – 2016. – Vol. 61, Is. 5. DOI: <https://doi.org/10.1080/09506608.2016.1176289>.
50. Mekonnen B. G. A Study on State of the Art Technology of Laminated Object Manufacturing (LOM) / B. G. Mekonnen, G. Bright, A. Walker // *CAD/CAM, Robotics and Factories of the Future*. – Part of the Lecture Notes in Mechanical Engineering book series (LNME). – 2016. – Pp. 207-216.
51. Huang J. A. Review of Stereolithography: Processes and Systems / J. Huang, Q. Q. Wang // *Processes*. – 2020. – № 8(9). – 1138. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr8091138>.
52. Stereolithography vs. Direct Light Processing for Rapid Manufacturing of Complete Denture Bases: An In Vitro Accuracy Analysis / A. Unkovskiy, F. Schmidt, F. Beuer, P. Li, S. Spintzyk, P. K. Fernandez // *Digital Workflows and Material Sciences in Dental Medicine, J. Clin. Med.* – 2021. – № 10(5). – 1070. DOI: <https://doi.org/10.3390/jcm10051070>.
53. Producing a Full-Scale Model From Computed Tomographic Data with the Rapid Prototyping Technique Using the Binder Jet Method / O. Ichiro, A. Keita, S. Shingo, H. Yasuhiko // *Journal of Craniofacial Surgery*. – 2000. – № 11(6), November. – Pp. 527-537.
54. Hodder K. J. Bridging additive manufacturing and sand casting: Utilizing foundry sand / K. J. Hodder, R. J. Chalaturnyk // *Additive Manufacturing*. – 2019. – Vol. 28, August. – Pp. 649-660. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.06.008>.
55. A review of slicing methods for directed energy deposition based additive manufacturing / J. Xu, X. Gu, D. Ding, Z. Pan, K. Chen // *Rapid Prototyping Journal*. – 2018. – Vol. 24, No. 6. – Pp. 1012-1025. DOI: <https://doi.org/10.1108/RPJ-10-2017-0196>.
56. Application of Directed Energy Deposition-Based Additive Manufacturing in Repair / A. Saboori, A. Avers, G. Marchese, S. Biamino, M. Lombardi, P. Fino // *Appl. Sci.* – 2019. – № 9 (16). – 3316. DOI: <https://doi.org/10.3390/app9163316>.
57. Additive manufacturing of functional parts based on material extrusion technology / M. Šljivić, C. Fragassa, A. Pavlović, M. Krašnik, J. Ilić, M. Stanojević // *Contemporary Materials VII-2*. – 2016. – Vol. 7, No. 2. DOI: <https://doi.org/10.7251/COMEN1602178S>.
58. Review on Machine Designs of Material Extrusion based Additive Manufacturing (AM) Systems - Status-Quo and Potential Analysis for Future AM Systems / A. Kampker, J. Triebs, S. Kawollek, P. Ayvaz, S. Hohenstein // *Procedia CIRP*. – 2019. – Vol. 81. – Pp. 815-819. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.205>.
59. Moore J. P. Fatigue properties of parts printed by PolyJet material jetting / J. P. Moore, C. B. Williams // *Rapid prototyping journal*. – 2015. – Vol. 21, Is. 6, 19 Oct. – P. 675-685. DOI: <https://doi.org/10.1108/RPJ-03-2014-0031>.
60. Tyagi S. Review on mechanical characterization of 3D printed parts created using material jetting process / S. Tyagi, A. Yadav, S. Deshmukh // *Materials Today*. – 2022. – Vol. 51, Part 1. – Pp. 1012-1016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.073>.
61. High speed 3D material-jetting additive manufacturing of viscous graphene-based ink with high electrical conductivity / E. Jabari, F. Liravi, E. Davoodi, L. Lin, E. Toyserkani // *Additive Manufacturing*. – 2020. – Vol. 35, October. – 101330. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101330>.
62. Assessment of the Dimensional and Geometric Precision of Micro-Details Produced by Material Jetting / M. R. Silva, A. M. Pereira, A. M. Sampaio, A. J. Pontes // *Materials*. – 2021. – № 14(8). – 1989. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14081989>.
63. Material jetting additive manufacturing: An experimental study using designed metrological benchmarks / Y. L. Ya, C. Wang, S. L. Sing, V. Dikshit, W. Y. Yeong, J. Wei // *Precision Engineering*. – 2017. – Vol. 50, October. – Pp. 275-285. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2017.05.015>.

64. Additive manufacturing of zirconia ceramics by material jetting / E. Willems, M. Turon-Vinas, B. Camargo dos Santos, B. V. Hooreweder, F. Zhang, B. Van Meerbeek, J. Vleugels // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2021. – Vol. 41, Is. 10, August. – Pp. 5292-5306. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2021.04.018>.

65. Rapid prototyping manufacturing of silica sand patterns based on selective laser sintering / J. L. Song, Y. T. Li, Q. L. Deng, D. J. Hu // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2007. – Vol. 187-188, 12 June. – Pp. 614-618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.11.108>.

66. Rapid casting technology based on selective laser sintering / Li Yang, Shi-yan Tang, Zi-tian Fan, Wen-ming Jiang, Xin-wang Liu // *China Foundry*. – 2021. – Vol. 18. – Pp. 296-306.

67. Multi Jet Fusion PA12 Manufacturing Parameters for Watertightness, Strength and Tolerances / S. Morales-Planas, J. Minguella-Canela, J. Lluma-Fuentes, J. A. Travieso-Rodriguez, A.-A. García-Granada // *Materials*. – 2018. – № 11(8). – 1472. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma11081472>.

68. Padmakumar M. Additive Manufacturing of Tungsten Carbide Hardmetal Parts by Selective Laser Melting (SLM), Selective Laser Sintering (SLS) and Binder Jet 3D Printing (BJ3DP) Techniques / M. Padmakumar // *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*. – 2020. – Vol. 7. – Pp. 338-371.

69. Demir A. G. Selective laser melting of pure Zn with high density for biodegradable implant manufacturing / A. G. Demir, L. Monguzzi, B. Previtali // *Additive Manufacturing*. – 2017. – Vol. 15, May. – P. 20-28. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.03.004>.

70. Experimental and numerical investigation on compressive fatigue strength of lattice structures of AlSi7Mg manufactured by SLM / L. Boniotti, S. Beretta, L. Patriarca, L. Rigoni, S. Foletti // *International Journal of Fatigue*. – 2019. – Vol. 128, November. – 105181. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.06.041>.

71. Nakagawa T. Laser Cut Sheet Laminated Forming Dies by Diffusion Bonding / T. Nakagawa, M. Kunieda, S.-D. Liu // *Proceedings of the Twenty-Fifth International Machine Tool Design and Research Conference*. – 1985. – P. 505-510.

72. Raines R. Experimental Characterization of the Mechanical Properties of Medical-Grade Dental Implants, Fabricated Using Vat-Photopolymerization Additive Manufacturing Process / R. Raines, J. B. Day, R. Salary // *MSEC*. – 2022. – V. № 001, T. 07, A. 011. – 85436, 7 pages. DOI: <https://doi.org/10.1115/MSEC2022-85436>.

73. Vat photopolymerization 3D printing for advanced drug delivery and medical device applications / X. Xu, A. Awad, P. Robles-Martinez, S. Gaisford, A. Goyanes, A. W. Basit // *Journal of Controlled Release*. – 2021. – Vol. 329, 10 January. – Pp. 743-757. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2020.10.008>.

74. Vat photopolymerization of fly-like, complex micro-architectures with dissolvable supports / Z. Xu, R. Hensleigh, N. J. R. K. Gerard, H. Cui, M. Oudich, W. Chen, Y. Jing, X. (R.) Zheng // *Additive Manufacturing*. – 2021. – Vol. 47, November. – 102321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102321>.

75. Large Scale Vat-Photopolymerization of Investment Casting Master Patterns: The Total Solution / F. Sameni, B. Ozkan, S. Karmel, D. S. Engstrøm, E. Sabet // *Polymers*. – 2022. – № 14 (21). – 4593. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14214593>.

## References

1. Diegel, O., Nordin, A., & Motte, D. (2019). A Practical Guide to Design for Additive Manufacturing. *Additive Manufacturing Technologies*, 19-39. doi:10.1007/978-981-13-8281-9\_2.

2. Dilberoglu, U.M., Gharehpapagh, B., Yaman, U., & Dolen, M. (2017). The role of additive manufacturing in the era of Industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 11, 545-554. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.148>.

3. Shrestha, S., & Manogharan, G.P. (2017). Optimization of Binder Jetting Using Taguchi Method. *Article JOM: the journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, 69(3). doi:10.1007/s11837-016-2231-4.

4. Carroll, B.E., Palmer, T.A., & Beese, A.M. (1 April, 2015). Anisotropic tensile behavior of Ti-6Al-4V components fabricated with directed energy deposition additive manufacturing. *Acta Materialia*, 87, 309-320. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.12.054>.

5. Svetlizky, D., Das, M., Zheng, B., Vyatskikh, A.L., Bose, S., Bandyopadhyay, A., Schoenung, J. M., Lavernia, E. J., & Noam, E. (2021). Directed energy deposition (DED) additive manufacturing: Physical characteristics, defects, challenges and applications. *Materials Today*, 49, 271-295. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2021.03.020>.

6. Perez, M., Carou, D., Rubio, E. M., & Teti, R. (17-19 July 2019). Current advances in additive manufacturing. *13th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering*.
7. Colosimo, B.M., Huang, Q., Dasgupta, T., Tsung, F. (2018). Opportunities and challenges of quality engineering for additive manufacturing. *Quality Engineering for Advanced Manufacturing*, 50(3). <https://doi.org/10.1080/00224065.2018.1487726>.
8. Singh, S., Ramakrishna, S., & Berto, F. (2020). 3D Printing of polymer composites: A short review. *MDPS*, 2(2). <https://doi.org/10.1002/mdp2.97>.
9. Rafiquzzaman, Md., Islam, Md.M., Rahman, Md.H., Talukdar, Md.S., & Hasan, Md.N. (2016). Mechanical property evaluation of glass-jute fiber reinforced polymer composites. *Polymers for advanced technologies*, 27(10), 1308-1316. <https://doi.org/10.1002/pat.3798>.
10. Bhatt, P.M., Kabir, A.M., Peralta, M., Bruck, H.A., & Gupta, S.K. (2019). A robotic cell for performing sheet lamination-based additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 27, 278-289. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.02.002>.
11. Xu, X., Awad, A., Robles-Martinez, P., Gaisford, S., Goyanes, A., Basit, A.W. (2021). Vat photopolymerization 3D printing for advanced drug delivery and medical device applications. *Journal of Controlled Release*, 329, 743-757. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2020.10.008>.
12. Calvert, P. (2001). Inkjet printing for materials and devices. *Chem Mater*, (13(10)), 3299-3305.
13. Calvert, P., & Crockett, R. (1997). Chemical solid free-form fabrication: making shapes without molds. *Chem Mater*, (9 (3)), 650-663.
14. Medellin, A., Du, W., Miao, G., Zou, J., Pei, Z., & Ma, C. (2019). Vat Photopolymerization 3D Printing of Nanocomposites: A Literature Review. *J. Micro Nano-Manuf.*, (7(3)), 031006. <https://doi.org/10.1115/1.4044288>.
15. Van, O.T.H., Perelaer, J., Laat, A.W., & Schubert, U.S. (2008). Inkjet printing of narrow conductive tracks on untreated polymeric substrates. *Adv Mater.*, (20(2)), 343-345.
16. Siringhaus, H., Kawase, T., & Friend, R.H. (2000). High-resolution inkjet printing of all-polymer transistor circuits. *Science*, (290(5499)), 2123-2126.
17. Shimoda, T., Morii, K., Seki, S., & Kiguchi, H. (2003). Inkjet printing of light-emitting polymer displays. *Mrs Bulletin*, 28(11), 821-827.
18. Bharathan, J., & Yang, Y. (1998). Polymer electroluminescent devices processed by inkjet printing: I. Polymer light-emitting logo. *Appl Phys Lett.*, (72(21)), 2660-2662.
19. Kordás, K., Mustonen, T., & Tóth, G. (2006). Inkjet printing of electrically conductive patterns of carbon nanotubes. *Small*, (2(8-9)), 1021-1025.
20. Perelaer, J., Hendriks, C. E., de Laat, A. W., & Schubert, U.S. (2009). One-step inkjet printing of conductive silver tracks on polymer substrates. *Nanotechnology*, (20(16)), 165303.
21. Liu, Y., Cui, T., Varahramyan, K. (2003). All-polymer capacitor fabricated with inkjet printing technique. *Solid State Electron*, (47(9)), 1543-1548.
22. Ziaee, M., & Crane, N.B. (2019). Binder jetting: A review of process, materials, and methods. *Additive Manufacturing*, 28, 781-801. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.05.031>.
23. Liu, R., Wang, Z., Sparks, T., Liou, F., & Newkirk, J. (2017). Aerospace applications of laser additive manufacturing. *Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials*, 351-371. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100433-3.00013-0>.
24. Najmon, J.C., Raeisi, S., & Tovar, A. (2019). Review of additive manufacturing technologies and applications in the aerospace industry. *Additive Manufacturing for the Aerospace Industry*, 7-31. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814062-8.00002-9>.
25. Mori, D. (2014). *Adytyvne vyrobnytstvo v yakosti frezeruvannia [Additive production as milling]*.
26. Parandoush, P., & Lin, D. (2017). A review on additive manufacturing of polymer-fiber composites. *Composite Structures*, (182), 36-53. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.08.088>.
27. Okwuosa, T.C., Stefaniak, D., Arafat, B., Isreb, A., Wan, K.-W., & Alhnan, M. A. (2016). Temperature FDM 3D Printing for the Manufacture of Patient-Specific Immediate Release Tablets A Lower. *Pharmaceutical Research*, 33, 2704-2712.
28. Melocchi, A., Parietti, F., Maroni, A., Foppoli, A., Gazzaniga, A., & Zema, L. (2016). Hot-melt extruded filaments based on pharmaceutical grade polymers for 3D printing by fused deposition modeling. *International Journal of Pharmaceutics*, 509(1-2), 255-263. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2016.05.036>.

29. Ravi, A.K., Deshpande, A., & Hsu, K.H. (2016). An in-process laser localized pre-deposition heating approach to inter-layer bond strengthening in extrusion based polymer additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes*, 24(1), 179-185. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.08.007>.
30. Gong, H., Snelling, D., Kardel, K., & Carrano, A. (2019). Comparison of Stainless Steel 316L Parts Made by FDM- and SLM-Based Additive Manufacturing Processes. *JOM*, 71, 880-885.
31. Jeffrey, Plott, Xiaoqing, Tian, & Albert, J. Shih. (August 2018). Voids and tensile properties in extrusion-based additive manufacturing of moisture-cured silicone elastomer. *Additive Manufacturing*, 22, 606-617. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.06.010>.
32. Turner, B.N., Strong, R., & Gold, S.A. (2014). A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling. *Rapid prototyping journal*, 20(3), 192-204. doi:10.1108/RPJ-01-2013-0012.
33. Wang, X., Jiang, M., Zhou, Z., Gou, J., & Hui, D. (2017). 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective. *Composites Part B. Engineering*, 110, 442-458. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.11.034>.
34. Kalsoom, U., Nesterenko, P.N., & Paull, B. (2016). Recent developments in 3D printable composite materials. *RSC Adv.*, (6), 60355-60371. <https://doi.org/10.1039/C6RA11334F>.
35. Parandoush, P., & Lin, D. (2017). A review on additive manufacturing of polymer-fiber composites. *Composite Structures*, 182, 36-53. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.08.088>.
36. Svetlizky, D., Das, M., Zheng, B., Vyatskikh, A.L., Bose, S., Bandyopadhyay, A., Schoenung, J.M., Lavernia, E.J., & Eliaz, N. (2021). Directed energy deposition (DED) additive manufacturing: Physical characteristics, defects, challenges and applications. *Materials Today*, 49, 271-295. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2021.03.020>.
37. Huang, J., Chen, Q., Jiang, H., Zou, B., & Li, L. (2020). A survey of design methods for material extrusion polymer 3D printing. *Virtual and Physical Prototyping*, 15(2). <https://doi.org/10.1080/17452759.2019.1708027>.
38. Goh, G.D., Yap, Y.L., Tan, H.K.J., Sing, S.L., Goh, G.L., & Yeong, W.Y. (2020). Process–Structure–Properties in Polymer Additive Manufacturing via Material Extrusion: A Review. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 45(2). <https://doi.org/10.1080/10408436.2018.1549977>.
39. Gülcan, O., Tamer, A., & Günaydin, K. (2021). The State of the Art of Material Jetting—A Critical Review. *Additive Manufacturing II, Polymers. Special Issue: Process–Structure–Properties in Polymer 13(16)*. 2829. <https://doi.org/10.3390/polym13162829>.
40. Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., & Khorasani, M. (2020). Material Jetting. *Additive Manufacturing Technologies* (pp. 203-235).
41. Kunchala, P., & Kappagantula, K. (2018). 3D printing high density ceramics using binder jetting with nanoparticle densifiers. *Materials & Design*, 155, 443-450. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.06.009>.
42. Dong, H., & Carr, W.W. (2006). An experimental study of drop-on-demand drop formation. *Physics of Fluids*, (18), 072102. <https://doi.org/10.1063/1.2217929>.
43. Sun, S., Brandt, M., & Easton, M. (2017). Powder bed fusion processes: An overview. *Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials* (pp. 55-77). <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100433-3.00002-6>.
44. Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., & Khorasani, M. (2020). Powder Bed Fusion. *Additive Manufacturing Technologies* (pp. 125-170).
45. Awad, A., Fina, F., Goyanes, A., Gaisford, S., & Basit, A.W. (2020). 3D printing: Principles and pharmaceutical applications of selective laser sintering. *International Journal of Pharmaceutics*, 586, 119594. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2020.119594>.
46. Cai, C., Tey, W.S., Chen, J., Zhu, W., Liu, X., Liu, T., Zhao, L., Zhou, K. (2021). Comparative study on 3D printing of polyamide 12 by selective laser sintering and multi jet fusion. *Journal of Materials Processing Technology*, 288, 116882. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116882>.
47. Santos, L.M.S., Ferreira, J.A.M., Jesus, J.S., Costa, J.M., & Capela, C. (2016). Fatigue behaviour of selective laser melting steel components. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 85(Part A), 9-15. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2016.08.011>.
48. Nandy, J.A., Sarangi, H., & Sahoo, S. (2019). Review on Direct Metal Laser Sintering: Process Features and Microstructure Modeling. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, 6, 280-316.



49. Körner, C. (2016). Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting – a review. *International Materials Reviews*, 61(5). <https://doi.org/10.1080/09506608.2016.1176289>.
50. Mekonnen, B.G., Bright, G., Walker, A. (2016). A Study on State of the Art Technology of Laminated Object Manufacturing (LOM). In: Mandal, D.K., Syan, C.S. (Eds.), *CAD/CAM, Robotics and Factories of the Future. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, New Delhi (pp. 207-216)*.
51. Huang, J.A., & Wang, Q.Q. (2020). Review of Stereolithography: Processes and Systems. *Processes*, 8(9), 1138. <https://doi.org/10.3390/pr8091138>.
52. Unkovskiy, A., Schmidt, F., Beuer, F., Li, P., Spintzyk, S., & Fernandez, P.K. (2021). Stereolithography vs. Direct Light Processing for Rapid Manufacturing of Complete Denture Bases: An In Vitro Accuracy Analysis. *Digital Workflows and Material Sciences in Dental Medicine, J. Clin. Med.*, 10(5), 1070. <https://doi.org/10.3390/jcm10051070>.
53. Ichiro, O., Keita, A., Shingo, S., & Yasuhiko, H. (2000). Producing a Full-Scale Model From Computed Tomographic Data with the Rapid Prototyping Technique Using the Binder Jet Method. *Journal of Craniofacial Surgery*, 11(6), 527-537.
54. Hodder, K.J., Chalaturnyk, R.J. (2019). Bridging additive manufacturing and sand casting: Utilizing foundry sand. *Additive Manufacturing*, 28, 649-660. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.06.008>.
55. Xu, J., Gu, X., Ding, D., Pan, Z., & Chen, K. (2018). A review of slicing methods for directed energy deposition based additive manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*, 24(6), 1012-1025. <https://doi.org/10.1108/RPJ-10-2017-0196>.
56. Saboori, A., Avers, A., Marchese, G., Biamino, S., Lombardi, M., & Fino, P. (2019). Application of Directed Energy Deposition-Based Additive Manufacturing in Repair. *Appl. Sci.*, 9(16), 3316. <https://doi.org/10.3390/app9163316>.
57. Šljivić, M., Fragassa, C., Pavlović, A., Krašnik, M., Ilić, J., & Stanojević, M. (2016). Additive manufacturing of functional parts based on material extrusion technology. *Contemporary Materials VII-2*, 7(2). <https://doi.org/10.7251/COMEN1602178S>.
58. Kampker, A., Triebs, J., Kawollek, S., Ayvaz, P., & Hohenstein, S. (2019). Review on Machine Designs of Material Extrusion based Additive Manufacturing (AM) Systems - Status-Quo and Potential Analysis for Future AM Systems. *Procedia CIRP*, 81, 815-819. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.205>.
59. Moore, J.P., & Williams, C.B. (2015). Fatigue properties of parts printed by PolyJet material jetting. *Rapid prototyping journal*, 21(6), 675-685. doi:10.1108/RPJ-03-2014-0031.
60. Tyagi, S., Yadav, A., Deshmukh, S. (2022). Review on mechanical characterization of 3D printed parts created using material jetting process. *Materials Today*, 51(1), 1012-1016. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.073>.
61. Jabari, E., Liravi, F., Davoodi, E., Lin, L., & Toyserkani E. (2020). High speed 3D material-jetting additive manufacturing of viscous graphene-based ink with high electrical conductivity. *Additive Manufacturing*, 35, 101330. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101330>.
62. Silva, M.R., Pereira, A.M., Sampaio, Á.M., & Pontes, A.J. (2021). Assessment of the Dimensional and Geometric Precision of Micro-Details Produced by Material Jetting. *Materials*, 14(8), 1989. <https://doi.org/10.3390/ma14081989>.
63. Ya, Y.L., Wang, C., Sing, S.L., Dikshit, V., Yeong, W.Y., & Wei, J. (2017). Material jetting additive manufacturing: An experimental study using designed metrological benchmarks. *Precision Engineering*, 50, 275-285. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2017.05.015>.
64. Willems, E., Turon-Vinas, M., Camargo dos Santos, B., Hooreweder, B.V., Zhang, F., Meerbeek Van, B., & Vleugels, J. (2021). Additive manufacturing of zirconia ceramics by material jetting. *Journal of the European Ceramic Society*, 41(10), 5292-5306. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2021.04.018>.
65. Song, J.L., Li, Y.T., Deng, Q.L., & Hu, D.J. (2007). Rapid prototyping manufacturing of silica sand patterns based on selective laser sintering. *Journal of Materials Processing Technology*, 187-188, 614-618. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.11.108>.
66. Li, Yang, Shi-yan, Tang, Zi-tian Fan, Wen-ming, Jiang, & Xin-wang, Liu. (2021). Rapid casting technology based on selective laser sintering. *China Foundry*, 18, 296-306.
67. Morales-Planas, S., Minguella-Canela, J., Lluma-Fuentes, J., Travieso-Rodriguez, J.A., García-Granada, A.-A. (2018). Multi Jet Fusion PA12 Manufacturing Parameters for Watertightness, Strength and Tolerances. *Materials*, 11(8), 1472. <https://doi.org/10.3390/ma11081472>.
68. Padmakumar, M. (2020). Additive Manufacturing of Tungsten Carbide Hardmetal Parts by Selective Laser Melting (SLM), Selective Laser Sintering (SLS) and Binder Jet 3D Printing (BJ3DP) Techniques. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, 7, 338-371.

69. Demir, A.G., Monguzzi, L., & Previtali, B. (2017). Selective laser melting of pure Zn with high density for biodegradable implant manufacturing. *Additive Manufacturing*, 15, 20-28. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.03.004>.

70. Boniotti, L., Beretta, S., Patriarca, L., Rigoni, L., & Foletti, S. (2019). Experimental and numerical investigation on compressive fatigue strength of lattice structures of AlSi7Mg manufactured by SLM. *International Journal of Fatigue*, 128, 105181. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.06.041>.

71. Nakagawa, T., Kunieda, M., & Liu, S.-D. (1985). Laser Cut Sheet Laminated Forming Dies by Diffusion Bonding. *Proceedings of the Twenty-Fifth International Machine Tool Design and Research Conference* (pp. 505-510).

72. Raines, R., Day, J.B., & Salary, R. (2022). Experimental Characterization of the Mechanical Properties of Medical-Grade Dental Implants, Fabricated Using Vat-Photopolymerization Additive Manufacturing Process. *MSEC*, 001(07), A. 011, 85436. <https://doi.org/10.1115/MSEC2022-85436>.

73. Xu, X., Awad, A., Robles-Martinez, P., Gaisford, S., Goyanes, A., & Basit, A.W. (2021). Vat photopolymerization 3D printing for advanced drug delivery and medical device applications. *Journal of Controlled Release*, 329, 743-757. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2020.10.008>.

74. Xu, Z., Hensleigh, R., Gerard, N.J.R.K., Cui, H., Oudich, M., Chen, W., Jing, Y., Zheng, X. (R.). (2021). Vat photopolymerization of fly-like, complex micro-architectures with dissolvable supports. *Additive Manufacturing*, 47, 102321. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102321>.

75. Sameni, F., Ozkan, B., Karmel, S., Engström, D. S., & Sabet, E. (2022). Large Scale Vat-Photopolymerization of Investment Casting Master Patterns: The Total Solution. *Polymers*, 14(21), 4593. <https://doi.org/10.3390/polym14214593>.

Отримано 24.05.23

UDC 621.791.9

**Ihor Petrenko<sup>1</sup>, Maksym Bolotov<sup>2</sup>, Timur Hanieiev<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>postgraduate

Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

**E-mail:** [igor.petrenko0511@gmail.com](mailto:igor.petrenko0511@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0006-2103-4324>. **ResearcherID:** [IQV-2134-2023](https://orcid.org/0009-0006-2103-4324)

<sup>2</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Welding and Construction technologies  
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

**E-mail:** [bolotovmg@gmail.com](mailto:bolotovmg@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-0915-4132>. **ResearcherID:** [H-4183-2014](https://orcid.org/0000-0002-0915-4132)

<sup>3</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Welding and Construction technologies  
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

**E-mail:** [gatavltim@ukr.net](mailto:gatavltim@ukr.net). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-6037-5494>. **ResearcherID:** [G-5191-2014](https://orcid.org/0000-0001-6037-5494)

## COMPARATIVE ANALYSIS OF ADDITIVE PRODUCTION TECHNOLOGIES IN MECHANICAL ENGINEERING

Today, there are more than 30 varieties of additive manufacturing technologies, and their number is constantly growing. Each type of these technologies has its own unique features and specifics, but they are all related to certain types of additive manufacturing or combinations of these types. In this article, a comparative analysis of the main technologies of additive manufacturing is carried out, where their unique features, applications, advantages and disadvantages are considered in detail.

The main attention is paid to the systematization of data and tabulation of indicators for convenient comparison of different technologies. The state of additive manufacturing technologies, as well as their prospects for development in the field of mechanical engineering, are considered in detail. The article provides a comprehensive overview of the technologies, including a description of the uniqueness of each type, its capabilities and limitations.

The analysis of recent studies devoted to additive technologies showed the interest of the scientific community in the optimization of processes and physical and mechanical characteristics of products, features and directions of use of raw parts, features of printing parameters, scaling of technologies, applications in various industries. The existing literature on this subject is either limited to only fundamental concepts or is too disparate and does not present systematic data, making it difficult for professionals to study. The final tables presented in the work make it possible to conduct a comparative characterization of technologies without spending a lot of time, to single out a technology or several technologies, the capabilities and features of which make it possible to solve the tasks. The work contains a comprehensive overview of additive manufacturing technologies and provides practical value for specialists, scientists and engineers working in the field of mechanical engineering. It helps to understand the potential and advantages of each technology and provides important information for choosing the optimal approach when applying additive manufacturing.

**Keywords:** 3D printing; additive manufacturing; industrial engineering; Binder Jetting; Directed Energy Deposition; Material Extrusion; Material Jetting; Powder Bed Fusion; Sheet Lamination; Vat Photopolymerization.

*Fig.: 15. Table: 2. References: 75.*

**Едуард Зубань<sup>1</sup>, Сергій Бойко<sup>2</sup>, Андрій Єрошенко<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>здобувач вищої освіти кафедри технологій машинобудування та деревообробки  
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)  
E-mail: [zubanedik@gmail.com](mailto:zubanedik@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2801-8929>

<sup>2</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій машинобудування та деревообробки  
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)  
E-mail: [svboyko.cstu@gmail.com](mailto:svboyko.cstu@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8341-6973>

<sup>3</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій машинобудування та деревообробки  
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)  
E-mail: [yeroshenkoam@gmail.com](mailto:yeroshenkoam@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1629-9516>

**РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ ВАКУУМНОГО СТОЛА  
ДЛЯ ДЕРЕВООБРОБНОГО ФРЕЗЕРНОГО ВЕРСТАТА  
З ЧИСЛОВИМ ПРОГРАМНИМ КЕРУВАННЯМ**

Останнім часом великого поширення набули верстати з числовим програмним забезпеченням малої потужності для обробки деревини, пластику та м'яких металів. Вони знайшли своє застосування не тільки на великих виробництвах, а й в домашньому використанні в невеличких майстернях. Загальний час обробки значно збільшується за рахунок часу, який витрачається на кріплення заготовки до стола. Крім того, цей тип верстатів використовується для розкрою та обробки листових матеріалів, під час закріплення яких виникає деформація внаслідок їх недостатньої жорсткості і, як наслідок, низька точність обробки та збільшення припусків на обробку. Тому виникає потреба у збільшенні площі затиску таких заготовок, а оскільки застосування прихватів можливе лише по периметру заготовки, є потреба в пошуках нових ефективних способів закріплення.

**Ключові слова:** тонкостінні заготовки; зусилля закріплення; деформації; вакуумний насос; САЕ-аналіз.

Рис.: 5. Табл.: 1. Бібл.: 20.

**Актуальність теми дослідження.** Велике значення в удосконаленні деревообробного виробництва має технологічне оснащення. Використання пристосувань сприяє: підвищенню продуктивності та точності обробки, складанню та контролю; полегшенню умови праці робітників; дозволяє чітко регламентувати тривалість виконуваних операцій та підвищенню безпеки праці.

Наявні методи закріплення заготовок до стола [10]:

- 1) вакуумні присоски;
- 2) магнітний стіл;
- 3) пневмно- та гідропідсилювачі;
- 4) механічне кріпильне оснащення (лещата, струбцини, болти);
- 5) вакуумний стіл.

**Постановка проблеми.** Враховуючи необхідність закріплення великих за площею тонкостінних заготовок, виникає проблема точності обробки та деформації матеріалу. Найбільш доцільним вирішенням цієї проблеми є використання вакуумного стола, який надійно фіксує заготовку та забезпечує роботу з високою точністю. Однак бракує доступних рішень для домашнього користування, вирішенням цього може бути: розробка конструкції вакуумного стола, який може бути виготовленим на вже наявному верстаті.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій вказує на те, що** основним принципом роботи вакуумного стола є створення безповітряного простору за рахунок відкачування повітря з камер, утворених між пазами стола та деталлю. Фактично на матеріал, що обробляється, впливає не сам вакуум, утворений пристроєм, а атмосферний тиск, який забезпечує притискання заготовки до робочої поверхні [2].

При створенні вакууму в замкнутому об'ємі утворюється сила, зумовлена різницею між тиском у камері та атмосферним тиском. Принцип роботи вакуумного стола наведено на рис. 1.

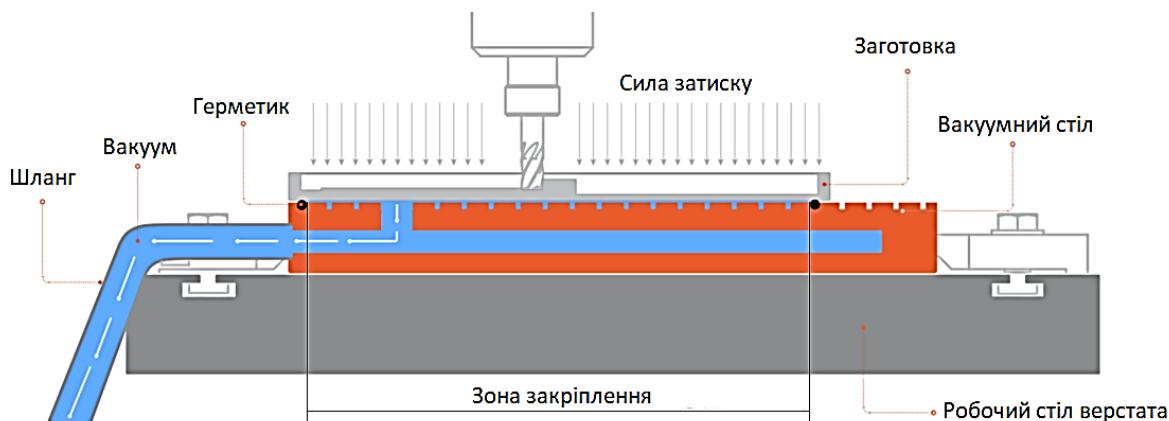


Рис. 1. Принцип роботи вакуумного стола

За допомогою сили, що створюється за рахунок перепаду тиску, заготовки надійно фіксуються на столі. Зважаючи на те, що атмосферний тиск створює зусилля в  $1 \text{ кгс/см}^2$ , пластина з площею  $100 \times 100 \text{ мм}$  притискатиметься до стола із зусиллям  $100 \text{ кгс}$ . Цього більш ніж достатньо для обробки закріплених заготовок інструментом ЧПК-верстатів на звичайних режимах. Зусилля зростатиме зі збільшенням площі заготовки, що закріплюється.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Не вирішено, які матеріали можна використовувати, щоб зменшити вартість вакуумного стола та зробити їх більш доступними для самостійного виробництва.

**Метою** цієї роботи є розробка конструкції вакуумного стола для фрезерного верстата з ЧПК, який дозволить збільшити точність обробки та зменшити час, потрібний на кріплення заготовок до стола. Результатом роботи є розроблена конструкція вакуумного стола, здійснений підбір необхідного обладнання, розрахунки зусиль кріплення та САЕ-аналіз деформацій заготовки при різних способах кріплення.

#### Виклад основного матеріалу.

*Вакуумні столи ефективні при роботі з такими матеріалами:*

1. Всі типи пластику;
2. Композитні термооброблені деревні матеріали [4];
3. Органічне скло;
4. Деревина, МДФ, ДСП, фанера;
5. Метали.

*Переваги вакуумних столів для верстатів з ЧПК [5; 9]:*

1. Скорочення часу кріплення заготовки на  $70 \%$ .
2. Економія часу для обробки тонких матеріалів до  $90 \%$ .
3. Безвібраційний затиск тонких та гнучких матеріалів.
4. На відміну від магнітних столів – можливе кріплення немагнітного матеріалу.
5. Обробка плівок при використанні додаткової перехідної пластини.
6. Зручне складання та обробка.
7. Висока притискна сила на квадратний сантиметр поверхні.

Використання даного типу кріплення дозволяє обробляти тонкі заготовки листового матеріалу [7; 9], не деформуючи їх при цьому [11; 12] (рис. 2).

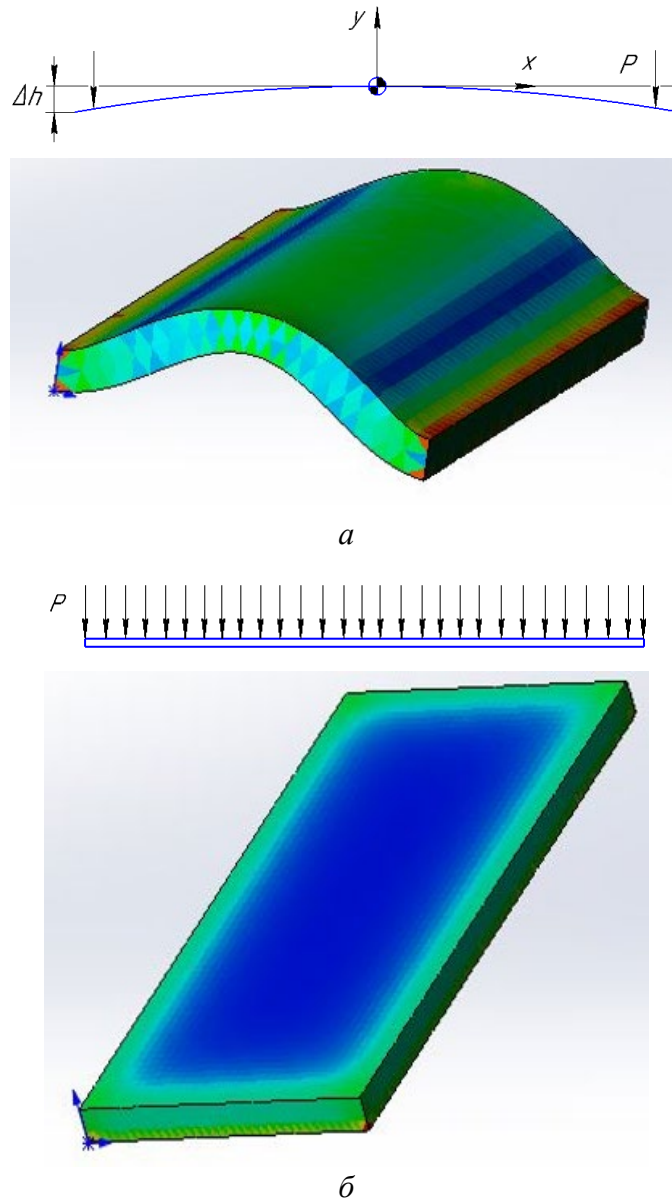


Рис. 2. Деформації заготовки при обробці на фрезерному верстаті з ЧПК:  
 а – використання прихватів, струбцин; б – вакуумний стіл

Існує декілька видів вакуумних столів для верстатів з ЧПК [6] (рис. 3):

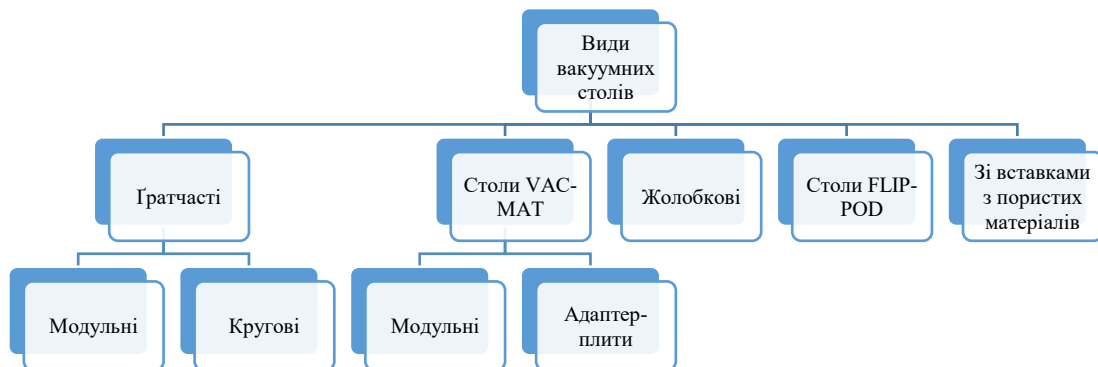
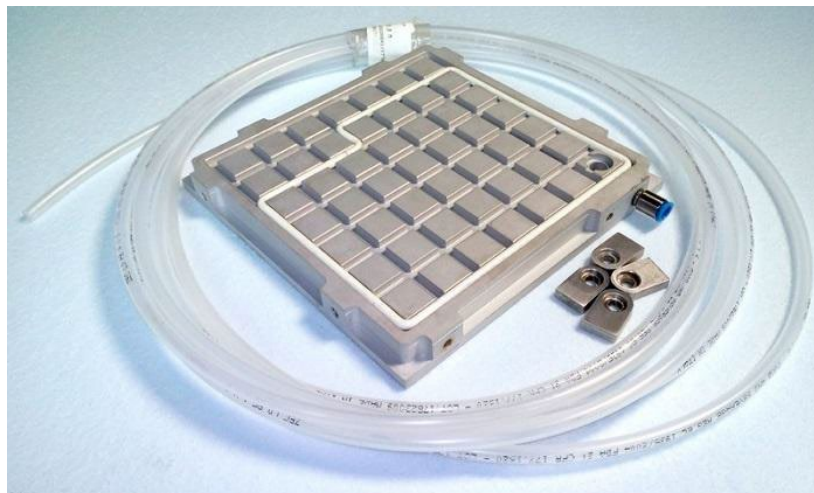


Рис. 3. Класифікація вакуумних столів

Серед наведених видів найпоширенішим є ґратчасті (рис. 4), оскільки цей вид є легким у виготовленні, має високу силу притискання та точність позиціонування.

Стіл являє собою плиту, на якій нанесена сітка пазів із певним кроком. Порожнина пазів об'єднана з вакуумною системою через отвори плити. Вакуумний трубопровід може розгалужуватися до різних отворів, що дозволяє розділити площу стола на робочі області.

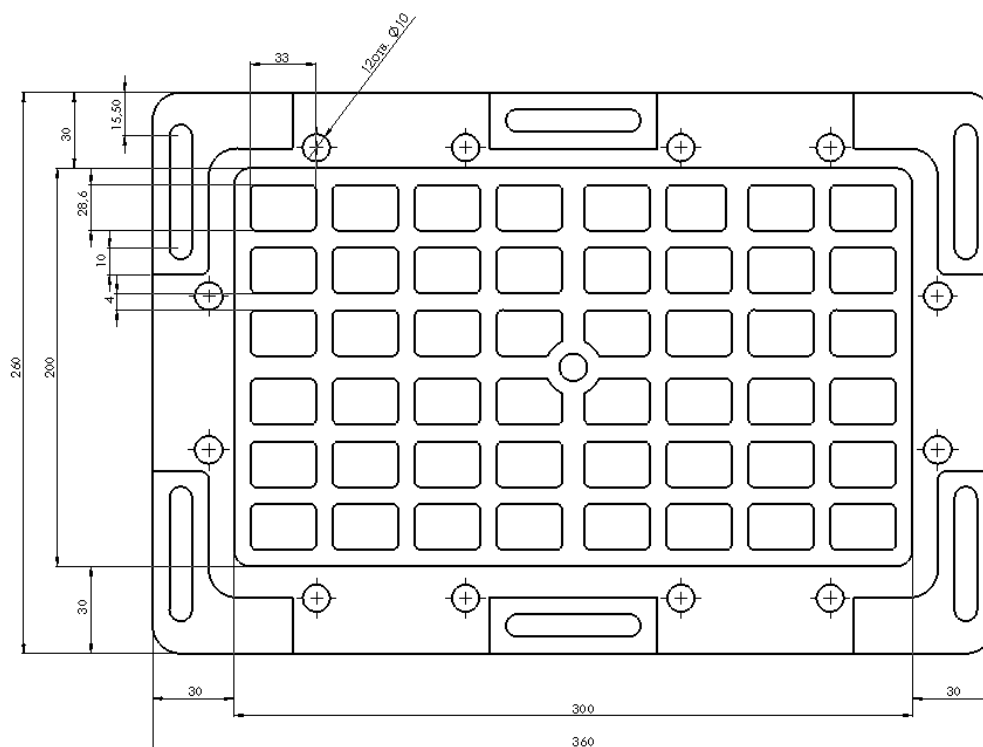


*Рис. 4. Гратчастий вакуумний стіл*

Етапи виготовлення вакуумного стола:

1. Проектування та вибір матеріалу заготовки.

На етапі підготовки виробництва розробляються робочі креслення плити стола, 3D-моделі. Робоча поверхня стола матиме габаритні розміри 300×200 мм, ширина канавки 4 мм. Через невеликий розмір робочої поверхні немає потреби робити декілька секторів, тому буде 1 центральний отвір на стику канавок для забезпечення вакууму (рис. 5). По краях стола виконані отвори для кріплення до штатного стола. Для швидкого орієнтування заготовки на столі верстата й суміщення систем координат верстата й заготовки, по периметру стола передбачено отвори для встановлення шкантів, які будуть використані як упори для закріплення заготовки.



*Рис. 5. Креслення вакуумного стола*

Яку основу можна використати:

- А. Лист фанери;
  - Б. Лист МДФ.
2. Підготовка баз.

Поверхню заготовки для вакуумного стола необхідно попередньо обробити для досягнення мінімального відхилення від площинності, щоб деталі, які будуть оброблятися не копіювали нерівності при затисканні. Вирівнювання можна зробити за допомогою 1-2 проходів спіральною фрезою або використавши рейсмусний верстат.

3. Нарізання канавок.

Канавки фрезерують відповідно до обраної схеми згідно з кресленням. Ширина канавки повинна бути на  $\frac{1}{3}$  менша за діаметр шнура, у нашому випадку 4 мм (діаметр шнура 6 мм). Глибина канавки виконується рівна половині діаметра шнура, щоб не відбувалося втрат вакууму.

4. Виготовлення траси.

Оскільки стіл не поділений на сектори і має 1 центральний отвір для забезпечення вакууму, найпростішим рішенням виготовлення траси буде фрезерування паза зі зворотньої сторони стола для встановлення патрубку, який підключається до вакуумного насоса.

5. Шліфування стола.

Після обробки фрезеруванням робочих поверхонь стола, обов'язково має бути етап шліфування.

6. Герметизація пористості МДФ.

МДФ має досить пористу структуру, тому виникає необхідність у герметизації всієї поверхні стола для запобігання потрапляння вологи та втрати вакууму через пори. Для цього використовуємо вологостійкий клей ПВА, розведений із водою у співвідношенні 1:1, і наносимо його тонким шаром у кілька етапів з інтервалом 3 години.

#### **Результати дослідження та його аналіз.**

##### *Розрахунок зусилля закріплення*

Розрахунок здійснюється для стола з робочою поверхнею 300×200 мм, при умові що насос створює тиск у 90 % вакууму; заготовка, що закріплюється повністю закриває робочу поверхню.

Необхідна сила притискання залежить від типу та якості фрезерних інструментів, а також сили, створюваної глибиною різання та швидкістю подачі.

При розкрюванні листового матеріалу фрезою діаметром 6 мм, з глибиною різання 2 мм і швидкістю різання 120 м/хв, момент різання буде становити 0,97 Н\*м, або 323 Н (~33 кгс).

Формула для визначення сили закріплення:

$$P = \frac{F}{A}, \quad (1)$$

де P – тиск (Н/м<sup>2</sup>);

F – сила закріплення (Н);

A – площа робочої поверхні стола (м<sup>2</sup>).

Розрахунок:

$$A = 300 \times 200 \text{ мм} = 0,3 \times 0,2 \text{ м} = 0,06 \text{ м}^2;$$

$$P = 0,2 \text{ bar} \times 0,9 = 20 \text{ кПа} \times 0,9 = 18 \text{ кПа} = 18000 \text{ Н/м}^2;$$

$F = P \times A = 18000 \text{ Н/м}^2 \times 0,06 \text{ м}^2 = 1080 \text{ Н} = 108 \text{ кгс}$ , що є більш ніж достатнім і дозволяє використовувати продуктивніші режими обробки.

0,2 – 1 bar – це вакуум, який мають можливість створювати більшість сучасних насосів.

Оскільки робоча поверхня стола має невелику площу та втрати повітря у вакуумному середовищі будуть вкрай малі, було прийнято рішення використати вакуумний насос з такими параметрами (див. табл. 1).

Таблиця 1 – Параметри вакуумного насоса SEKO S.P.A. BL060

Тип привода	асинхронний двигун
Продуктивність, м <sup>3</sup> /год	130
Максимальний вакуум, бар	0,21
Потужність, кВт	2,2

Після підбору обладнання постає питання експлуатації та обслуговування системи забезпечення вакуумного столу. Деревообробні фрезерні верстати з ЧПК використовуються для обробки широкого спектра деревинних матеріалів, тому надзвичайно важливо використовувати ефективну фільтрацію на вході та належне обслуговування з регулярним очищенням вакуумного насоса і всієї системи. Відсутність технічного обслуговування призведе до надмірного потрапляння деревного пилу у вакуумний насос і можливого пошкодження фільтруючого елемента. Це також призведе до збільшення втрати тиску на фільтрі, що в свою чергу зменшить продуктивність насоса та рівня вакууму. Через велику кількість пилу втрати потужності насоса можуть сягати 30%. Тому рекомендується встановити двоступеневу систему фільтрації на вході, за допомогою якої на першому ступені використовується циклонний роздільний фільтр для відділення великих частинок, а потім ефективний 10-мікронний фільтр тонкого очищення.

Ступінь вакууму, якого ми можемо досягти, залежить від якості ущільнення між фрезерним столом і МДФ плитою, швидкості витoku через МДФ плиту та розміру заготовки щодо розміру фрезерного столу. Чим менша заготовка, тим більший витік через плиту МДФ, отже необхідна більша потужність вакуумного насоса для досягнення необхідного рівня вакууму.

**Висновки.** Проаналізувавши наявні методи закріплення заготовок на столі деревообробних верстатів з ЧПК, можна дійти висновку, що закріплення за допомогою вакууму це практично безальтернативний спосіб надійного і зручного затиску заготовки в порівнянні з механічним, який має певні недоліки:

- оброблювані деталі часто володіють складною геометрією, тому в багатьох випадках розташувати струбцини рівномірно по краях не можливо;
- також є ризик пошкодження заготовки, при значних зусиллях затиску (що необхідно для компенсації сили крутного моменту під час обробки). Така система кріплення абсолютно не підходить для обробки тонких панелей з композиту або виробів з оргскла;

Таким чином, рівномірного притискання деталі до робочої поверхні можна досягти тільки вакуумним способом.

Після проведеного САЕ-аналізу стає зрозумілим, що закріплення за допомогою вакууму є більш ефективним, адже при такому закріпленні заготовка рівномірно притискається до робочої поверхні.

За допомогою даної конструкції йде економія часу закріплення заготовки; фіксація без механічного впливу, який в свою чергу призводить до деформації і пошкодження поверхонь заготовки.

#### Список використаних джерел

1. Determining vacuum's holding force in CNC routers. Retrieved from [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.woodworkingnetwork.com/best-practices-guide/panel-processing/determining-vacuums-holding-force-cnc-routers>.
2. Thông T. M. Fabrication of a vacuum table for CNC concept mill 155 milling machine / Trần Minh Thông, Tào Quang Bằng // The University of Danang. – 2021. – VOL. 19, No. 10. – Pp. 60-63.



3. CNC Workholding Methods – Find the best way to load your workpiece for CNC Machining [Electronic resource] – Access mode: <https://www.3erp.com/blog/find-the-best-way-to-load-your-workpiece-for-cnc-machining>.

4. Properties of Hornbeam (*cerpinus betulus*) wood thermally treated under different conditions / O. Pinchevska, J. Sedliacik, O. Horbachova, A. Spirochkin, I. Rohovskyi // *Acta Facultatis Xylogiae Zvolen.* – 2019. – Vol. 61, No. 2. – Pp. 25-39.

5. Yanel K. The effect of suction pressure of vacuum clamp on the aluminum plate surface following the cutting process using mini PC-based CNC milling / K. Yanel, Herianto, R. Sriwijaya // *AIP Conference Proceedings.* – 2019. – № 2187, 050019.

6. CNC Plus Ltd./A Vacuum Tables UK, Global manufacturers and distributors of precision engineered, high quality CNC vacuum tables, vacuum pumps, vacuum clamping, T-slot plates, clamping solutions, industrial and DIY CNC spare parts and accessories [Electronic resource]. – Access mode <https://vacuumtables.co.uk/>.

7. Pinchevska O. Wood particleboard covered with slices made of pine tree branches / O. Pinchevska, M. Šmidriakova // *Acta Facultatis Xylogiae Zvolen.* – 2016. – Vol. 8. No.1. – Pp. 67-74. DOI: 10.17423/afx.2016.58.1.08.

8. Engineering systems. [Electronic resource]. – Access mode: <https://dosingtech.com.ua/product/vozduhoduvka-seko-bl06000102200-2-2-kw-3ph-2-318-m3-ch-0-mbar-180-m3-ch-190-mbar>.

9. Kalchenko, V. V. Mathematical modeling of abrasive grinding working process / V. V. Kalchenko, A. M. Yeroshenko, S. V. Boyko // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu.* – 2017. – № 6. – Pp. 76-82.

10. Modelling of contact geometry of tool and workpiece in grinding process with crossed axes of the tool and workpiece with circular profile / V. Kalchenko, A. Yeroshenko, S. Boyko, O. Kalchenko // *Acta Mechanica et Automatica.* – 2021. – № 15 (1). – Pp. 9-15. DOI: 10.2478/ama-2021-0002.

11. The milling of airframe components with low rigidity: a general approach to avoid static and dynamic problems / S. Herranz, F. J. Campa, L. N. Lopez de Lacalle, A. Rivero, A. Lamikiz, E. Ukar, J. A. Sanchez, U. Bravo // *Prod Institution Mechanical Eng. Part B. J. Eng. Manuf.* – 2005. – № 219 (11). – Pp. 789-800.

12. Kolar, P. Clamping of Thin-Walled Curved Workpieces, Intelligent Fixtures for the Manufacturing of Low Rigidity Components / P. Kolar, J. Sveda, J. Koubek // Springer, Switzerland. 2017. – Pp. 81-98. DOI: 10.1007/978-3-319-45291-3.

13. Graham T. Smith / T. Graham [Electronic resource] // *CNC Machining Technology. Volume I: Design, Development and CIM Strategies.* Springer London. – 1993. – Access mode: <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-2051-3>.

14. Wan N. An intelligent fixture design method based on smart modular fixture unit / N. Wan, Z. Wang, R. Mo // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* – Vol. 69, No. 9-1. – Pp. 2629-2649.

15. An integrated system for ultraprecision machine tool design in conceptual and fundamental design stage / W. Chen, X. Luo, H. Su, F. Wardle // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* – 2015. – Pp. 1-7.

16. Gothwal, S. Different aspects in design and development of flexible fixtures: Review and future directions / S. Gothwal, T. Raj // *International Journal of Services and Operations Management.* – 2017. – Vol. 26, No. 3. – Pp. 386-410. DOI: 10.1504/ijssom.2017.10002780.

17. Vacuum Clamping Technology for the Metal and Sheet Metal Industry [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.schmalz.com/en-at/vacuum-clamping-technology/industries-and-applications/metal-and-sheet-metal>.

18. Design and Development of Flexible Vacuum Clamping System for Thin Walled Cylindrical Object for CNC Machines / T. Manzoor, S. Khalil, I. Khan, G. A. Gohar, M. Abid // *Journal of Applied Mechanical Engineering.* – 2017. – Vol. 6, Is. 4. – Pp. 1-10. DOI: 10.4172/2168-9873.100027.

19. Alquraan T. High-speed clamping mechanism of the CNC lathe with compensation of centrifugal forces / T. Alquraan, Y. Kuznetsov, T. Tsvyd // *Procedia Engineering.* – 2016. – № 150. – Pp. 689-695. DOI: [org/10.1016/j.proeng.2016.07.081](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.081).

20. Modeling and simulation for the critical bending force of power chucks to guarantee high machining precision / J. Wang, J. Zhang, P. Feng, Z. Wu, G. Zhang // *Int J Adv Manuf Tech.* – 2015. – P. 79. – Pp. 1081-1094.

### References

1. Determining vacuums holding force in CNC routers. <https://www.woodworkingnetwork.com/best-practices-guide/panel-processing/determining-vacuums-holding-force-cnc-routers>.
2. Trần Minh Thông, Tào Quang Bằng (2021). Fabrication of a vacuum table for CNC concept mill 155 milling machine. The University of Danang. *Journal of Science and Technology*, 19(10), 60-63.
3. CNC Workholding Methods – Find the best way to load your workpiece for CNC Machining. <https://www.3erp.com/blog/find-the-best-way-to-load-your-workpiece-for-cnc-machining>.
4. Pinchevska, O., Sedliacik, J., Horbachova, O., Spirochkin, A., Rohovskyi, I. (2019). Properties of Hornbeam (cerpinus betulus) wood thermally treated under different conditions. *Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen*, 61(2), 25-39. doi:10.17423/afx.2019.61.2.03.
5. Yanel, K., Herianto, R. Sriwijaya (2019). The effect of suction pressure of vacuum clamp on the aluminum plate surface following the cutting process using mini PC-based CNC milling. *AIP Conference Proceedings*, 2187, 050019.
6. CNC Plus Ltd./T/A Vacuum Tables UK, Global manufacturers and distributors of precision engineered, high quality CNC vacuum tables, vacuum pumps, vacuum clamping, T-slot plates, clamping solutions, industrial and DIY CNC spare parts and accessories. <https://vacuumtables.co.uk>.
7. Pinchevska, O., & Šmidriakova, M. (2016). Wood particleboard covered with slices made of pine tree branches. *Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen*, 8(1), 67–74. doi:10.17423/afx.2016.58.1.08.
8. Engineering systems. <https://dosingtech.com.ua/product/vozduhoduvka-seko-bl06000102200-2-2-kw-3ph-2-318-m3-ch-0-mbar-180-m3-ch-190-mbar>.
9. Kalchenko, V.V., Yeroshenko, A.M., & Boyko, S.V. (2017). Mathematical modeling of abrasive grinding working process. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (6), 76–82.
10. Kalchenko, V., Yeroshenko, A., Boyko, S., & Kalchenko, O. (2021). Modelling of contact geometry of tool and workpiece in grinding process with crossed axes of the tool and workpiece with circular profile. *Acta Mechanica et Automatica*, (15(1)), 9–15. doi:10.2478/ama-2021-0002.
11. Herranz, S., Campa, F.J., Lopez de Lacalle, L.N., Rivero, A., Lamikiz, A., Ukar, E., Sanchez, J.A., & Bravo, U. (2005). The milling of airframe components with low rigidity: a general approach to avoid static and dynamic problems. *Prod Institution Mechanical Eng. Part B. J. Eng. Manuf.*, 219(11), 789–80.
12. Kolar, P., Sveda, J., & Koubek, J. (2017). *Clamping of Thin-Walled Curved Workpieces, Intelligent Fixtures for the Manufacturing of Low Rigidity Components* (pp. 81-98). Springer, Switzerland. doi:10.1007/978-3-319-45291-3.
13. Graham, T. Smith. (1993). *CNC Machining Technology*. Volume I: Design, Development and CIM Strategies. Springer London. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-2051-3>.
14. Wan, N., Wang, Z. & Mo R. (2013). An intelligent fixture design method based on smart modular fixture unit. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 69(9-12), 2629–2649.
15. Chen, W., Luo, X., Su, H., & Wardle, F. (2015). An integrated system for ultraprecision machine tool design in conceptual and fundamental design stage. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1-7.
16. Gothwal, S., Raj, T. (2017). Different aspects in design and development of flexible fixtures: Review and future directions. *International Journal of Services and Operations Management*, 26(3), 386-410. doi:10.1504/ijssom.2017.10002780.
17. Vacuum Clamping Technology for the Metal and Sheet Metal Industry. <https://www.schmalz.com/en-at/vacuum-clamping-technology/industries-and-applications/metal-and-sheet-metal>.
18. Manzoor, T., Khalil, S., Khan, I., Gohar, G.A., & Abid, M. (2017). Design and Development of Flexible Vacuum Clamping System for Thin Walled Cylindrical Object for CNC Machines. *Journal of Applied Mechanical Engineering*, 6(4), 1-10. doi:10.4172/2168-9873.100027.
19. Alquraan, T., Kuznetsov, Y., & Tsvyd, T. (2016). High-speed clamping mechanism of the CNC lathe with compensation of centrifugal forces. *Procedia Engineering*, (150), 689-695. doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.081.
20. Wang, J., Zhang, J., Feng, P., Wu, Z., Zhang, G. (2015). Modeling and simulation for the critical bending force of power chucks to guarantee high machining precision. *Int J Adv Manuf Tech.*, 79, 1081-1094.

Отримано 02.05.23

**Eduard Zuban<sup>1</sup>, Sergiy Boyko<sup>2</sup>, Andriy Yeroshenko<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>graduate of the Department of Mechanical Engineering and Woodworking Technologies  
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

**E-mail:** [zubanedik@gmail.com](mailto:zubanedik@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-2801-8929>

<sup>2</sup>PhD in Technical Sciences,

Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering and Woodworking Technologies  
Chernihiv National University of Technology (Chernihiv, Ukraine)

**E-mail:** [svboyko.cstu@gmail.com](mailto:svboyko.cstu@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-8341-6973>

<sup>3</sup>PhD in Technical Sciences,

Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering and Woodworking Technologies  
Chernihiv National University of Technology (Chernihiv, Ukraine)

**E-mail:** [yeroshenkoam@gmail.com](mailto:yeroshenkoam@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-1629-9516>

## **DEVELOPMENT OF THE VACUUM TABLE DESIGN FOR A CNC MILLING MACHINE FOR WOOD PROCESSING**

*Recently, low-power CNC machines for processing wood, plastic and soft metals have become very popular. They found their application not only in large productions, but also in home use in small workshops. The total processing time is significantly increased due to the time spent on fixing the workpiece to the table. In addition, this type of machine is used for cutting and processing sheet materials, during fixing of which deformation occurs due to their insufficient rigidity and, as a result, low processing accuracy and increased processing allowances. Therefore, there is a need to increase the clamping area of such workpieces, and since the use of clamps is possible only along the perimeter of the workpiece, there is a need to search for new, effective methods of fixing.*

*The basic equipment of woodworking machines with CNC includes only standard clamping devices. Equipping with more modern and efficient clamping systems is made to order and requires additional resources, as the machines have different working fields and cutting power. The article shows the results of the design of a vacuum table for a CNC milling machine, which was developed at the Department of Mechanical Engineering and Woodworking Technologies of Chernihiv Polytechnic National University. The necessary equipment has been selected; efforts and fixing time have been calculated; a CAE analysis of the deformations of the workpiece with different fixing methods was performed.*

**Key words:** thin-walled workpieces; fastening forces; deformations; vacuum pump; CAE analysis.

*Fig.: 5. Table: 1. References: 20.*

**Олег Осадчий<sup>1</sup>, Валерія Парненко<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> магістр, кафедра конструювання машин  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)  
E-mail: [Oleg.Osadchiy-mmi22@iit.kpi.ua](mailto:Oleg.Osadchiy-mmi22@iit.kpi.ua)

<sup>2</sup> кандидат технічних наук, старший викладач кафедри конструювання машин  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)  
E-mail: [valeri.parnenko@gmail.com](mailto:valeri.parnenko@gmail.com), ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1450-2744>, Scopus Author ID: [57217101654](https://scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57217101654)

**ДИЗАЙН ВИРОБІВ МАШИНОБУДУВАННЯ ТА ВИБІР МАТЕРІАЛІВ  
ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОСТІ ЇХ КОНСТРУКЦІЙ**

*Технологічність конструкції виробів машинобудування є важливим аспектом у виробництві сучасних машин та обладнання. Стаття є оглядово-інформаційною. У статті розглянуто важливість вибору матеріалів на початковому етапі дизайну виробу машинобудування і вказується на їх безпосередній вплив на технологічність та ефективність виробництва. Також висвітлюються різноманітні фактори, які необхідно враховувати при виборі матеріалів, такі як властивості матеріалів, технологічні вимоги, вартість та доступність. Наведені основні типи матеріалів, які використовуються в машинобудуванні, такі як метали, полімери, композити та кераміка розглянуті їх переваги, недоліки та застосування. Вказані виклики, з якими стикаються виробники, а також на перспективи майбутнього розвитку в галузі вибору матеріалів для машинобудування.*

**Ключові слова:** технологічність; конструкція; виробу машинобудування; дизайн; якість; технологічні тенденції; матеріали; проектування; DFM.

Рис.: 2. Бібл.: 9.

**Актуальність теми статті.** Машинобудування є однією з найважливіших галузей промисловості, яка забезпечує розвиток різних секторів економіки, включаючи промисловість, транспорт, сільське господарство та багато інших. Однак у сучасному конкурентному середовищі виробництва, успіх машинобудівного підприємства значною мірою залежить від технологічності конструкції його виробів.

Представлена у статті інформація має оглядово-інформаційний характер. Технологічність конструкції виробів машинобудування є критичним фактором, який визначає ефективність та якість виробництва. Вона включає в себе використання передових технологій, матеріалів, методів та процесів для розробки та виготовлення високоякісних виробів. Технологічність впливає на швидкість виробництва, ефективність використання ресурсів, зниження витрат, надійність та тривалість служби виробів.

**Постановка проблеми.** У сфері машинобудування виробники постають перед проблемою вибору оптимальних матеріалів для виготовлення виробів. Правильний вибір матеріалу має велике значення для забезпечення технологічності виробництва, його ефективності, маси та міцності виробів, термо- та корозійної стійкості. Одна з основних проблем полягає в тому, що є велика кількість матеріалів, доступних для використання в машинобудуванні, і кожен із них має свої особливості, переваги та обмеження. Виробники повинні враховувати такі фактори, як властивості матеріалів, їхню вартість, доступність на ринку, технологічні вимоги та виробничі обмеження.

Крім того, розвиток нових матеріалів та технологій виробництва створює постійну потребу у знаходженні оптимальних рішень. Виробники повинні орієнтуватися в останніх тенденціях у галузі матеріалознавства та машинобудування, а також проводити відповідні дослідження та тестування для визначення властивостей матеріалів та їхньої придатності для конкретних виробів.

Недостатня увага до проблеми вибору матеріалів може призвести до недосягнення оптимальних результатів виробництва. Неправильний вибір матеріалу може призвести до підвищених витрат на виробництво, зменшення якості виробів, проблем з експлуатацією та недостатньою конкурентоспроможністю на ринку.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Поняття дизайну виробів машинобудування для забезпечення їх технологічності (або використовуючи англomовну термінологію Design for manufacturability (DFM)) є частиною загальної методології проектування

«дизайн для X» (або DFX) [1]. Ця методологія або підхід до проектування, який базується на знаннях, використовуючи які можна розробляти вироби, що мають усі бажані характеристики у своєму дизайні, такі як висока якість, надійність, зручність обслуговування, безпека, зручність для користувача, екологічність і короткий час від проектування до виходу на ринок. Причому витрати на виробництво такого виробу та витрати на обслуговування протягом усього терміну служби мінімальні [2].

Принципи проектування для технологічності (DFM) і їх застосування насправді не є новими [3]. Інженери-конструктори усвідомлювали важливість проектування виробів, які б були дешевими, простими у виготовленні. Однак використання терміну «дизайн» для позначення технологічності, визнання його як гідного інженерного підходу та розробка організованої методології DFM з'явилися зовсім недавно [2].

Дизайн виробів машинобудування для забезпечення їх технологічності включає будь-який етап, метод або систему, яка забезпечує дизайн виробу, що полегшує завдання виробництва та знижує витрати на виробництво. У дещо більш конкретному сенсі DFM – це передусім техніка, заснована на знаннях, яка використовує вказівки, принципи, рекомендації або практичні правила для проектування виробу, щоб його було легко зробити [2]. Ці вказівки зазвичай сприяють багатьом загальним атрибутам виробу — правильному функціонуванню, надійності, гарному зовнішньому вигляду, зручності обслуговування тощо, — але їхньою основною метою є покращення технологічності.

**Мета статті.** Головний аспект, який розглядається в статті, – це важлива роль вибору матеріалів на початковій стадії дизайну виробу в концепції загальної методології проектування для технологічності (DFM).

Стаття є оглядово-інформаційною та охоплює такі аспекти:

- важливість вибору матеріалів у машинобудуванні, чому вибір матеріалів має вирішальне значення для досягнення технологічних цілей у виробництві машинобудівних виробів;
- огляд основних факторів, які варто враховувати при виборі матеріалів, таких як властивості матеріалів, технологічні вимоги, вартість, доступність та екологічні аспекти;
- огляд різних типів матеріалів, які використовуються у машинобудуванні, таких як метали, полімери, композити та кераміка, з обговоренням їхніх переваг, недоліків та застосувань;
- висвітлення основних викликів, з якими стикаються виробники при виборі матеріалів, таких як швидкий технологічний розвиток, стандартизація та регулювання, а також вказівки на перспективи майбутнього розвитку в цій галузі.

Мета статті полягає в тому, щоб окреслити проблеми вибору матеріалів у машинобудуванні та показати стратегії, які можуть допомогти вирішити ці проблеми та забезпечити технологічність виробів машинобудування.

**Виклад основного матеріалу.** Під час розробки виробу інженери-конструктори мали тенденцію недооцінювати або не помічати вище згаданих факторів, зосереджували свої зусилля лише на трьох факторах: функції (продуктивності), характеристиках і зовнішньому вигляді виробу. Вони, як правило, нехтували тим, як зручно буде використовувати виріб протягом терміну його служби або яка буде його вартість.

Першим важливим кроком в дизайні виробу для забезпечення його технологічності є ранній вибір комбінацій матеріалів і процесів для виготовлення деталей, які потім можна ранжувати за різними критеріями [2; 3].

Вибір матеріалів є головним визначальним фактором для успішного функціонування та можливого, недорогого виробництва будь-якого продукту. У деяких випадках при виборі матеріалу виникає реальний конфлікт між функціональністю та вартістю.

Є реальна потреба в економії витрат на матеріали, оскільки для більшості продуктів ці витрати становлять основну частину від загальної суми [4; 5]. Однак метою є не обов'язково мінімальна вартість матеріалів, а мінімальна загальна вартість, яка включає

початкову ціну матеріалу, вартість обробки та складання його з іншими матеріалами у виріб, вартість гарантування довговічності продукту та його обслуговування, і т. д. Таким чином, у довгостроковій перспективі найдешевший матеріал може не бути матеріалом із найнижчою ціною [5].

Більшість інженерних матеріалів можна класифікувати за однією з трьох основних категорій: метали, кераміка та полімери. Їхній хімічний склад різний, механічні та фізичні властивості різні, і ці відмінності впливають на виробничі процеси, які можуть використовувати для виготовлення виробів з них. На додаток до трьох основних категорій існують композити – неоднорідні суміші інших трьох основних типів, а не єдина категорія (рис. 1) [3; 6].

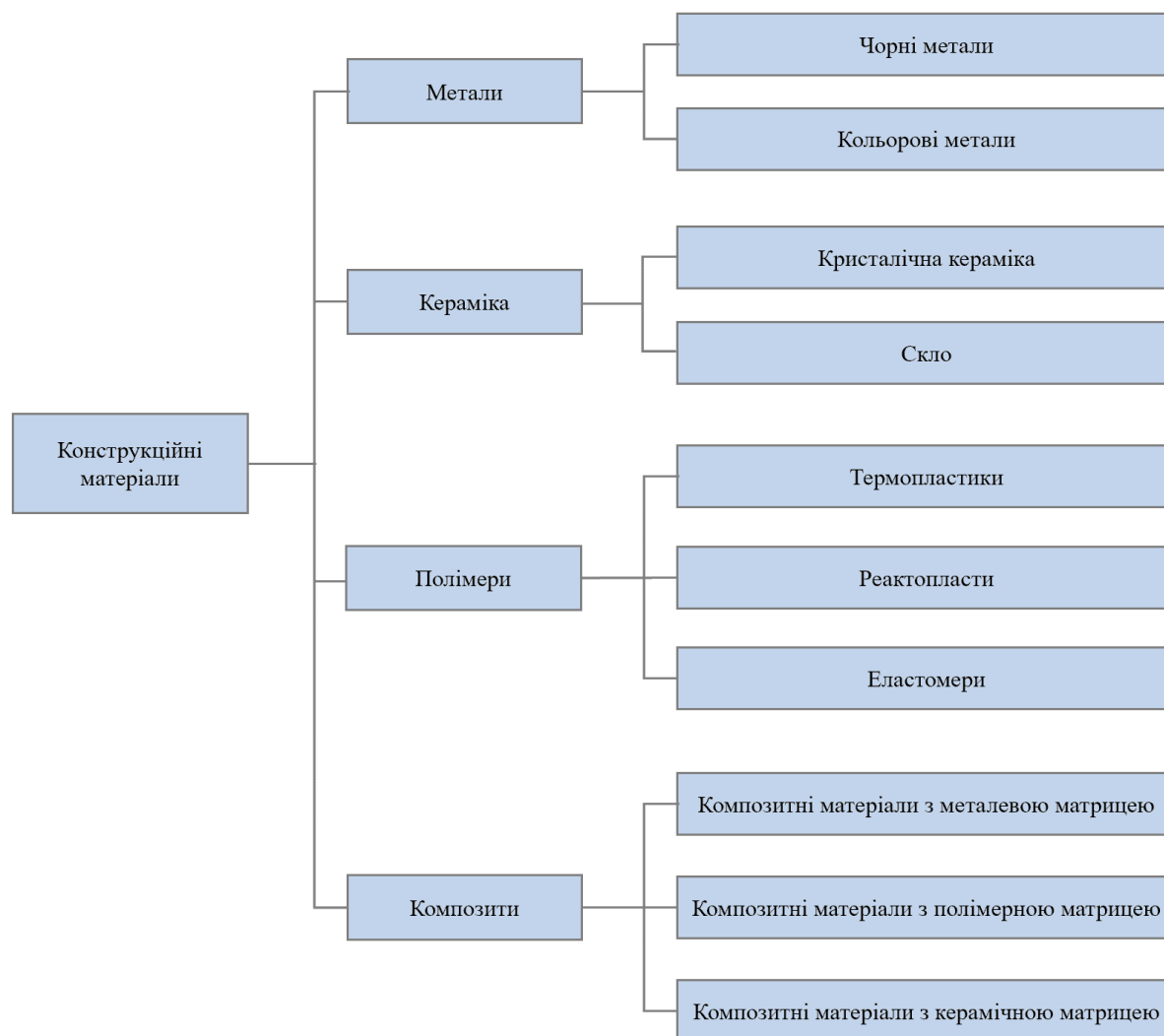


Рис. 1. Різноманітність конструкційних матеріалів

Джерело: адаптовано із [3].

На жаль, розробники схильні розглядати деталі з погляду процесів і матеріалів, з якими вони найкраще знайомі, і, як наслідок, вони можуть виключити з розгляду матеріали та комбінації процесу/матеріалу, які могли б виявитися більш економічними. Можливості для значного вдосконалення виробництва можуть бути втрачені через такий обмежений вибір відповідних матеріалів на ранніх стадіях розробки продукту.

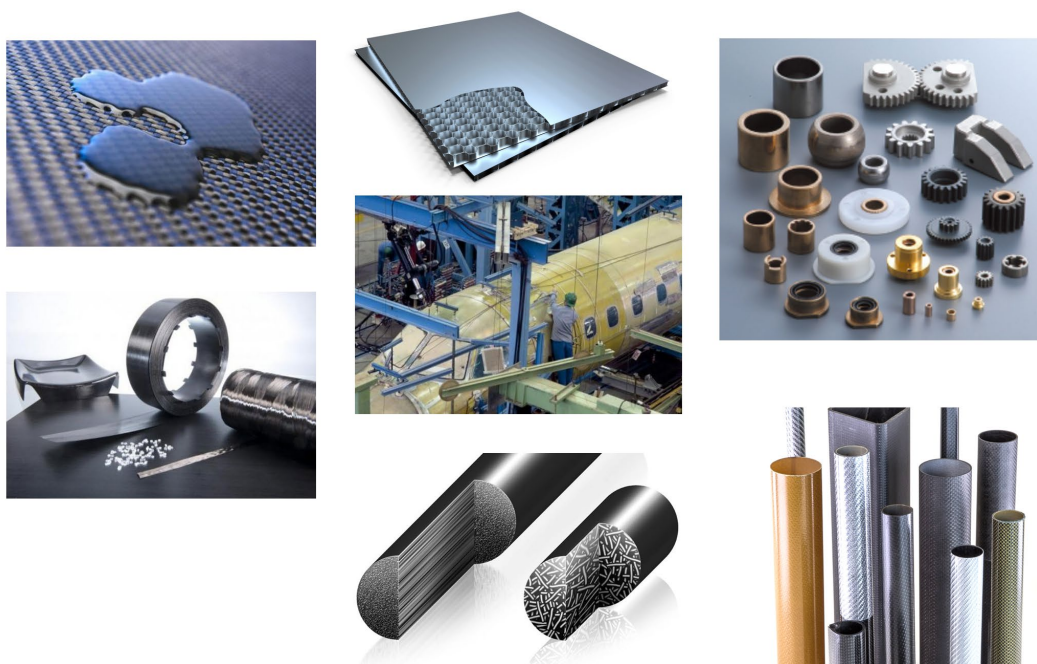
Наприклад, використання композитних матеріалів замість традиційних металів може дозволити зменшити вагу виробу при збереженні необхідної міцності [5; 6] (рис. 2). Композитні матеріали мають кілька переваг у порівнянні з традиційними металами. Основні переваги композитних матеріалів полягають у таких характеристиках.

1. Висока міцність при низькій вазі. Композитні матеріали володіють високою міцністю та жорсткістю при значно меншій масі порівняно з традиційними металами. Це дозволяє знизити вагу кінцевого продукту, що впливає на його енергоефективність та економію палива [6; 7].

2. Висока корозійна стійкість. Композитні матеріали можуть бути стійкими до корозії та хімічних впливів. Особливо важливою є їх висока стійкість до корозії у вологому середовищі, де традиційні метали можуть піддаватися руйнуванню [8].

3. Гнучкість дизайну. Композитні матеріали дозволяють більшу свободу у дизайні продукту, оскільки їх можна формувати у складні геометричні форми. Це дозволяє виробляти продукти з високою міцністю та низькою масою, що особливо корисно у виробництві авіаційних та автомобільних компонентів [8].

4. Електроізоляція. Композитні матеріали на основі полімерних та керамічних матриць є відмінними електричними та тепловими ізоляторами. Це робить їх особливо цінними для використання в електроніці та електричних системах, де необхідно уникнути перенесення електричного струму [9].



*Рис. 2. Різноманітність використання композитних матеріалів*

Джерело: з відкритих джерел Інтернету.

Вартість одиниці матеріалів є важливим фактором, коли порівнювані методи включають використання різних кількостей або різних форм кількох матеріалів. Наприклад, вартість матеріалів литої під тиском алюмінієвої деталі, ймовірно, буде більшою, ніж вартість чавунної деталі для того самого застосування. Інженерний пластик для деталі може мати ще більшу вартість. Процеси порошкового металу використовують меншу кількість дорогих матеріалів, ніж процеси лиття та механічної обробки. Крім того, втрати на брут можуть значно вплинути на вартість матеріалів [1; 3].

Для досягнення найменших витрат на матеріали, забезпечення технологічності виробу пропонуються наступні загальні рекомендації щодо правила вибору матеріалів [1]:

1. Використовуйте комерційно доступні форми заготовок, такі як прутки, дроти, балки, рейки, листи та інше, щоб мінімізувати внутрішньозаводські операції.

2. Використовуйте стандартні форми, розміри або готові формування заготовок, а не спеціальні, коли це можливо. Іноді більш важкі заготовки зі стандартного матеріалу коштують дешевше, ніж менші або точніші заготовки спеціального матеріалу.

3. Обов'язково розглядайте використання попередньо обробленого матеріалу як засобу економії витрат на операції обробки поверхні готового компоненту.

4. Вибирайте якомога більше матеріалів (відповідно до функціональних вимог) для технологічності. Наприклад, використовуйте сплави вільної механічної обробки для оброблених деталей, сплави, що легко формуються, для штампувань тощо. Варто витратити час, щоб визначити, який різновид основного матеріалу найбільше підходить для послідовності обробки, яка буде використовуватися.

5. Розробляйте виріб для максимального використання матеріалу. Зробіть кінці, наприклад, квадратними, а не спеціальної форми, щоб зменшити витрати на механічну обробку та брут.

6. Уникайте конструкцій, які за своїм дизайном можуть бути з високим рівнем браку.

DFM не є фіксованою системою. Ця система постійно вдосконалюється як в рамках університетських науково-дослідних проєктів, так і деякими компаніями. Метою майже всіх розробок є зробити рекомендації більш доступними для дизайнерів і легшими для застосування. Крім того, що ще важливіше, оцінки ставляться на кожну рекомендацію, щоб розробник міг визначити, скільки витрат можна досягти, якщо включити конкретну рекомендацію. Усі ці досягнення залежать від використання комп'ютерів. Комп'ютеризація – це рух, що розвивається зараз в DFM [1, 2].

Інженери-конструктори, інженери-виробники та промислові інженери під час аналізу альтернативних методів виробництва частини чи продукту загалом або виконання окремої операції чи всього процесу стикаються зі змінними вартості, які стосуються матеріалів, прямої праці, непрямой праці, спеціального інструменту, інструментів та приладдя, що швидко псуються, комунальних послуг та інвестованого капіталу. Взаємозв'язок цих змінних може бути значним, і тому порівняння альтернатив при виборі матеріалів має бути детальним і повним, щоб належним чином оцінити їхній повний вплив на загальні витрати на одиницю продукції.

**Висновки.** Вибір матеріалів є критичним етапом у машинобудуванні, оскільки він має прямий вплив на технологічність, ефективність та якість виробів. Необхідно враховувати різноманітні фактори при виборі матеріалів, такі як властивості матеріалів, технологічні вимоги, вартість та доступність. Категорії матеріалів у машинобудуванні включають метали, полімери, композити та кераміку, кожна з яких має свої переваги та обмеження, тому інженери-конструктори повинні знати останні тенденції в галузі матеріалознавства та машинобудування, проводити дослідження та тестування для визначення властивостей матеріалів.

Проблеми вибору матеріалів можуть бути вирішені за допомогою наукових досліджень, співпраці з постачальниками та розробки нових технологій.

Майбутні перспективи включають швидкий технологічний розвиток, вдосконалення процесів вибору матеріалів та розвиток нових матеріалів з унікальними властивостями.

Загалом, правильний вибір матеріалів є важливим кроком для забезпечення технологічності виробів машинобудування, і вимагає системного підходу, наукових досліджень та постійного оновлення знань у галузі матеріалознавства та технологій виробництва.

#### Список використаних джерел

1. Bralla James G. Design for Manufacturability Handbook / Bralla James G. – The McGraw-Hill Companies, Inc, 1999. – 1296 p.
2. Boothroyd, G. Product Design for Manufacture and Assembly / G. Boothroyd, P. Dewhurst, W. A. Knight – Taylor & Francis Group, 2011. – 712 c.
3. Groover, M. P. Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems / M. P. Groover. – Wiley, 2007. – 1025 c.



4. Youssef H. A. *Machining technology: machine tools and operations* / H. A. Youssef, H. El-Hofy. – Taylor & Francis Group, 2008. – 672 p.
5. Smith, R. L. *Foundations of materials science and engineering* / R. L. Smith, J. Hashemi. – McGraw-Hill Education, 2006. – 1088 p.
6. Дослідження точності отворів у волокнистих полімерних композиційних матеріалах при обробці свердлами з дискретними покриттями глобулярного типу на робочій поверхні / Є. Корбут, В. Парненко, Т. Ніколаєнко, О. Плівак // *Технічні науки та технології*. – 2022. – №1(27). – С. 101-107. DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-1\(27\)-101-107](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-1(27)-101-107).
7. Barbero E. J. *Introduction to Composite Materials Design* / Ever J. Barbero. – CRC Press, 2017. – 570 с.
8. Dieter G. E. *Engineering design* / G. E. Dieter, L. C. Schmidt. – McGraw-Hill Education, 2017. – 880 p.
9. Chawla K. K. *Composite Materials Science and Engineering* / K. K. Chawla. – Springer Science+Business Media New York, 2013. – 590 p.

### References

1. Bralla James G. (1999). *Design for Manufacturability Handbook, 2nd Edition*. The McGraw-Hill Companies, Inc.
2. Geoffrey Boothroyd, Peter Dewhurst, Winston A. Knight. (2011). *Product Design for Manufacture and Assembly*. CRC Press. Taylor & Francis Group.
3. Mikell P. Groover. (2007). *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems*. Wiley.
4. Youssef, Helmi A., & Hassan, El-Hofy (2008). *Machining technology: machine tools and operations*. Taylor & Francis Group.
5. Smith, R. L., & Hashemi, J. (2006). *Foundations of materials science and engineering*. McGraw-Hill Education.
6. Korbut, Ye., Parnenko, V., Nikolaienko, T., & Plivak, O. (2022). Doslidzhennia tochnosti otvoriv u voloknystykh polimernykh kompozytsiinykh materialakh pry obrobsi sverdlamy z dyskretnymy pokryttiamy hlobuliarnoho typu na robochii poverkhni [Study of the accuracy of holes in fibrous polymer composite materials during processing with drills with discrete coatings of the globular type on the working surface]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies*, (1(27)), 101–107. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-1\(27\)-101-107](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-1(27)-101-107).
7. Ever, J. Barbero. (2017). *Introduction to Composite Materials Design*. 3rd Edition. CRC Press.
8. Dieter, G.E., & Schmidt, L.C. (2017). *Engineering design*. McGraw-Hill Education.
9. Krishan, K. Chawla. (2013). *Composite Materials Science and Engineering*. Springer Science+Business Media New York.

Отримано 12.06.23

UDC 62-1/-9

**Oleh Osadchyi<sup>1</sup>, Valeriia Parnenko<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Master of Science, Department of Machine Design  
National Technical University of Ukraine “Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)  
E-mail: [Oleg.Osadchiy-mm22@lil.kpi.ua](mailto:Oleg.Osadchiy-mm22@lil.kpi.ua)

<sup>2</sup>PhD in Technical Sciences, Senior Lecturer, Department of Machine Design  
National Technical University of Ukraine “Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)  
E-mail: [valeri.parnenko@gmail.com](mailto:valeri.parnenko@gmail.com). ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1450-2744>. Scopus Author ID: [57217101654](https://orcid.org/57217101654)

## DESIGN FOR MANUFACTURABILITY AND SELECTION OF MATERIALS OF MECHANICAL ENGINEERING PRODUCTS

*The technology of engineering products is a very important factor that determines the efficiency and quality of production. The concept of manufacturability embodies the use of advanced technologies, materials, methods and processes for the development and manufacture of high-quality products. At the initial stage of product design, the designers are faced with the problem of choosing the optimal materials. The correct choice of material is of great importance to ensure production manufacturability, production efficiency, weight reduction and increase product strength, heat resistance and corrosion resistance. One of the main challenges is that there is a large number of materials available for use in mechanical engineering, and each*

---

**TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES**

---

*has its own characteristics, advantages, and limitations. Insufficient attention to the problem of material selection can lead to failure to achieve optimal production results. The wrong choice of material can lead to increased production costs, reduced product quality, problems with operation and insufficient competitiveness in the market.*

*The article is an overview and information. The main aspect considered in the article is the important role of material selection at the initial stage of product design in the concept of the general methodology of design for manufacturability (DFM). The purpose of the paper is to outline the problems of material selection in mechanical engineering and to show strategies that can help solve these problems and ensure the manufacturability of mechanical engineering products.*

*To achieve the lowest costs for materials to ensure the manufacturability of the product, some general rules for choosing materials are proposed. Prospects include rapid technological development, improvement of material selection processes, and development of new materials with unique properties.*

*In general, the correct choice of materials is an important step to ensure the manufacturability of engineering products, and requires a systematic approach, scientific research, and constant updating of knowledge in the field of materials science and production technologies.*

**Keywords:** *manufacturability; construction; engineering products; design; quality; technological trends; materials; designing; DFM.*

*Рис.: 2. Бібл.: 9.*

**Єгор Трачук<sup>1</sup>, Микола Швед<sup>2</sup>, Дмитро Швед<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>студент-магістрант кафедри машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв  
Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)  
E-mail: [yehor.trachuk@gmail.com](mailto:yehor.trachuk@gmail.com), ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1802-2058>

<sup>2</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв  
Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)  
E-mail: [npchved46@gmail.com](mailto:npchved46@gmail.com), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7725-1447>

<sup>3</sup>кандидат технічних наук, провід. інженер кафедри машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв  
Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)  
E-mail: [npchved46@gmail.com](mailto:npchved46@gmail.com), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6860-3017>

**ОПТИМІЗАЦІЯ КАСКАДНОЇ СХЕМИ ВИСОКОШВИДКІСНОЇ ЕКСТРУЗІЇ**

*Розробка та впровадження ресурсо- та енергоефективних технологій у сфері переробки пластмас є необхідною умовою для сталого розвитку людства. Стаття є оглядовою та присвячена оптимізації процесів, що відбуваються при екструзії композиційних матеріалів на базі полімерів. Проаналізовано сучасні пропозиції на ринку екструзійного обладнання та запропоновано використовувати більш енергоефективну, порівняно з представленими, каскадну дискову-шестеренну схему екструзії, яка має зворотний зв'язок з приводом дозатора, що дає змогу в автоматичному режимі узгоджувати продуктивність дозатора та шестеренного насоса. Запропонована схема є енергоефективною та дозволяє виготовляти погонажні вироби з мінімальними допусками на розміри.*

**Ключові слова:** ресурсоенергозбереження; високошвидкісна екструзія; каскадна схема екструзії; дисковий екструдер; шестеренний насос.

Табл.: 2. Рис.: 3. Бібл.: 12.

**Актуальність теми дослідження.** Пластмаси є одним із найбільш поширених матеріалів. Завдяки своїм високим техніко-економічним показникам цей клас матеріалів використовується майже у всіх галузях промисловості та побуту, саме тому, станом на 2020 рік світовий обсяг виробництва пластмасових виробів становив 367 млн тонн [1]. Аналіз сучасних тенденцій та перспектив розвитку цієї галузі пророкує що станом на 2030 рік ринок полімерних матеріалів буде становити 1078,5 млрд дол., при показнику 713 млрд дол. на 2021 рік [2].

Водночас актуальність проблеми переробки пластмас підтверджується дуже високим рівнем уваги до цього сектору економіки з боку природоохоронних організацій, оскільки пластмасові вироби безпосередньо впливають на цілі сталого розвитку під номерами 8, 9, 11-14 [3].

Зважаючи на вищезазначене, створення нового та оптимізація наявного обладнання для переробки полімерів із використанням економічно обґрунтованих, високопродуктивних, ресурсоенергоощадних процесів є необхідними для забезпечення сталого розвитку суспільства.

**Постановка проблеми.** Нині найбільш актуальною проблемою в галузі переробки полімерів методом екструзії є забезпечення якомога кращих показників ресурсоенергоефективності обладнання. При цьому дуже активно розвивається напрямок створення композицій на основі полімерів, що потребує від екструзійних ліній більшої гнучкості в керуванні, оскільки на основі одного полімеру може бути розроблена велика кількість композицій, що відрізняються за своїми характеристиками [4].

Найпоширеніші на цей момент одночерв'ячні екструдери в змозі ефективно переробляти лише той матеріал, для якого вони були спроектовані. Переробка матеріалів, що відрізняються за характеристиками, є ускладненою або взагалі не може бути реалізована на таких машинах, оскільки всі операції, з яких складається процес екструзії, жорстко пов'язані між собою і виконуються одним робочим органом. Існуюча фізична модель процесів, які відбуваються в черв'ячних екструдерах, являє собою структуру з підмоделями зон дозування, плавлення та гомогенізації. Такий поділ є приблизним, оскільки він не враховує складний характер взаємодії між зонами та процесами, що в них відбуваються [5].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Перелічені вище обставини призвели до того, що на сьогодні у промисловості дедалі більшого поширення набувають екструзійні лінії, виконані за каскадним принципом. Найбільшого поширення набули каскадні машини, що складаються з двох екструдерів. В одних випадках перший екструдер призначений для підготовки якісного розплаву, а другий – для його дозування. Іншим варіантом є схема, при якій перший екструдер готує агломерат, а другий – призначений для кінцевого доведення розплаву та дозування його до формуючого елемента [6].

Аналіз ринку екструзійного обладнання [7; 8] показав, що більшим попитом користуються схеми першого типу, де на першій стадії встановлюється високошвидкісний двочерв'ячний екструдер, частота обертання органів якого може сягати 600 об/хв, а на другій – одночерв'ячний, що працює при нормальних, або понижених обертах (65-85 об/хв). Порівняльна характеристика сучасних екструзійних машин наведена в таблиці 1.

Таблиця 1 – Порівняльна характеристика сучасних ліній каскадної екструзії

Виробник	Модель	Тип екструдера	Частота обертання	Потужність	Сумарна потужність	Продуктивність	Питома витрата енергії
			об/хв	кВт	кВт	кг/год	кВт · год/кг
Nanjing Haisi Extrusion Equipment Co.	SP50-120	Двочерв'ячний	500	45	82	300	0,273
		Одночерв'ячний	85	37			
	SP65-150	Двочерв'ячний	500	75	120	500	0,240
		Одночерв'ячний	85	45			
	SP75-180	Двочерв'ячний	500	110	165	600	0,275
		Одночерв'ячний	85	55			
Nanjing Yongteng Chemical Equipment Co	SHJS50-120	Двочерв'ячний	500	45	82	300	0,273
		Одночерв'ячний	85	37			
	SHJS65-150	Двочерв'ячний	500	75	120	500	0,240
		Одночерв'ячний	85	45			
	SHJS75-180	Двочерв'ячний	500	110	165	600	0,275
		Одночерв'ячний	85	55			

При виготовленні композиційних термопластичних матеріалів етап гомогенізації є визначальним, оскільки саме від якості перемішування компонентів між собою залежать характеристики отриманого виробу. Саме тому наведені вище виробники застосовують високошвидкісні двочерв'ячні екструдери, у яких у матеріалі розвиваються великі швидкості зсуву, що забезпечують необхідний рівень нагрівання та гомогенізації розплаву.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Якісний, з можливістю регулювання гомогенного складу, розплав полімеру можна підготувати, використовуючи набагато простіший за конструкцією каскадний дисково-черв'ячний екструдер (рис. 1) [9], де як розплавлювач-гомогенізатор використовують дисковий екструдер із дозованим живленням, що працює в автогенному режимі, а для створення тиску та дозування – одночерв'ячний екструдер завдовжки 5-7 діаметрів. Теоретичні й експериментальні дослідження з удосконалення процесів екструзії, які проводяться на кафедрі МАХНВ КПІ ім. Ігоря Сікорського, показали, що процеси плавлення ефективніше проводити в полі високих швидкостей зсуву при незначних тисках, тобто реалізуючи модель дисперсійного плавлення, яка у 4-5 разів ефективніша за класичну пробкову модель плавлення Тадмора й полягає в тому, що частинки твердого полімеру дисперговані в його розплаві [10].

Реалізувати таку модель можливо в дисковому екструдері, що працює при дозованому живленні. Це дозволяє оперативно, без зупинки процесу, не змінюючи продуктивність підвищувати або знижувати температуру розплаву, регулюючи термомеханічне навантаження на перероблюваний матеріал, що рівносильно для звичайного черв'ячного екструдера устанавленню нового черв'яка. Причому, якщо технологічно необхідно змі-

нити температуру чи швидкість зсуву в зонах сухого тертя і напіврозплаву, тобто на периферії диска, то доцільно використовувати можливість зміни частоти обертання дискового екструдера в межах  $\pm 20\%$  від номінального значення. А якщо необхідно змінити навантаження на розплав, наприклад з метою покращення гомогенізації і диспергування, то ефективніше змінювати величину робочих зазорів у тих самих межах.

Параметри процесів у такому екструдері узгоджують не лише вибором геометричних розмірів робочих органів машини, а й роздільним підбором робочої швидкості дискового екструдера й величини робочих зазорів дискової зони при незмінній продуктивності дозатора.

Перероблюваний матеріал шнеком 1 з бункера дозується в завантажувальну горловину дискового екструдера 2, де захоплюється багатоканальною гвинтовою нарізкою диска. Під дією значних зусиль зсуву матеріал розігрівається, плавиться, змішується в робочих дискових зазорах А та подається для подальшої обробки до черв'ячного екструдера 3. Особливістю такого екструдера є те, що кожен з пристроїв оснащений своїм приводом з можливістю безступінчастого регулювання кутової швидкості обертання робочих органів. Між дисковим екструдером та черв'ячним насосом встановлено компенсатор 10, який має зворотний зв'язок із приводом дозатора та узгоджує продуктивність дозатора і дозуючого черв'ячного насоса.

Представлена схема організації процесу екструзії дозволяє дуже гнучко регулювати як температуру, так і гомогенність розплаву за допомогою можливості зміни частоти обертання дискового екструдера й величини дискового зазору при постійній продуктивності.

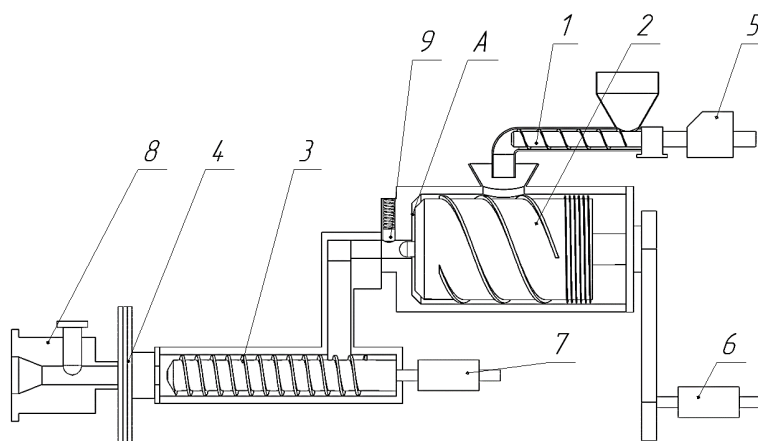


Рис. 1. Схема каскадного дисково-черв'ячного екструдера:

- 1 – шнековий дозатор; 2 – дисковий екструдер; 3 – черв'ячний екструдер; 4 – фільтр;  
5, 6, 7 – приводи обертових органів каскадного екструдера;  
8 – технологічна головка; 9 – компенсатор.

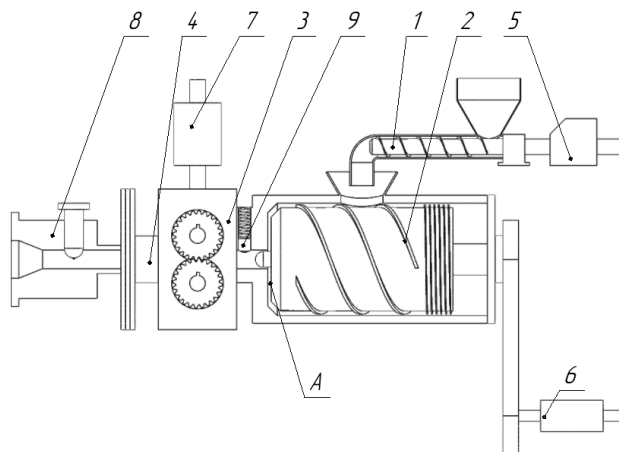
Джерело: [9].

При всіх перелічених перевагах наведена схема має один суттєвий недолік. При виготовленні погонажних виробів, таких як труби, кабелі, плівки тощо, дуже важливу роль відіграють коливання тиску та продуктивності на виході з черв'ячного екструдера. Саме від них залежать показники ефективності використання ресурсів, оскільки збільшені коливання призводять до збільшення допусків на геометричні розміри виробів і відповідно до перевитрати сировини. Для одношнекового екструдера, де дозування розплаву відбувається фактично в'язкісним черв'ячним насосом, енергоефективність якого не перевищує 10 % найкращим показником є коливання продуктивності на рівні 5-8 % [11-12] (рис. 3, а).

**Метою статті** є визначення можливості та доцільності більш ефективної організації каскадної схеми переробки композиційних матеріалів із використанням дискового екструдера.

Доцільність досліджень за цією тематикою пояснюється тим, що частка композиційних матеріалів у виробництві постійно збільшується і промисловість потребує якомога більш ресурсо- та енергоощадного обладнання для їх ефективної переробки.

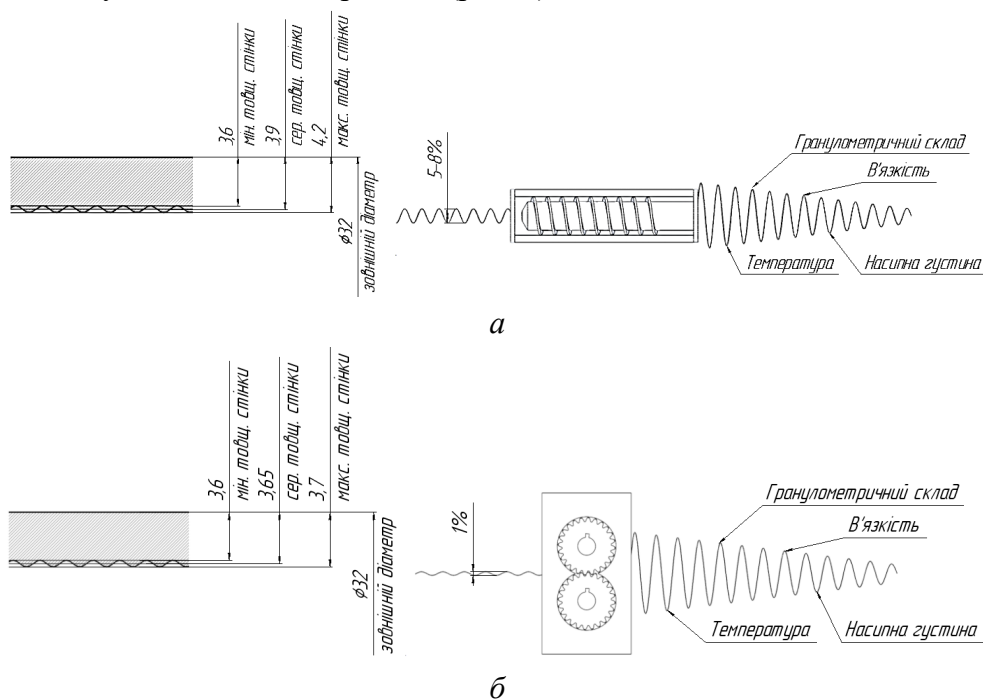
**Виклад основного матеріалу.** Силами кафедри МАХНВ КПІ імені Ігоря Сікорського наведена вище дисково-черв'ячну каскадну установку було модернізовано встановленням як дозуючий пристрій шестеренного насоса (рис. 2), який, маючи значний внутрішній гідравлічний опір, дозволяє згладити пульсації тиску та продуктивності, що викликані різними чинниками в попередніх процесах, і забезпечити більш точне дозування розплаву.



*Рис. 2. Схема каскадного дисково-шестеренного екструдера:  
1 – шнековий дозатор; 2 – дисковий екструдер; 3 – шестеренний насос; 4 – фільтр;  
5, 6, 7 – приводи обертових органів каскадного екструдера;  
8 – технологічна головка; 9 – компенсатор*

Джерело: [11].

У результаті проведених експериментальних досліджень при виробництві поліпропіленових труб діаметром 32 мм і запланованою середньою товщиною стінки труби  $3,6^{+0,6}$  мм було визначено, що середня товщина стінки зменшилась з 3,9 до 3,65 мм, що дозволило виготовляти трубу з меншими допусками на геометричні розміри та, відповідно, заощаджувати до 5,5 % сировини (рис. 3).



*Рис. 3. Коливання середньої товщини стінки труби діаметром  $32 \times 3,6$  залежно від дозуючого пристрою:*

*а – черв'ячний екструдер; б – шестеренний насос*

Джерело: розроблено авторами.

Отримані технічні параметри дисково-шестеренного екструдера (табл. 2), показують, що запропонована каскадна схема екструзії є більш енергоефективною за наведені насьогодні пропозиції на ринку, оскільки питома витрата енергії на кілограм готової продукції є мінімум на 17,7 % нижчою, ніж у конкурентів (0,1975 кВт год/кг проти 0,24 кВт год/кг).

Таблиця 2 – Технічна характеристика каскадного дисково-шестеренного екструдера

Тип робочого елементу	Частота обертання	Потужність	Сумарна потужність	Продуктивність	Питома витрата енергії
	об/хв	кВт	кВт	кг/год	кВт/кг
Черв'ячний дозатор	30	0,2	7,9	40	0,1975
Дисковий екструдер	175	5,5			
Шестеренний насос	65	2,2			

**Висновки.** Аналіз літературних матеріалів, а також проведені попередні експериментальні роботи на дослідній установці показали, що використання каскадних дисково-шестеренних екструдерів дозволяє більш ефективно використовувати енергію та ресурси, а також дає можливість:

- гнучко керувати процесом екструзії з можливістю незалежно оптимізувати окремі процеси;
- забезпечувати високу якість гомогенізації розплаву незалежно від продуктивності лінії;
- збільшити номенклатуру матеріалів, що перероблюються;
- забезпечити стабілізацію коливання тиску та продуктивності на рівні  $\pm 1$  %;
- заощаджувати до 6,4 % сировини і енергії, яка б пішла на її перероблення;
- здійснювати просту дегазацію розплаву через завантажувальну горловину дискового екструдера;
- за рахунок наявності кількох приводів раціонально перерозподіляти потужність між каскадами й тим самим покращувати питомі енергопоказники;
- ефективно використовувати енергію дисипації в дисковому екструдері;
- використовувати конструктивно простіші робочі органи.

#### Список використаних джерел

1. Plastics – the Facts 2021. Plastics Europe Enabling a sustainable future [Electronic resource]. – Access mode: <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2021>.
2. Polymers Market Size to Worth Around USD 1078.5 Billion by 2030 [Electronic resource] / GlobeNewswire. – Access mode: <https://www.globenewswire.com/en/news-release/2022/10/26/2542304/0/en/Polymers-Market-Size-to-Worth-Around-USD-1078-5-Billion-by-2030.html>.
3. Цілі сталого розвитку [Електронний ресурс] / Global Compact network Ukraine. – Режим доступу: <https://globalcompact.org.ua/pro-nas/tsili-stijkogo-rozvytku>.
4. Мікульонок І. О. Технологічні основи перероблення полімерних матеріалів : навч. посіб. / І. О. Мікульонок. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 293 с.
5. Радченко Л. Б. Переробка термопластів методом екструзії / Л. Б. Радченко. – Київ : ІЗМН, 1999. – 220 с.
6. Ковба А. М. Розроблення екструдера для модернізації установки виробництва полімерних гранул [Електронний ресурс] / А. М. Ковба. – Київ, 2019. – 137 с. – Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/31552>.
7. Soft/Rigid PVC Compounding Granules Making Machine [Electronic resource] / Nanjing Haisi Extrusion Equipment Co. – Access mode: <https://www.haisiextrusion.com/Soft-Rigid-PVC-Compounding-Granules-Making-Machine-pd6327554.html>.
8. SHJS 75/180 Two-stage Compounding Extrusion Line [Electronic resource] / Nanjing Yongteng Chemical Equipment Co. – Access mode: <http://yongtenggroup.com/content/?141.html#:~:text=Nanjing%20Yongteng%20Chemical%20Equipment%20Co.%2C%20Ltd>.

9. Швед Н. П. Разработка процессов экструзии термопластов на каскадных экструдерах : дис. ... канд. техн. наук / Н. П. Швед. – Киев, 1983. – 167с.

10. Переваги використання каскадних схем та дозуючих шестеренних насосів при екструзії полімерів / І. В. Луценко, Д. М. Швед, М. П. Швед, А. С. Богатир // Технологічний аудит та резерви виробництва. – 2013. – № 1/2(9). – С. 21-25.

11. Rauwendaal C. Polymer extrusion / C. Rauwendaal. – München : Carl Hanser Verlag, 2014. – 950 с.

12. Швед Д. М. Процес екструзії полімерів на каскадному дисково-шестеренному екструдері [Електронний ресурс] : дис. ... канд. техн. наук / Д. М. Швед. – Київ, 2017. – Режим доступу: [https://ela.kpi.ua/jspui/bitstream/123456789/19317/1/Shved\\_diss.pdf](https://ela.kpi.ua/jspui/bitstream/123456789/19317/1/Shved_diss.pdf).

### References

1. *Plastics – the Facts 2021*. Plastics Europe Enabling a sustainable future. (2021). <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2021>.

2. *Polymers Market Size to Worth Around USD 1078.5 Billion by 2030*. (2022, 26 October). GlobeNewswire. <https://www.globenewswire.com/en/news-release/2022/10/26/2542304/0/en/Polymers-Market-Size-to-Worth-Around-USD-1078-5-Billion-by-2030.html>.

3. Global Compact network Ukraine. (n.d.). *Tsili staloho rozvytku [Sustainable development goals]*. <https://globalcompact.org.ua/pro-nas/tsili-stijkogo-rozvytku>.

4. Mikulonok, I.O. (2020). *Tekhnolohichni osnovy pereroblennia polimernykh materialiv [Technological basis of polymer materials processing]*. KPI im. Ihoria Sikorskoho.

5. Radchenko, L.B. (1999). *Pererobka termoplastiv metodom ekstruzii [Processing of thermoplastics by extrusion]*. IZMN.

6. Kovba, A.M. (2019) *Rozroblennia ekstrudera dlia modernizatsii ustanovky vyrobnytstva polimernykh hranul [Extruder development to upgrade polymer pellet plant]* [Master's Thesis; Kyivskiy politekhnichnyi instytut imeni Ihoria Sikorskoho]. ELAKPI. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/31552>.

7. Soft/Rigid PVC Compounding Granules Making Machine. Nanjing Haisi Extrusion Equipment Co. (n.d.). <https://www.haisiextrusion.com/Soft-Rigid-PVC-Compounding-Granules-Making-Machine-pd6327554.html>.

8. SHJS 75/180 Two-stage Compounding Extrusion Line (b. d.). Nanjing Yongteng Chemical Equipment Co. (n.d.). <http://yongtenggroup.com/content/?141.html#:~:text=Nanjing%20Yongteng%20Chemical%20Equipment%20Co.%2C%20Ltd>.

9. Shved, N.P. (1983). *Razrabotka protsessov ekstruzyy termoplastov na kaskadnykh ekstruderaakh [Development of thermoplastic extrusion processes on cascade extruders]*. [PhD Dissertation; Kyivskiy politekhnichnyi instytut imeni Ihoria Sikorskoho].

10. Lutsenko, I.V., Shved, D.M., Shved, M.P., & Bohatyr, (2013). *Perevahy vykorystannia kaskadnykh skhem ta dozuiuchykh shesterennykh nasosiv pry ekstruzii polimeriv [Advantages of using cascade circuits and metering gear pumps in polymer extrusion]*. *Tekhnolohichniy audyt ta rezervy vyrobnytstva – Technological audit and production reserves*, (1/2(9)), 21–25.

11. Rauwendaal, C. (2014). *Polymer extrusion*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG.

12. Shved, D.M. (2017). *Protses ekstruzii polimeriv na kaskadnomu dyskovo-shesterennomu ekstruderi [Polymer extrusion process on a cascade disc gear extruder]* [PhD Dissertation; Kyivskiy politekhnichnyi instytut imeni Ihoria Sikorskoho]. ELAKPI. [https://ela.kpi.ua/jspui/bitstream/123456789/19317/1/Shved\\_diss.pdf](https://ela.kpi.ua/jspui/bitstream/123456789/19317/1/Shved_diss.pdf).

Отримано 27.03.23



**Yehor Trachuk<sup>1</sup>, Mykola Shved<sup>2</sup>, Dmytro Shved<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>PhD Student of the Department of Machines and Apparatus of Chemical and Oil Refining Industries  
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

**E-mail:** [yehor.trachuk@gmail.com](mailto:yehor.trachuk@gmail.com) **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0006-1802-2058>

<sup>2</sup>PhD in Technical Sciences,

Associate Professor of the Department of Machines and Apparatus of Chemical and Oil Refining Industries  
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

**E-mail:** [npchved46@gmail.com](mailto:npchved46@gmail.com) **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-7725-1447>

<sup>3</sup>PhD in Technical Sciences, Engineer of the Department of Machines and Apparatus of Chemical and Oil Refining Industries  
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

**E-mail:** [npchved46@gmail.com](mailto:npchved46@gmail.com) **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-6860-3017>

**OPTIMIZATION OF CASCADE SCHEME OF HIGH-SPEED EXTRUSION**

*Plastics are one of the most common materials. Due to its high technical and economical characteristics, this class of materials is used in almost all industries, that is why further growth of the production of plastic products is predicted. Today, the biggest problem in the field of polymer processing by extrusion is to ensure the best possible parameters of resource-energy efficiency of equipment. At the same time, the creating of compounds based on polymers is developing very actively, which requires more flexibility from extrusion lines, since a large number of compositions which differ in their characteristics can be developed on the base of a polymer. The factors listed above have led to cascade extrusion lines become increasingly widespread in industry today. Analysis of the extrusion equipment market showed that the schemes with a high-speed double-string extruder at the first stage is more popular. However, the desired mixing quality can be achieved by using a much simpler disc extruder. The article is a review that aims to determine the possibility and feasibility of more efficient arrangement of a cascade scheme for processing composite materials using a disk extruder. Theoretical and experimental studies have shown that melting processes are more efficient in the field of high shear rates at low pressures. Disk extruder is great option for that objective. In this scheme, it is proposed to use a dose feed disk extruder as a homogenizer, and a gear pump as a metering device which allows to reduce pressure and capacity fluctuations before forming device to less than 1%. As a result, it has been determined that the proposed design of the extrusion plant will be more energy efficient than the options on the market and will be able to significantly reduce pressure and performance fluctuations at the inlet to the forming device.*

**Keywords:** resource and energy saving; high-speed extrusion; cascade extrusion; disk extruder; gear pump.

**Table:** 2. **Fig.:** 3. **References.:** 12.

## РОЗДІЛ II. ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

DOI: 10.25140/2411-5363-2023-2(32)-164-174  
УДК 616-085(043.2)

**Володимир Єременко<sup>1</sup>, Олена Монченко<sup>2</sup>, Софія Корчева<sup>3</sup>, Лариса Чубко<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>доктор технічних наук, завідувач кафедри інформаційно-вимірювальних технологій  
Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: [nau\\_307@ukr.net](mailto:nau_307@ukr.net). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4330-7518>. Scopus Author ID: [56736964700](https://orcid.org/0000-0002-4330-7518)

<sup>2</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри біокібернетики та аерокосмічної медицини  
Національний авіаційний університет (Київ, Україна)

E-mail: [monchenko\\_olena@ukr.net](mailto:monchenko_olena@ukr.net). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8248-5704>

ResearcherID: [AAN-1910-2020](https://orcid.org/0000-0002-8248-5704). ID Scopus: [56422110000](https://orcid.org/0000-0002-8248-5704)

<sup>3</sup>здобувач вищої освіти кафедри біокібернетики та аерокосмічної медицини  
Національний авіаційний університет (Київ, Україна)

E-mail: [sofiakorcheva@gmail.com](mailto:sofiakorcheva@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2571-6131>

<sup>4</sup>кандидат ф.-м. наук, доцент кафедри біотехнології

Національний авіаційний університет (Київ, Україна)

E-mail: [chubko\\_l@ukr.net](mailto:chubko_l@ukr.net). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4647-3156>

ResearcherID: [HLW-2771-2023](https://orcid.org/0000-0003-4647-3156). Scopus Author ID: [25626246400](https://orcid.org/0000-0003-4647-3156)

### МЕТОД СТАТИСТИЧНОГО ОЦІНЮВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ КЛІНІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРИ ЛІКУВАННІ АРТЕРІАЛЬНОЇ ГІПЕРТЕНЗІЇ ТА ОЖИРІННЯ

*На даний час обробка великої кількості даних, які мають різну фізичну або біологічну природу, залишається важливою задачею, оскільки всі параметри мають свої закони розподілу, які в загальному випадку відрізняються від гаусівського. Такий набір даних не дає можливості застосувати стандартні методи статистичної обробки. Загального методу класифікування теж нема. Отже, у статті пропонується новий підхід статистичної обробки великої кількості різнопланових даних, що ґрунтується на використанні відстані Махаланобіса. Розглянуті шляхи прийняття рішення на основі вимірювання відстані Махаланобіса між вибіркою відносно здорових пацієнтів та двома вибірками хворих: основною – група пацієнтів приймала нове лікування, та дослідною – група пацієнтів, яка приймала стандартне лікування надлишкової ваги та артеріальної гіпертензії.*

**Ключові слова:** відстань Махаланобіса, статистична обробка медичних даних, інформаційні технології при обробці медичних даних.

Табл.: 1. Рис.: 5. Бібл.: 18.

**Актуальність теми дослідження.** Нині обробка великої кількості даних, які мають різну фізичну або біологічну природу, залишається важливим завданням, оскільки всі параметри мають свої закони розподілу, які в загальному випадку відрізняються від гаусівського. Такий набір даних не дає можливості застосувати стандартні методи статистичної обробки. Загального методу класифікації теж нема. Отже, у статті запропоновано новий підхід статистичної обробки великої кількості різнопланових даних, що ґрунтується на використанні відстані Махаланобіса [1]. Розглянуті шляхи прийняття рішення на основі вимірювання відстані Махаланобіса між вибіркою відносно здорових пацієнтів та двома вибірками хворих: основною – група пацієнтів приймала нове лікування, та дослідною – група пацієнтів, яка приймала стандартне лікування надлишкової ваги та артеріальної гіпертензії.

**Постановка проблеми.** Артеріальна гіпертензія (АГ) та ожиріння є вагомими проблемами зі здоров'ям працездатного населення, які потребують вирішення системою охорони здоров'я. Згідно з даними Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ) у популяції зайву вагу має 39 % дорослих у віці 18 років і старше (39 % чоловіків і 40 % жінок) і близько 13% дорослого населення світу (11 % чоловіків і 15 % жінок) мають ожиріння [2; 3]. У США майже 65 % дорослого населення має надмірну вагу, з яких майже половина страждає від ожиріння [4], а АГ серед пацієнтів з ожирінням становить 78 % у чоловіків та 64 % у жінок [5; 6].

Практика сімейної медицини потребує системного підходу до лікування цієї категорії хворих і має бути спеціально спрямована на корекцію основних причин ожиріння [7]. Первинна профілактика та лікування мають бути персоналізовані, спрямовані на розробку ефективних заходів лікування АГ та ожиріння, корекції способу життя, з урахуванням регіональних та культурних особливостей.

Поєднання ожиріння та АГ ускладнюється тим, що зростає стійкість до лікування артеріальної гіпертензії, зростає ризик серцево-судинних захворювань, ниркової недостатності та інсульту [8]. Це вимагає часу на підбір ефективної схеми фармакотерапії і боротьбу з супутніми ускладненнями.

Відкриття ендокринної функції жирової тканини та дисфункції при ожирінні стало причиною появи інтересу до вивчення її ролі в розвитку серцево-судинних та метаболічних захворювань. Відомо, що жирова тканина не тільки реагує на аферентні сигнали від гуморальної та центральної нервової систем, але також сама виділяє власний фактор з важливими ендокринними функціями – лептин. Лептин має анорексигенні ефекти, збільшує енергетичні витрати та контролює метаболізм вуглеводів та жирів [9]. Доведена також кореляція між рівнем лептину та показниками систолічного АГ та серцевої недостатності [10]. Не Маловивченим залишається питання взаємозв'язку гормону лептину та показників морфометрії, антропометрії, ліпідного, пуринового, кальцієвого профілю та інших біохімічних показників у пацієнтів з артеріальною гіпертензією (АГ) та ожирінням. Зважаючи на це, метою дослідження стало дослідження рівня сироваткового лептину у пацієнтів з АГ і ожирінням/зайвою вагою та встановлення кореляційних зв'язків між показниками морфометрії, антропометрії та біохімічними показниками у пацієнтів з ожирінням для визначення фактору ризику та прогнозу ефективності лікування АГ двома шляхами: класичним і новим із подальшим порівнянням ефективності цих двох шляхів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Методам обробки результатів вимірювання медичних показників присвячено наукові праці [11-12]. Зокрема, у статті [11] описана проблема підвищення достовірності оцінювання функціонального стану організму людини на основі статистичних методів. Оскільки організм людини є варіабельною системою і не має еталону.

У статті [12] наведено статистичний підхід до оцінювання гомеостазу людини.

Автори [13] відзначають типові помилки і проблеми у статистичному аналізі, дизайні, інтерпретації та звітності при дослідженні ожиріння: неправильне тлумачення статистичної значущості; невідповідне тестування на основі базових значень; надмірне та нерозкрите багаторазове тестування та «злом значення р»; неправильне використання кластеризації в кластерних рандомізованих дослідженнях; неправильні уявлення про непараметричні тести; неправильна обробка відсутніх даних; неправильний розрахунок розмірів ефекту; ігнорування регресії до середнього; ігнорування зміщення підтвердження та недостатня статистична звітність.

У статті [14] розглянутий новий підхід до знаходження базових мас з використанням відстані Махаланобіса. Наведена формула, яка показує взаємозв'язок між відстанню Махаланобіса та базовими масами при класифікації гіперспектральних космічних зображень.

Враховуючи вищезазначене, завданням представлених у роботі досліджень було обрати релевантний статистичний підхід, який оптимально враховував би особливості ендокринологічних досліджень, які включають в себе антропологічні, біохімічні та інші показники. У роботі запропоновано підхід, заснований на класифікації образів із використанням функцій відстані.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Проведений аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що питання обробки великої кількості різнопланових показників залишається відкритим. А також те, що при обробці медичних даних нема еталона, з яким можна було б порівнювати. Отже, необхідно шукати інші шляхи обробки даних.

Дослідження проведено на клінічних базах кафедри сімейної медицини та амбулаторно-поліклінічної допомоги НМАПО імені П. Л. Шупика в період з 2017 по 2021 роки. Із загальної кількості обстежених осіб, яка становила 149, пацієнтів з артеріальною гіпертензією (АГ) та ожирінням було 128 осіб, а група здорових пацієнтів (контрольна група М1) складалась з 21 особи. Пацієнтів з АГ та ожирінням було поділено на дві групи, рандомізовані за віком, статтю та коморбідною патологією, яким надавалось два типи лікування: основна група (М2) отримувала лікування 1, дослідна група (М3) отримувала лікування 2 [2; 3]. Метою дослідження є оптимізація комплексної терапії та діагностика пацієнтів з артеріальною гіпертензією та ожирінням у первинній лікарській практиці та встановлення взаємозв'язків між різними методиками лікування та підтвердження ефективності лікування розрахунком відстані Махаланобіса (рис. 1):

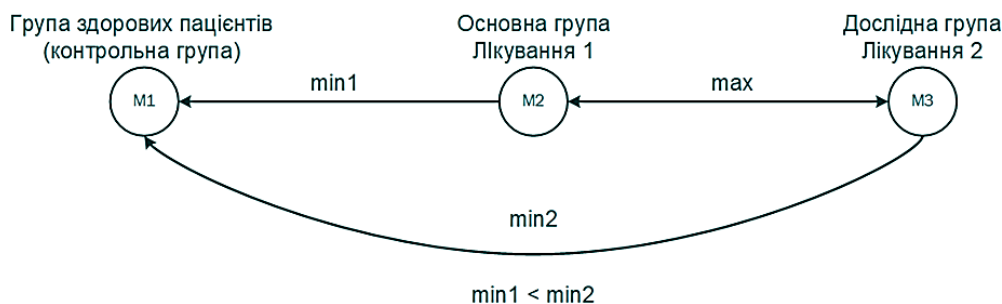


Рис. 1. Схема проведення обробки даних

**Мета статті** – провести порівняння методик лікування ожиріння та артеріальної гіпертензії методами статистичної обробки даних, а саме розрахунком відстані Махаланобіса між групами пацієнтів та довести ефективність нового запропонованого методу лікування.

**Виклад основного матеріалу.** У роботі було запропоновано використати класифікацію образів, а саме використання для класифікації образів функцій відстані. Інструментом класифікації є застосування міри схожості для векторів образів, а саме визначення їх близькості.

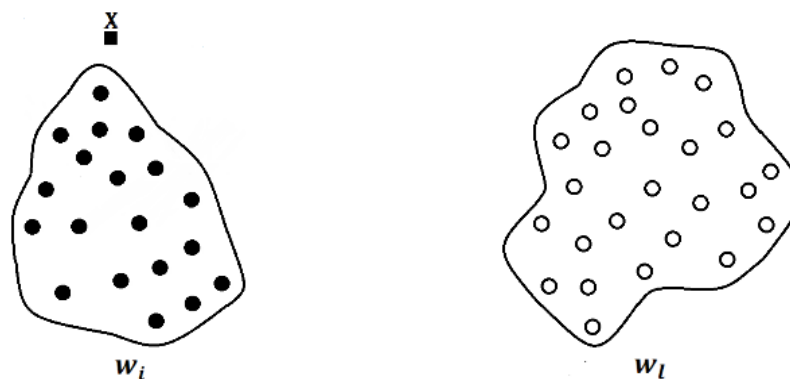


Рис. 2. Образи, які піддаються класифікації, за допомогою поняття близькості

На рис. 2 видно, що вектор  $X$  належить до класу  $\omega_i$  тільки тому, що цей вектор знаходиться ближче до векторів образу  $\omega_i$ . Очікувати на позитивні практичні результати при класифікації образів з використанням функцій відстані можна лише в тих випадках, коли класи образів проявляють кластеризаційні властивості. Цю особливість можна оцінити, порівнявши рис. 2 і рис. 3. Вивчення рис. 2 показує, що віднесення вектора  $X$  до класу  $\omega_i$  не викликає сумнівів. На рис. 3 видно, що хоч класи  $\omega_i$  не перетинаються, але доволі важко сказати, до якого класу належить вектор  $X$ .

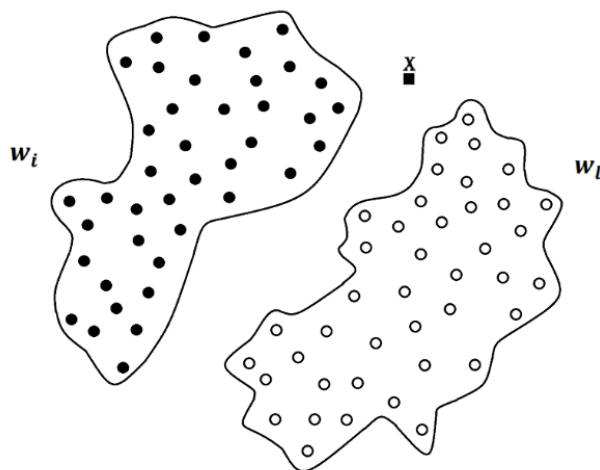


Рис. 3. Образи, класифікація яких із використанням поняття близькості викликає утруднення

Загальна оцінка таких ідей здійснюється на рівні відповідної математичної строгості. Як критерій класифікації образу буде використовуватись близькість образу, який класифікуватимемо, до образу певного класу – еталона. Цей підхід відомий як класифікація образів за критерієм мінімуму відстані [15].

Опорною точкою є вибір еталона або центра кластера, який має відігравати основну роль в побудові класифікатора образів з використанням принципу мінімуму відстані. У такому випадку таким центром кластера є вибірка здорових людей. Мірою схожості (подібності), яка буде використана для вимірювання відстані між образами, запропоновано використати відстань Махаланобіса [15].

Загалом цю задачу класифікації можна звести до задачі перевірки гіпотез [1; 15], яка зводиться до прийняття однієї з  $K$  взаємно несумісних гіпотез  $H_0, H_1, \dots, H_K$  щодо невідомих характеристик об’єкта досліджень за результатами оцінювання багатомірного вектора  $C(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m)$  за реалізацією  $x(t), 0 \leq t \leq T$  випадкового процесу  $\zeta(t)$ , який є моделлю досліджуваного явища. Кожна з компонент вектора  $\lambda_i, i = \overline{0, m}$  являє собою відповідний інформативний параметр. Апріорним вектором та його реалізацією  $C_k$  для  $k$ -го класу буде матриця

$$C_k = \begin{pmatrix} D_{1,1}^{(k)}, \dots, D_{1,i}^{(k)}, \dots, D_{1,m}^{(k)} \\ \dots \\ D_{j,1}^{(k)}, \dots, D_{j,i}^{(k)}, \dots, D_{j,m}^{(k)} \\ \dots \\ D_{n,1}^{(k)}, \dots, D_{n,i}^{(k)}, \dots, D_{n,m}^{(k)} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Кожне рішення щодо класифікації стану об’єкта діагностування є результатом статистичних висновків на основі спостережень  $C$ . До прикладу,  $C$  можна описати багатовимірною щільністю нормального розподілу. Тоді щільність розподілу  $C_k$  у випадку з  $K$  класів (гіпотез)

$$P(X) = N(M_k, C_k) = \frac{1}{(2\pi)^{m/2} |C_k|^{1/2}} \exp \left[ -\frac{1}{2} (X - M_k)^T C_k^{-1} (X - M_k) \right], \quad (2)$$

де  $k = \overline{1, K}$ .

Кожна щільність розподілу  $C_k$  повністю визначається вектором середніх значень  $M_k$  параметрів  $\lambda_k$  та коваріаційною матрицею  $C_k$ , що задані у вигляді

$$M_k = E_k\{C\} \text{ та}$$

$$C_k = E_k\{(X - M_k)(X - M_k)^T\},$$

де  $E\{\cdot\}$  – це оператор математичного сподівання, що визначається на образі  $k$ -го класу;  
 $|C_k|$  – визначник коваріаційної матриці  $C_k$ ;  
 $X$  – аргумент  $P(X)$ , який при дослідженні конкретних реалізацій приймає їх значення.

Особливістю задачі, яка представлена в цій роботі, є те, що не є можливим встановлення порогу прийняття рішення, оскільки на практиці врахувати всі показники (ендокринологічні) не є можливим. Отже, визначити значення порогів  $c$  для класифікації всіх можливих показників не є доцільним. Тому, для практичного застосування, ми пропонуємо використовувати альтернативний метод класифікації, що базується на визначенні відстані між вектором інформативних параметрів досліджуваного об'єкта та векторами, що характеризують задані класи. Перевагою зазначеного методу є також можливість подальшого розбиття існуючих класів на підкласи та проведення процедури класифікації без ускладнення розрахункового алгоритму. З цих міркувань вирішальним буде таке правило – за результатами контролю приймається така гіпотеза  $H_k$ , для якої

$$d_k = \min(d(X, \Xi_k)), \tag{3}$$

де  $d(\cdot)$  – це прийнята міра відстані між двома багатовимірними розподілами;

$X = \|\lambda_{j,i}\|, i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}$  – це апостеріорна матриця конкретних реалізацій  $\xi(t)$ , для якої  $m$  – це кількість інформативних параметрів,  $n$  – це кількість повторних експериментів по їх визначенню.

Для прийнятої моделі (2) розглянемо міри відстані, які можуть бути для неї застосовані. У випадку коваріаційних матриць, що збігаються,  $C_1 = C_2 = C$  мірою відстані між відповідними розподілами  $f_1 = N(M_1, C)$  та  $f_2 = N(M_2, C)$  може слугувати відстань Махаланобіса (1) [1]

$$d^2 = (M_2 - M_1)^T (C)^{-1} (M_2 - M_1), \tag{4}$$

де  $M_1$  – матриця за контрольною вибіркою,

$M_2$  – матриця за першою вибіркою,

$C$  – коваріаційна матриця.

**Матеріали та методи досліджень.** Дослідження проводилося методом когортного проспективного дослідження. У процесі дослідження для вирішення поставлених завдань усім учасникам дослідження проводили комплекс лабораторних та інструментальних методів обстеження, а також статистичні методи для аналізу отриманих результатів. Вихідні дослідження і дослідження в динаміці проводилися згідно із розробленим дизайном. Рандомізація пацієнтів на клінічні групи. Призначення диференційованої лікувально профілактичної програми (див. табл.).

Таблиця – Загальна характеристика обстежених осіб

Показник	Групи обстежених осіб, n=149					
	Контрольна група (M1) n = 21		Основна група (M2) (лікування 1) n = 64		Дослідна група (M3) (лікування 2) n = 64	
Стать	Жінки n = 14, 66,7 %	Чоловіки n = 7, 33,3 %	Жінки n = 43, 67,2 %	Чоловіки n = 21, 31,3 %	Жінки n = 44, 68,8 %	Чоловіки n = 20, 31,2 %
Вік	48,5±1,3		49,0±1,4		46,7±2,3	
Вага	65,8±3,2		89,7±1,7		92,1±1,4	
Індекс маси тіла	22,7±0,8		32,2±0,5		32,4±0,4	
% жирової маси	28,1±0,9		40,9±0,9		36,3±0,9	

Методика опрацювання даних представлена на рис. 4 і містить у собі два етапи.

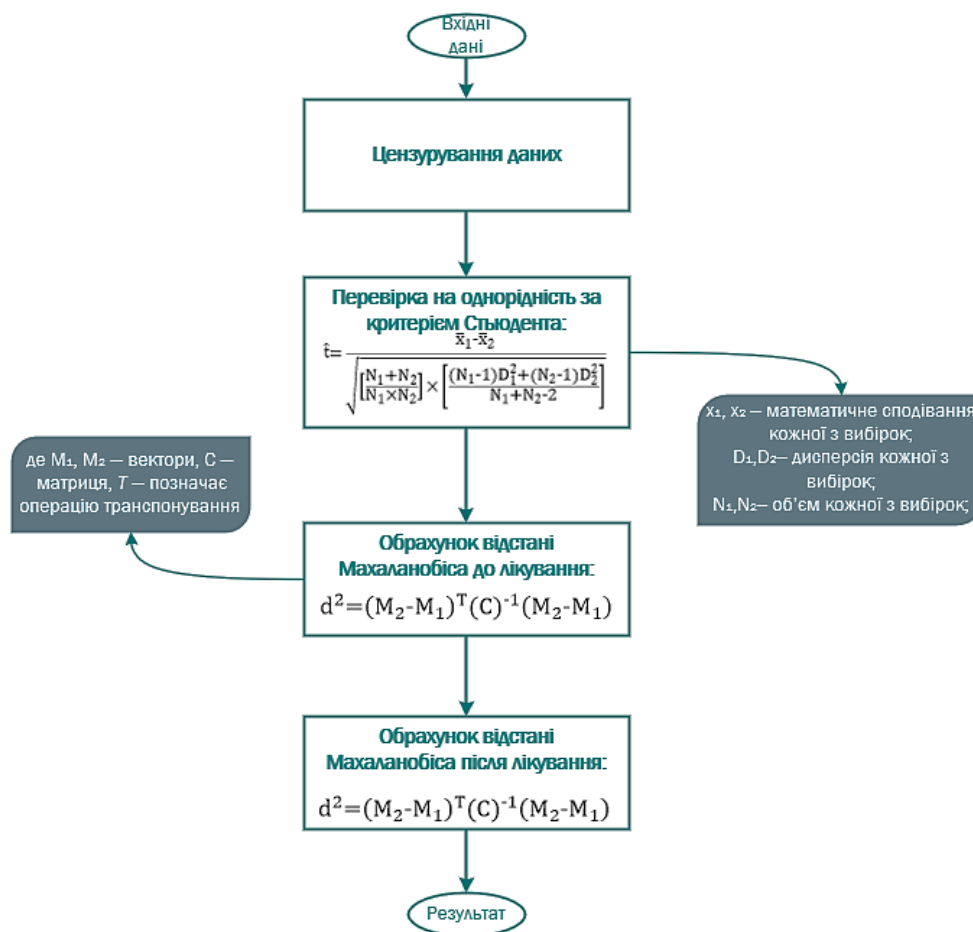


Рис. 4. Алгоритм обробки даних

I етап: опрацювання даних, отриманих ДО лікування:

- 1) цензурування вибірок за критерієм Романовського [16];
- 2) перевірка вибірок на однорідність за критерієм Ст'юдента [15; 16] з квантилями F-розподілу рівня  $\alpha = 0,95$  для ступенів вільності  $f_1$ :

$$\hat{t} = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{\sqrt{\left[ \frac{n_1 + n_2}{n_1 n_2} \right] \cdot \left[ \frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \right]}}$$

- з  $(n_1 + n_2 - 2)$  ступенями вільності;

$\bar{x}_1, \bar{x}_2$  – математичне сподівання кожної з вибірок;

$s_1, s_2$  – дисперсія кожної з вибірок;

$n_1, n_2$  – об'єм кожної з вибірок;

- 3) обрахунок відстані Махаланобіса між основною групою ( $M_2$ ) та контрольною групою ( $M_1$ );

- 4) обрахунок відстані Махаланобіса між дослідною групою ( $M_3$ ) та контрольною групою ( $M_1$ );

- 5) обрахунок відстані Махаланобіса між основною ( $M_2$ ) та дослідною ( $M_3$ ) групами.

II етап: опрацювання даних, отриманих ПІСЛЯ лікування:

6) обрахунок відстані Махаланобіса між основною групою ( $M_2$ ) та контрольною групою ( $M_1$ );

7) обрахунок відстані Махаланобіса між дослідною групою ( $M_3$ ) та контрольною групою ( $M_1$ );

8) обрахунок відстані Махаланобіса між основною ( $M_2$ ) та дослідною ( $M_3$ ) групами;

9) аналіз отриманих результатів.

Методика обрахунку даних за принципом мінімуму відстані відбувалась за таким алгоритмом (рис. 2):

1) розрахунок мат.сподівання по кожному показнику в кожній групі (основна, дослідна та контрольна група):

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i,$$

де  $N$  – кількість пацієнтів у відповідній групі,

$X_i$  – поточні значення відповідного показника;

2) розрахунок дисперсії по кожному показнику в кожній групі:

$$D = 1 / N - 1 \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2.$$

Приклад розрахунку наведено на рис. 5, де  $D1, D2, D3 \dots$  – це дисперсії відповідних показників;

Номер	вага1	D1	зріст	D2	стать (ч-0,ж-1)ім1	D3	% жир 1	D4	група	талія1	D5	стегна1	D6	шия1	D7	к
1	102,6	165,9	158	37,7	1	41,10	79,29	47,8	47,83	1	129	642,3	120	129,4	39	0,1
2	114,0	589,5	169	23,6	0	40,4	67,32	37,9	8,91	1	136	1046,1	115	40,6	48	86,1
3	79,3	108,6	164	0,0	1	29,5	7,26	43,8	8,50	1	109	28,6	107	2,6	38	0,5
4	78,0	137,4	176	140,6	1	25,2	48,93	26,3	212,70	1	94	93,2	103	31,6	40	1,6
5	95,9	38,2	168	14,9	1	34,00	3,26	44,7	14,56	1	117	178,1	122	178,9	38	0,5
6	83,5	38,7	170	34,3	0	28,9	10,86	27,6	176,47	1	97	44,3	101	58,1	42	10,8
7	81,7	64,3	160	17,1	1	31,9	0,09	45,3	19,50	1	117	178,1	111	5,6	38	0,5
8	128,7	1519,4	168	14,9	0	45,6	179,69	54	172,02	1	146	1793,0	123	206,6	46	53,0
9	132,1	1796,0	171	47,1	1	45,2	169,12	51	102,33	1	130	694,0	124	236,4	45	39,5
10	99,0	86,1	164	0,0	0	36,8	21,20	47,5	43,77	1	118	205,7	118	87,9	41	5,2
11	92,2	6,1	175	117,9	1	30,1	4,39	30	118,47	1	114	107,0	113	19,1	41	5,2
12	70,2	381,0	160	17,1	1	27,4	23,00	41,1	0,05	1	96	58,6	112	11,4	39	0,1
13	81,0	76,0	169	23,6	1	28,4	14,40	42,6	2,94	1	108	18,9	112	11,4	39	0,1
14	63,2	703,3	158	37,7	1	25,1	50,34	33,5	54,53	1	91	160,2	99	92,6	36	7,4
15	82,2	56,6	165	0,7	1	30,2	3,98	44,8	15,33	1	112	69,6	111	5,6	38	0,5
16	77,4	151,8	162	4,6	1	29,5	7,26	43,9	9,09	1	94	93,2	112	11,4	38	0,5
17	85,9	14,6	177	165,4	1	27,4	23,00	41,5	0,38	1	86	311,7	116	54,4	33	32,7
18	89,0	0,5	160	17,1	1	35,0	7,87	42,1	1,48	1	101	7,1	103	31,6	32	45,1
19	79,0	114,9	165	0,7	0	29,0	10,21	33,3	57,52	1	92	135,9	105	13,1	33	32,7
20	88,0	3,0	160	17,1	1	34,4	4,86	47,1	38,63	1	98	32,0	110	1,9	33	32,7
21	82,0	59,6	167	8,2	1	29,4	7,81	35,9	24,84	1	90	186,5	100	74,4	39	0,1
22	90,0	0,1	165	0,7	1	33,1	0,82	41,3	0,17	1	102	2,7	115	40,6	39	0,1
23	103,0	176,4	170	34,3	0	35,6	11,59	47,8	47,83	1	104	0,1	113	19,1	36	7,4
24	98,0	68,6	172	61,8	1	33,9	2,91	37,9	8,91	1	98	32,0	111	5,6	38	0,5
25	81,4	69,2	168	14,9	1	28,8	11,53	43,8	8,50	1	90	186,5	100	74,4	38	0,5
26	93,3	12,8	169	23,6	1	32,6	0,16	26,3	212,70	1	96	58,6	96	159,4	33	32,7
27	123,0	1107,5	174	97,2	0	40,6	70,64	44,7	14,56	1	129	642,3	110	1,9	32	45,1
28	98,0	68,6		26942,1	1	33,1	0,82	27,6	176,47	1	101	7,1	100	74,4	35	13,8
29	103,0	176,4	179	220,8	0	32,1	0,01	45,3	19,50	1	98	32,0	90	346,9	33	32,7

Рис. 5. Приклад розрахунку статистичних даних, зібраних із пацієнтів контрольної, основної та дослідної груп для лікування АГ і ожиріння

3) розрахунок різниці між середніми значеннями основної або дослідної групи з основним значенням здорової групи ( $M2-M1$ );

4) Побудова коваріаційної матриці для кожної групи окремо, при цьому  $C_1 = C_2 = C$ ;

5) обрахунок відстані Махаланобіса за формулою (4).



**Результати досліджень.** Результати обрахунку виявились такі:

Відстань Махаланобіса між:	Відстань Махаланобіса ДО лікування:	Відстань Махаланобіса ПІСЛЯ лікування:
основною та здоровою групою	34,794	28,999
дослідною та здоровою групою	43,87	59,412
основною та дослідною групою	1,59	3,093

**Висновки.** Проаналізовано стан боротьби з ожирінням у світі та виявлено серйозну небезпеку цієї проблеми для здоров'я населення. Наслідками хронічного захворювання ожирінням, яке зростає у світі, можуть бути серцево-судинні захворювання, діабет 2 типу, захворювання суглобів та рак.

Наше дослідження використовує класифікацію образів з використанням функцій відстані, що дозволяє вимірювати подібність між векторами образів. Класифікація образів з використанням функцій відстані є ефективною, особливо у випадках, коли класи образів проявляють кластерні властивості. Обрання еталона має велике значення для створення класифікатора, що базується на мінімальній відстані. У цьому дослідженні використовується відстань Махаланобіса для вимірювання подібності між образами.

Результати розрахунків підтвердили однаковість вибірок згідно з критерієм Ст'юдента, і це є важливим показником для подальшого аналізу. Використання зазначеного методу Махаланобіса дало змогу встановити значення між різними групами: основна і здорова – 34,794, дослідна і здорова – 43,87, основна і дослідна – 1,59. Наведені дані свідчать про однорідність між основною і дослідною групами. Значення методу Махаланобіса змінилися після проведення лікування: між основною і здоровою – 28,999, між дослідною і здоровою – 59,412, між основною і дослідною – 3,093.

З отриманих результатів видно, що відстань між основною групою та групою здорових зменшилась. Отже, лікування, яке було надане основній групі (лікування 1), виявилось більш ефективним, ніж лікування, надане дослідній групі (лікування 2). Результати досліджень були представлені для обговорення на конференціях [17; 18].

Отримані результати дослідження підтверджують успішність класифікації образів з використанням функцій відстані за наявності виражених розмежувальних ознак у класах образів. Одержані результати мають велике значення для біомедичної інженерії, адже вони відкривають нові можливості та сприяють удосконаленню методів лікування ожиріння.

Враховуючи отримані результати, рекомендуємо практичне використання даного методу лікування в галузі медицини. Описаний підхід може бути використано для вдосконалення систем діагностики, а також для ефективного лікування ожиріння. Водночас важливо враховувати вибір еталона і відповідність класифікації потребам завдання.

Отже, в роботі вперше запропоновано використання відстані Махаланобіса як критерій оцінювання великої кількості різнопланових фізичних показників, знятих із біологічного об'єкта.

### Список використаних джерел

1. Tou J. Pattern Recognition Principles Addison / J. Tou, R. Gonzalez. – London : Wesley Publishing Company, 1974. – 378 s.
2. Mills K. T. The global epidemiology of hypertension / K. T. Mills, A. Stefanescu, J. He // NatRevNephrol. – 2020. – № 16. – Pp. 223-237. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41581-019-0244-2>.
3. WHO Global Health Observatory. Prevalence of raised blood pressure: situation and trends [Electronic resource]. – Access mode: [http://www.who.int/gho/ncd/risk\\_factors/blood\\_pressure\\_prevalence\\_text/en](http://www.who.int/gho/ncd/risk_factors/blood_pressure_prevalence_text/en).

4. Prevalence of overweight and obesity in the United States, 1999-2004 [Electronic resource] / C. L. Ogden, M. D. Carroll, L. R. Curtin, M. A. McDowell, C J. Tabak, K. M. Flegal // *JAMA*. – 2006. – Apr 5; 295(13). – Pp. 1549-55. – Access mode: <https://jamanetwork.com/journals/jama/fullarticle/202627>.
5. Cohen J. B. Hypertension in Obesity and the Impact of Weight Loss / J. B. Cohen // *Curr Cardiol Rep*. – 2017. – Aug 24; 19(10). – P. 98. DOI: 10.1007/s11886-017-0912-4. PMID: 28840500; PMCID: PMC5606235.
6. Association of Pharmacological Treatments for Obesity With Weight Loss and Adverse Events: A Systematic Review and Meta-analysis / R. Khera, M. H. Murad, A. K. Chandar, P. S. Dulai, Z. Wang, L. J. Prokop et al. // *JAMA*. – 2016. – № 315(22). – Pp. 24-34. DOI: 10.1001/jama.2016.7602.
7. Kotchen T. A. Obesity-related hypertension: epidemiology, pathophysiology, and clinical management / T. A. Kotchen. // *Am J Hypertens*. – 2010. – № 23. – Pp. 1170-1178.
8. DeMarco V. G. The pathophysiology of hypertension in patients with obesity / V. G. DeMarco, A. R. Aroor, J. R. Sowers // *NatRevEndocrinol*. – 2014. – Jun; 10(6) – Pp. 364-76.
9. Mark A. L. Selective leptin resistance revisited / Mark A. L. // *Am J PhysiolRegulIntegr Comp Physiol*. – 2013. – № 305(6). – Pp. 566-581.
10. Petrie J. R. Diabetes, hypertension, and cardiovascular disease: clinical insights and vascular mechanisms / J. R. Petrie, T. J. Guzik, R. M. Touyz // *Canadian Journal of Cardiology*. – 2018. – № 34(5). – Pp. 575-584.
11. Єременко В. С. Метод обробки результатів вимірювання медичних показників / В. С. Єременко, О. Б. Іванець, М. Ю. Буриченко // *Наукоємні технології*. – 2020. – № 3(47). – С. 392-398.
12. Methodological aspects of evaluating a homeostasis of a biological object / O. Kosheva, S. V. Boychenko, V. D. Kuzovik, O. B. Ivanets // *Proceedings of XIV International Conference on Modern Achievements of Science and Education (September 26 – October 3, 2019, Netanya, Israel)*. – Netanya, 2019. – С. 19-22.
13. Common Scientific and Statistical Errors in Obesity Research / J. B. George, T. M. Beasley, A. W. Brown et al. // *Obesity (Silver Spring)*. – 2016. – Apr; 24 (4). – Pp. 781-790. DOI: 10.1002/oby.21449.
14. Альперт С. І. Нові підходи до застосування різних методів знаходження базових мас при класифікуванні гіперспектральних космічних зображень / С. І. Альперт // *Математичні машини і системи*. – 2020. – № 1. – С. 30-42.
15. Статистичний аналіз даних вимірювань : навч. посіб. / В. С. Єременко, Ю. В. Куц, В. М. Мокійчук, О. В. Самойліченко. – Київ : НАУ, 2013. – 320 с.
16. Дорожовець М. Опрацювання результатів вимірювань : навч. посіб. / М. Дорожовець. – Львів : Вид-во НУ “Львівська політехніка”, 2007. – 624 с.
17. Використання критерію мінімуму відстані в задачах оптимізації комплексної терапії пацієнтів [Електронний ресурс] / О. В. Монченко, С. Г. Корчева, В. С. Єременко, О. В. Процюк, О. Ю. Гончарук // *Авіація в ХХІ столітті : матеріали Х Всесвіт конгресу. “Безпека в авіації та космічні технології”* (Київ, 28-30 верес. 2022 р.). – Київ : НАУ, 2022. – С. 4.1.38-4.1.42 – Режим доступу: <https://conference.nau.edu.ua/index.php/Congress/Congress2022/paper/viewFile/8657/7266> С.-4.1.38-4.1.42.
18. Методика опрацювання даних в лікуванні надлишкової ваги / О. В. Монченко, О. В. Монченко, С. Г. Корчева, В. С. Єременко, О. В. Процюк, О. Ю. Гончарук // *Сучасний стан та перспективи біомедичної інженерії : матеріали Міжнар. наук- практ. конф., присвяч. 20-річ. ювілею Фак-ту біомед. інженерії Київ. політех. ін-ту імені І. Сікорського (15-16 груд.2022, м. Київ) / упоряд.: О. І. Голембіовська. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – С. 60.*

### References

1. J.Tou, R. (1974). *Gonzalez Pattern Recognition Principles Addison*. Wesley Publishing Company.
2. Mills, K.T., Stefanescu, A., & He, J. (2020). The global epidemiology of hypertension. *NatRevNephrol*, 16, 223–237. <https://doi.org/10.1038/s41581-019-0244-2>.
3. WHO Global Health Observatory. Prevalence of raised blood pressure: situation and trends. [http://www.who.int/gho/ncd/risk\\_factors/blood\\_pressure\\_prevalence\\_text/en](http://www.who.int/gho/ncd/risk_factors/blood_pressure_prevalence_text/en).
4. Ogden C.L., Carroll M.D., Curtin L.R., McDowell M.A., Tabak C.J., & Flegal K.M. (2006 Apr 5). Prevalence of overweight and obesity in the United States, 1999-2004. *JAMA*, 295(13), 1549-55.

5. Cohen, J.B. (2017 Aug 24). Hypertension in Obesity and the Impact of Weight Loss. *Curr Cardiol Rep.*, 19(10), 98. doi:10.1007/s11886-017-0912-4. PMID: 28840500; PMCID: PMC5606235.
6. Khera, R., Murad, M.H., Chandar, A.K., Dulai, P.S., Wang, Z., Prokop, L.J., et al. (2016). Association of Pharmacological Treatments for Obesity With Weight Loss and Adverse Events: A Systematic Review and Meta-analysis. *JAMA*, 315(22), 2424–34. doi:10.1001/jama.2016.7602.
7. Kotchen, T.A. (2010). Obesity-related hypertension: epidemiology, pathophysiology, and clinical management. *Am J Hypertens*, 23, 1170–1178.
8. DeMarco, V.G., Aroor, A.R., & Sowers, J.R. (Jun 2014). The pathophysiology of hypertension in patients with obesity. *NatRevEndocrinol*, 10(6), 364-76.
9. Mark, A.L. (2013). Selective leptin resistance revisited. *Am J PhysiolRegulIntegr Comp Physiol.*, 305(6), R566–81.
10. Petrie, J.R., Guzik, T.J., & Touyz, R.M. (2018). Diabetes, hypertension, and cardiovascular disease: clinical insights and vascular mechanisms. *Canadian Journal of Cardiology*, 34(5), 575-584.
11. Eremenko, V.S., Ivanets, O.B., & Burychenko, M.Yu. (2020). The method of processing the results of measuring medical indicators. *Scientific technologies*, 3(47).
12. Kosheva, O., Boychenko, S.V., Kuzovik, V.D., & Ivanets, O.B. (September 26 – October 3, 2019). Methodological aspects of evaluating a homeostasis of a biological object. *Proceedings of XIV International Conference on Modern Achievements of Science and Education* (pp. 19-22).
13. George, J.B., Beasley, T.M., Brown, A.W., et al. (2016 Apr). Common Scientific and Statistical Errors in Obesity Research. *Obesity (Silver Spring)*, 24(4), 781–790. doi:10.1002/oby.21449.
14. Alpert, S.I. (2020). Novi pidkhody do zastosuvannya riznykh metodiv znakhodzhennia bazovykh mas pry klasyfikuvanni hiperspektralnykh kosmichnykh zobrazhen [New approaches to the application of various methods of finding base masses in the classification of hyperspectral space images]. *Matematychni mashyny i systemy – Mathematical machines and systems*, 1.
15. Eremenko, V.S., Kuts, Yu.V., Mokiychuk, V.M., & Samoilenko, O.V. (2013). *Statystychnyi analiz danykh vymiriuvan [Statistical analysis of measurement data]*. NAU.
16. Dorozhovets, M. (2007). *Opratsiuvannya rezultativ vymiriuvan [Processing of measurement results]*. Publishing House of the National University “Lviv Polytechnic”.
17. Monchenko, O.V., Korcheva, S.G., Eremenko, V.S., Protsyuk, O.V., & Honcharuk, O.Yu. (2022). Vykorystannia kryteriiu minimuma vidstani v zadachakh optymizatsii kompleksnoi terapii patsientiv [Use of the minimum distance criterion in the tasks of optimization of complex therapy of patients]. *Aviatsiia v XXI stolitti : materialy X Vsesvit konhresu. “Bezpeka v aviatsii ta kosmichni tekhnologii” – Materials of the X World Congress “Aviation in the XXI Century” – “Safety in Aviation and Space Technologies”* (pp. 4.1.38-4.1.42). NAU. <https://conference.nau.edu.ua/index.php/Congress/Congress2022/paper/viewFile/8657/7266>.
18. Monchenko, O.V., Monchenko, O.V., Korcheva, S.G., Yeremenko, V.S., Protsyuk, O.V., & Honcharuk, O.Yu. (December 15-16, 2022). Metodyka opratsiuvannya danykh v likuvanni nadlyshkovoi vahy [Methodology of data processing in the treatment of excess weight]. *Suchasnyi stan ta perspektyvy biomedychnoi inzhenerii : materialy Mizhnar. nauk- prakt. konf., prysviach. 20-rich. yuvileiu Fak-tu biomed. inzhenerii Kyiv. politekh. in-tu imeni I. Sikorskoho – Current state and prospects of biomedical engineering: materials of the International scientific and practical conference dedicated to the 20th anniversary of the Faculty of Biomedical Engineering of the Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute: electronic collection* (p. 60). KPI named after Igor Sikorsky.

Отримано 30.06.23

UDC 616-085(043.2)

**Volodymyr Yeremenko<sup>1</sup>, Olena Monchenko<sup>2</sup>, Sofiia Korcheva<sup>3</sup>, Larysa Chubko<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Doctor of Technical Science, Chief of Department of Information Measuring Technology  
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)  
E-mail: [nau\\_307@ukr.net](mailto:nau_307@ukr.net). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4330-7518>. Scopus Author ID: 56736964700

<sup>2</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor Department of Biocybernetics and Aerospace Medicine  
National Aviation University (Kyiv, Ukraine)

E-mail: [monchenko\\_olena@ukr.net](mailto:monchenko_olena@ukr.net). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8248-5704>  
ResearcherID: AAN-1910-2020, ID Scopus: 56422110000

<sup>3</sup>Student of Department of Biocybernetics and Aerospace Medicine  
National Aviation University (Kyiv, Ukraine)

E-mail: [sofiakorceva@gmail.com](mailto:sofiakorceva@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2571-6131>

<sup>4</sup>PhD in Physical and Mathematical Sciences sciences, associate professor Department of Biotechnologies  
National Aviation University (Kyiv, Ukraine)

E-mail: [chubko\\_l@ukr.net](mailto:chubko_l@ukr.net). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4647-3156>

ResearcherID: [HLW-2771-2023](https://orcid.org/HLW-2771-2023). Scopus Author ID: [25626246400](https://orcid.org/25626246400)

## METHOD OF STATISTICAL EVALUATION OF THE RESULTS OF CLINICAL RESEARCH IN THE TREATMENT OF ARTERIAL HYPERTENSION AND OBESITY

*Currently, the processing of a large amount of data, which have a different physical or biological nature, remains an important task, since all parameters have their own distribution laws, which in general differ from the Gaussian one. Such a set of data does not make it possible to apply standard methods of statistical processing. There is no general classification method either.*

*The analysis of research and publications made it possible to formulate the tasks of the research presented in the work, how to choose a relevant statistical approach that would optimally take into account the peculiarities of endocrinological research, which include anthropological, biochemical and other indicators. The paper proposes an approach based on image classification using distance functions.*

*The purpose of the article is to compare methods of treating obesity and hypertension using statistical data processing methods, namely by calculating the Mahalanobis distance between groups of patients and to prove the effectiveness of the new proposed method of treatment.*

*The article proposes a new approach to the statistical processing of a large amount of diverse data, based on the use of the Mahalanobis distance. The ways of decision-making based on the Mahalanobis distance measurement between a sample of relatively healthy patients and two samples of patients were considered: the main - a group of patients receiving a new treatment, and an experimental - a group of patients receiving standard treatment for excess weight and arterial hypertension.*

*Therefore, the paper proposes for the first time the use of the Mahalanobis distance as a criterion for evaluating a large number of diverse physical indicators taken from a biological object.*

**Keywords:** Mahalanobis distance; statistical processing of medical data; information technologies in the processing of medical data.

Table: 1. Fig.: 5. References: 18.

**Артем Волокита<sup>1</sup>, Богдан Гереза<sup>2</sup>**<sup>1</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри обчислювальної техніки

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: [artem.volokita@kpi.ua](mailto:artem.volokita@kpi.ua), ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9069-5544><sup>2</sup> студент 6-го курсу факультету ІОТ

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: [bogdangerega19@gmail.com](mailto:bogdangerega19@gmail.com)**ЕВОЛЮЦІЯ АГЕНТІВ НАВЧАННЯ З ПІДКРІПЛЕННЯМ  
ЗА ДОПОМОГОЮ ГЕНЕТИЧНОГО АЛГОРИТМУ**

*Це дослідження вивчає використання генетичних алгоритмів для покращення продуктивності агентів, що навчаються за допомогою підкріплення. Ми провели випробування, використовуючи різні параметри нейронної мережі, зокрема ваги, зсуви та функції активації, з метою знайти оптимальні значення, які змушують агента отримувати більше винагород. Наш підхід включає використання знань про предметну область для ініціалізації популяції генетичного алгоритму, а також для оцінки рішень. Це дозволяє нам спрямувати пошук до більш перспективних рішень. Особлива увага приділена впливу різних параметрів генетичного алгоритму на ефективність навчання. Потенційні застосування цього дослідження широкі – від робототехніки та автономних транспортних засобів до ігор та фінансів. Результати дослідження також можна використовувати для розробки нових алгоритмів та методів для покращення продуктивності агентів, що навчаються за допомогою підкріплення, що далі сприятиме розвитку машинного навчання.*

*Наше дослідження показало, що використання генетичного алгоритму може значно покращити ефективність навчання агентів. Результатом роботи є успішне проходження гри CartPole-v0 еволюціонованими агентами. 98 % нашої популяції досягнуть максимуму, тобто успішно пройдуть гру.*

**Ключові слова:** навчання з підкріпленням; генетичний алгоритм; агент; безградієнтний підхід; нейронна мережа; CartPole, policy gradients.

*Рис.: 5. Бібл.: 10.*

**Актуальність теми дослідження.** Навчання з підкріпленням є потужним методом навчання машин приймати рішення на основі зворотного зв'язку, але досягти високої продуктивності може бути складно через складну та динамічну природу багатьох реальних середовищ. Генетичні алгоритми забезпечують перспективний підхід до вирішення цієї проблеми, дозволяючи агентам еволюціонувати з часом, адаптуючись до мінливих умов і покращуючи свою продуктивність шляхом спроб і помилок. Потенційні застосування цих досліджень дуже широкі – від робототехніки та автономних транспортних засобів до ігор і фінансів. Наприклад, натреновані агенти можуть бути використані для оптимізації логістики ланцюгів поставок, управління складними фінансовими портфелями або для контролю поведінки інтелектуальних роботів у динамічних і непередбачуваних середовищах. Крім того, висновки, отримані в результаті цього дослідження, можуть бути використані при розробці нових алгоритмів і методів для поліпшення продуктивності агентів RL, що сприятиме подальшому прогресу в галузі машинного навчання. Загалом, актуальність цієї теми дослідження підкреслює важливість розробки більш ефективних методів навчання, які здатні адаптуватися до складних середовищ.

**Постановка проблеми.** Навчання з підкріпленням прогресує повільно через низьку якість градієнтів. Відсутність інформації про градієнти призводить до нестабільного ландшафту, подібного до нерівної поверхні [1]. Припустимо, що мережа нашого агента подібна до дна океану, де між глибокими водами та поверхнею існує безліч різних підвищень та ущелин. У цьому випадку нерівності поверхні відображають параметри мережі нашого агента, які змінюються залежно від винагороди, яку отримує агент. Кілька ущелин на поверхні відображають високу винагороду, що відповідає добре працюючим параметрам, тоді як плоска поверхня відображає параметри, які не є ефективними. Ініціалізація агента на плоскій поверхні може призвести до того, що агент буде рухатися досить випадково та неефективно протягом тривалого часу. Таким чином, з низькоякісними градієнтами потрібно багато часу, щоб навчити агента.

Навчання з підкріпленням може бути ефективним, коли агент розуміє, які дії призводять до винагороди. Оскільки у навчанні з підкріпленням агент не повідомляється про наступні дії, це призводить до низької ефективності [2]. Агент, не знаючи, що робити, починає виконувати випадкові рухи, і лише зрідка середовище видає винагороду. І тепер вже агент повинен з'ясувати, яка з тисяч дій, які він зробив, призвела до того, що середовище дало винагороду. Люди так не навчаються! Нам кажуть, що потрібно робити, ми розвиваємо навички, а винагороди відіграють порівняно незначну роль у нашому навчанні.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Останніми роками було продемонстровано, що еволюційні алгоритми є конкурентоспроможною альтернативою методам оптимізації на основі градієнта для навчання з підкріпленням. Наприклад, у роботі «Evolution algorithms as a Scalable Alternative to Reinforcement Learning» [3] Саліманс зі співавторами досліджували використання еволюційних алгоритмів, класу алгоритмів оптимізації чорної скриньки, як альтернативи популярним методам на основі градієнтів, таким як глибоке Q навчання та policy gradients. Вони проводили кілька експериментів у середовищах MuJoCo та Atari, щоб показати, що еволюційні алгоритми є життєздатним рішенням.

У «Deep Neuroevolution: Genetic Algorithms Are a Competitive Alternative for Training Deep Neural Networks for Reinforcement Learning» [4], Петроскі Суч та інші запропонували подібний підхід до вирішення проблем навчання з підкріпленням за допомогою еволюційних алгоритмів, де потрібно розвивати попередні результати, щоб досягти кращого рівня, досягнутого за допомогою методів на основі градієнта. Це розширило попереднє уявлення про масштаб, у якому могли працювати генетичні алгоритми, і, використовуючи розпаралелювання, продемонструвало значні покращення в часі навчання, дозволяючи розв'язувати Atari приблизно за 4 години на сучасному обчислювальному пристрою.

Були ще розглянуті роботи щодо включення градієнтної інформації в еволюційні алгоритми для вирішення проблем глибокого навчання з підкріпленням. Наприклад, найбільш цікавою є робота «Evolutionary Reinforcement Learning» [5], у якій Хадка та Тумер пропонують гібридний алгоритм, який використовує популяцію генетичного алгоритму для надання різноманітних даних для навчання агента RL, і періодично повторно вводить агента в популяцію для введення градієнтної інформації.

Наша ж робота відрізняється тим, що нашим основним завданням є визначення оптимальних параметрів нейронної мережі, які змушують агента, що навчається за допомогою підкріплення, отримувати більше винагороди. Конкретно, ми досліджуємо вплив різних ваг, зсувів та функцій активації на продуктивність агента. Це означає, що генеруючи агентів, з часом ви знайдете агента, який працює добре. Таким чином ми перекриваємо фундаментальні недоліки, оскільки у RL є дуже мало інформації, яку ми можемо використовувати для навчання алгоритму. З цього випливає декілька переваг, які властиві нашій роботі, таких як незалежність від джерела ініціалізації, простота реалізації та висока ефективність.

Додатково, ми вивчаємо, як включення знань про предметну область у генетичний алгоритм може допомогти спрямувати пошук до більш перспективних рішень. Ми використовуємо ці знання для ініціалізації популяції алгоритму та оцінки рішень.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Генетичні алгоритми покладаються на метод спроб і помилок для еволюції агентів RL, що може бути обчислювально дорогим і трудомістким. Включення знань про предметну область у генетичний алгоритм може допомогти спрямувати пошук до більш перспективних рішень. Однак досліджень про те, як ефективно інтегрувати знання предметної області в процес еволюції, поки що мало.

У цьому дослідженні знання про предметну область включаються в генетичний алгоритм через використання спеціальних процедур ініціалізації. Замість випадкової ініціалізації, яка є типовою для багатьох генетичних алгоритмів, ми використовуємо процедуру, яка враховує знання про предметну область. Ця процедура ініціалізації включає в себе створення популяційних рішень, які вже відомі як ефективні або перспективні. Це може включати, наприклад, використання відомих ефективних стратегій або використання інформації про структуру проблеми для створення початкових рішень.

Цей алгоритм дозволяє почати роботу з перспективніших місць в просторі пошуку, що може прискорити збіжність до оптимального рішення. Проте необхідно зберегти деякий рівень випадковості в процесі ініціалізації, щоб забезпечити достатню різноманітність у популяції та уникнути передчасної збіжності.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** Для того щоб моделювати середовище, ми використовуємо інструмент, розроблений за допомогою OpenAI, під назвою OpenAI Gym. Він пропонує декілька заздалегідь створених середовищ для тренування та тестування агентів навчання з підкріпленням, включаючи класичні завдання для фізичного контролю, відеоігри Atari, а також симуляції роботів [6].

Ми отримали доступ до середовища, під'єднавши пакет Gym, де Gym — це бібліотека Python з відкритим вихідним кодом для розробки та порівняння алгоритмів навчання з підкріпленням, яка забезпечує стандартний API для зв'язку між алгоритмами навчання та середовищами, а також стандартний набір середовищ, сумісних із цим API.

API Gym моделює середовища як прості env класи Python. Створювати екземпляри середовища та взаємодіяти з ними дуже просто. Тому розглянемо важливі функції для взаємодії із середовищем [7]:

- **Reset:** ця функція скидає середовище до початкового стану та повертає спостереження середовища, що відповідає початковому стану.
- **Step:** ця функція приймає дію як вхідні дані та застосовує її до середовища, що призводить до переходу середовища в новий стан. Функція скидання повертає чотири параметри:
  - **Observation:** спостереження за станом навколишнього середовища.
  - **Reward:** винагорода, яку ви можете отримати від середовища після виконання дії, наданої як вхідні дані для step функції.
  - **Done:** чи було перервано серію. Якщо істина, вам може знадобитися завершити симуляцію або скинути середовище, щоб перезапустити епізод.
  - **Info:** це надає додаткову інформацію залежно від середовища, таку як кількість спроб, що залишилися, або загальну інформацію, яка може бути сприятливою для налагодження.
- **Render:** якщо ви хочете побачити, як середовище виглядає в поточному стані, ви можете використовувати цей метод. Якщо ви хочете бачити скріншот гри як зображення, а не як вигулькове вікно, вам слід встановити mode аргумент render функції на rgb\_array.
- **Close:** закриття вигулькового вікна.

У Cartpole стовп прикріплений за допомогою шарніру до візка, що рухається вздовж шляху без тертя. На початку стовп вертикальний, і метою є запобігання його падіння. Система контролюється шляхом прикладання сили зі значенням +1 чи -1 до візка. Винагорода +1 надається за кожен момент часу, коли стовп залишається вертикальним. Епізод закінчується коли стовп відхиляється більше ніж на 15 градусів від вертикалі, або візок від'їжджає більше ніж на 2,4 одиниці від центра шляху. Візуальна репрезентація візка зображена на рисунку 1.

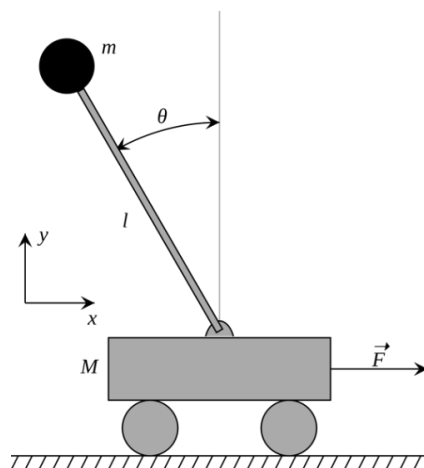


Рис. 1. Візуальна репрезентація CartPole

У цьому середовищі нашими спостереженнями будуть: позиція візка, швидкість візка, кут стовпа та швидкість повороту стовпа. На кожному кроці, агент може пересуватися двома способами: вліво або вправо.

У роботі використовується безградієнтний підхід до навчання з підкріпленням. Це означає що ми можемо навчати нейронні мережі без жодних обчислень градієнта. Отже, основна частина буде приділена генетичному алгоритму, оскільки з його допомогою ми удосконалюватимемо нашого агента. Тому розпочнемо з короткого його огляду.

Генетичні алгоритми – це типи алгоритмів, які засновані на концепції біологічної еволюції. Процес природного відбору починається з відбору найбільш пристосованих особин із популяції. Вони дають потомство, яке успадковує характеристики батьків і потомство буде додане до наступного покоління. Якщо батьки мають кращу фізичну форму, їхні нащадки будуть кращими за батьків і матимуть більше шансів вижити. Цей процес повторюється, і в кінці буде знайдено покоління з найбільш пристосованими особами [8]. Це поняття можна застосувати до проблеми пошуку. Ми розглядаємо набір рішень проблеми і вибираємо з них найкращі.

Щоб краще зрозуміти, як біологічну ідею можна перекласти в її математичне представлення найкраще спочатку розглянути кожен компонент окремо:

- Gene: ген або «індивід» – це просто кодування рішення, яке є довільним для кожної проблеми. Для нашої проблеми кодування генів є параметри (weights and biases) для нашої мережі.

- Population: популяція – це список генів, які наш алгоритм намагатиметься еволюціонувати, використовуючи обчислені рівні придатності кожного гена та еволюційні оператори.

- Fitness: фітнес оцінюється для кожної особи (гена) і також залежить від поточної проблеми. У нашому випадку придатність - це винагорода, яку агенти отримують від середовища.

- Evolutionary operators: існує безліч методів і операторів, які ми можемо використовувати в нашій еволюційній стратегії. Найпоширенішими є мутація та кросингвер.

- Мутація — це випадкова зміна частин гена (якщо ген — це рядок бітів, мутація може бути переворотом одного з бітів).

- Кросовер — це поєднання двох генів для утворення нового.

Розглянемо псевдокод генетичного алгоритму:

- Уявіть агента як організм.
- Параметрами будуть його гени, які визначають його поведінку (стратегію).
- Винагороди вказуватимуть на придатність організму (тобто чим вище винагорода, тим вище ймовірність виживання).
- У першій ітерації ви починаєте з  $X$  агентів із випадково ініціалізованими параметрами.



- Деякі з агентів випадково будуть працювати краще, ніж інші.
- За аналогією природної еволюції в реальному світі, ви реалізуєте виживання найбільш пристосованих: просто берете 10 % найпристосованіших агентів і відтворюєте їх для наступної ітерації, доки у вас знову не буде  $X$  агентів для наступної ітерації. Найслабших 90 % позбуваємось.
- Під час реплікації найкращих найпридатніших агентів, які становлять 10%, потрібно додати невеликий випадковий гаусівський шум до його параметрів, щоб у наступній ітерації ви могли досліджувати околиці навколо параметрів найкращих агентів.
- Зберігайте найефективнішого агента без додавання шуму, це підстрахування на випадок зниження продуктивності, яка може бути спричинена шумом Гаусса [9].

Схема роботи генетичного алгоритму представлена на рисунку 2.

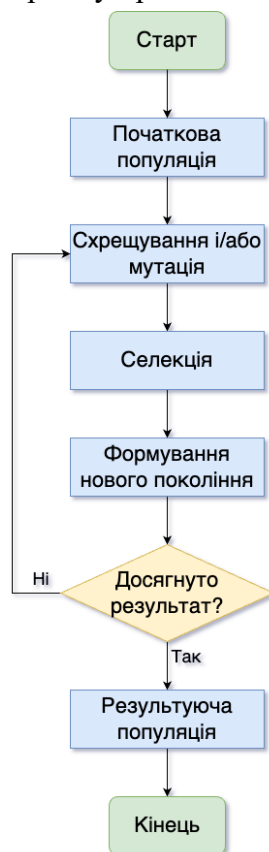


Рис. 2. Схема роботи генетичного алгоритму

Після огляду алгоритму роботи варто розглянути теоретичні переваги такого підходу:

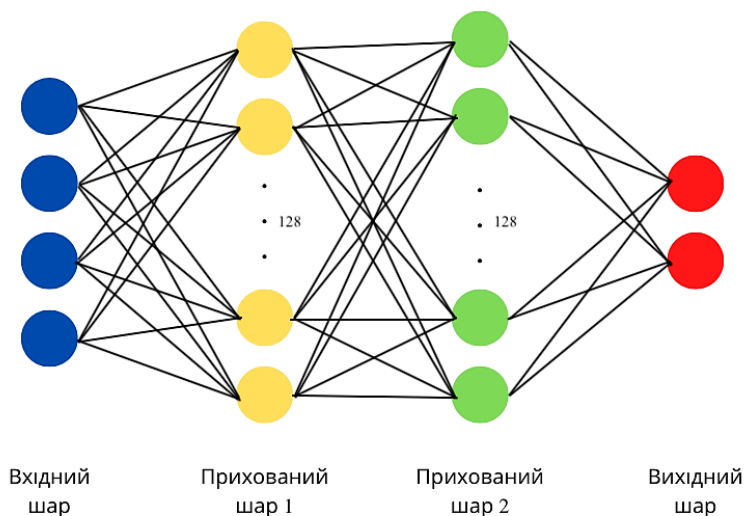
- По-перше, еволюційні алгоритми гарантовано знайдуть глобальний мінімум поверхні втрат за достатньої кількості ітерацій, тоді як градієнтні методи можуть застрягти в локальних мінімумах.

- По-друге, такий алгоритм легко реалізувати та масштабувати для будь-якої мережі.

Натомість основним недоліком є те, що генетичні алгоритми не ідеальні. Наприклад, немає вказівок щодо вибору мультиплікативного коефіцієнта під час додавання гауссівського шуму. Не вірно підібравши його ваш алгоритм може повністю вийти з ладу.

Також варто описати нашу нейронну мережу. Використовуючи PyTorch [10], ми параметризуємо агента через двошарову нейронну мережу. Тут використовується послідовна модель (Sequential) і перший шар є лінійним (Linear), як і інший другий. У першому шарі є 128 нейронів та входні розміри дорівнюють розміру стану, тому чотири стани середовища є входами в нашу модель. Активація для нашого шару встановлена, як Relu. Наступний шар має 128 нейрони, а активацією є функція Softmax. Це неглибока нейронна

мережа. Наш вихідний рівень містить стільки нейронів, скільки у нас можливих дій. Тобто дві можливі дії – праворуч або ліворуч є вихідними нейронами. Графічне зображення мережі продемонстровано на рисунку 3.



*Рис. 3. Глибока нейронна мережа з двома прихованими шарами*

У генетичному алгоритмі важливою частиною є вірний підбір параметрів, тому розглянемо їх на конкретному застосуванні в алгоритмі:

- Популяція становить 500 (numAgents) агентів, і ми генеруємо агентів випадковим чином під час першої ітерації. Розмір популяції має бути не надто великим, але й водночас не надто малим. Для вирішення нашої задачі оптимальною кількістю є саме 500, їх достатньо, щоб досліджувати простір.
- З 500-ста ми вибираємо лише 20 найкращих, як батьків (topLimit). Оптимальне значення батьків знаходиться як 1-10% від загальної кількості.
- Максимальна кількість ітерацій, яку ми хочемо запустити в циклі, становить 200 поколінь (generations). Хоча зазвичай для CartPole досить ефективний агент виявляється протягом кількох ітерацій.
- У кожному поколінні ми спочатку запускаємо всіх випадково згенерованих агентів і отримуємо їхню середню продуктивність за 3 прогони (все-таки одного разу може пощастити, тому ми хочемо усереднити).
- Ми сортуємо агентів у порядку спадання їхніх винагород (продуктивностей).
- Потім ми беремо 20 найкращих агентів і вибираємо випадковим чином серед них, щоб створити дітей для наступної ітерації. Також додаємо невеликий гауссівський шум до всіх параметрів під час копіювання агента, але зберігаємо одного найкращого з найкращих елітних агентів (без додавання шуму). Гауссівський шум – це мультиплікативний коефіцієнт, який є гіперпараметром і приблизно нагадує швидкість навчання в градієнтному спуску. Методом підбору було знайдено оптимальне значення, яке становить 0,02.
- Під час реплікації найкращих найпридатніших агентів, які становлять 10%, потрібно додати невеликий випадковий гауссівський шум до його параметрів, щоб у наступній ітерації ви могли досліджувати околиці навколо параметрів найкращих агентів.
- З дочірніми агентами тепер як батьками ми повторюємо та запускаємо весь цикл знову, доки не буде виконано всі 200 поколінь або ми не знайдемо агента з хорошою продуктивністю.

На рисунку 4 зображено графік середніх винагород, які отримали агенти на кожному з поколінь, тобто ми можемо відстежувати еволюцію агентів:

- generation 1: ми випадковим чином зініціювали агентів та отримали середню винагороду (meanRewards) для усіх агентів – 22, для найкращих п'яти (meanTopRewards) – 46.
- generation 26: meanRewards = 50, а meanTopRewards = 110.
- generation 52: середня винагорода (meanRewards) для усіх агентів становить 100, для найкращих п'яти (meanTopRewards) – 183. Це є дуже хорошим показником, адже наші агенти навчилися проходити вже 100 кроків гри.
- generation 55: ми отримали першого агента, який отримав винагороду 200, тобто один агент вже зумів пройти гру.
- generation 63: meanRewards = 135, а meanTopRewards = 200. Тобто у нас вже є 5 агентів, які пройшли гру до кінця.
- generation 68: meanRewards = 150, що свідчить про те, що значна кількість агентів практично досягають успіху.
- generation 71: 20 агентів отримали максимальну винагороду 200.
- generation 97: meanRewards = 181, що є показником, що еволюцію агентів можна було б припинити, але ми продовжуємо, щоб отримати ще кращі результати.
- generation 139: починаючи з цього покоління середня винагорода всіх агентів meanRewards становить 195 і вище.
- generation 200: meanRewards = 197, можемо з впевненістю стверджувати, що практично всі наші агенти вміють досягати максимуму.

Графік 4 свідчить про результативність обраного підходу та швидку еволюцію агентів. Тепер залишилось переконатись у ефективності еволюціонованих агентів.

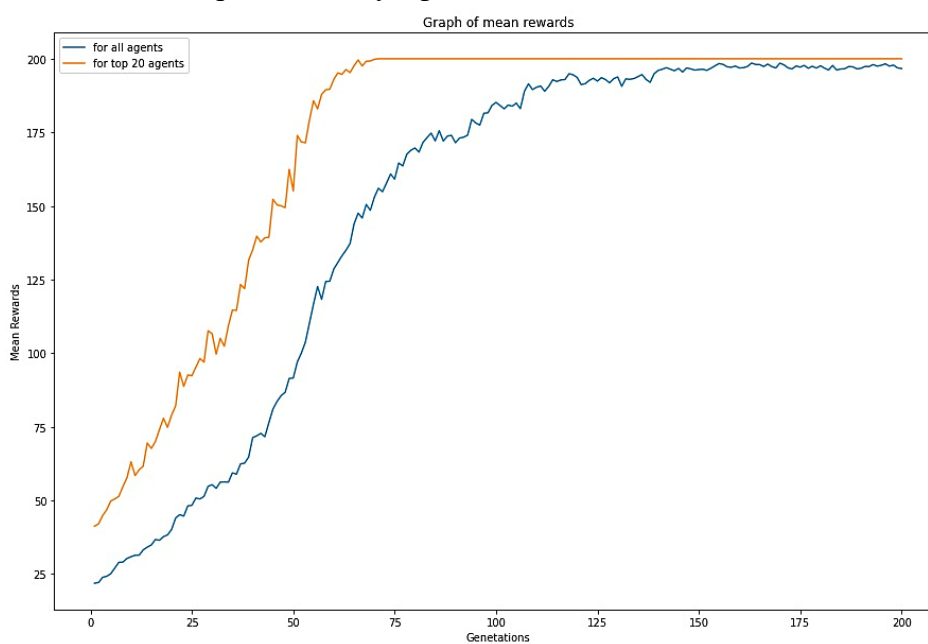


Рис. 4. Графік середніх винагород агентів на кожному поколінні

На рисунку 5 продемонстровано графік залежності винагороди для випадкових ста агентів з нашої популяції агентів, яка становить 500. Ми можемо побачити, що зі ста агентів, тільки двоє не досягли максимальної винагороди, вони отримали 199 та 189, що є також хорошим результатом.

Підбиваючи підсумки, можна заявити, що 2 % агентів можуть не виграти гру, натомість 98 % агентів успішно пройдуть гру CartPole-v0. Це є хорошим показником того, що ми еволюціонували агентів, та навчили їх досягати максимальної винагороди.

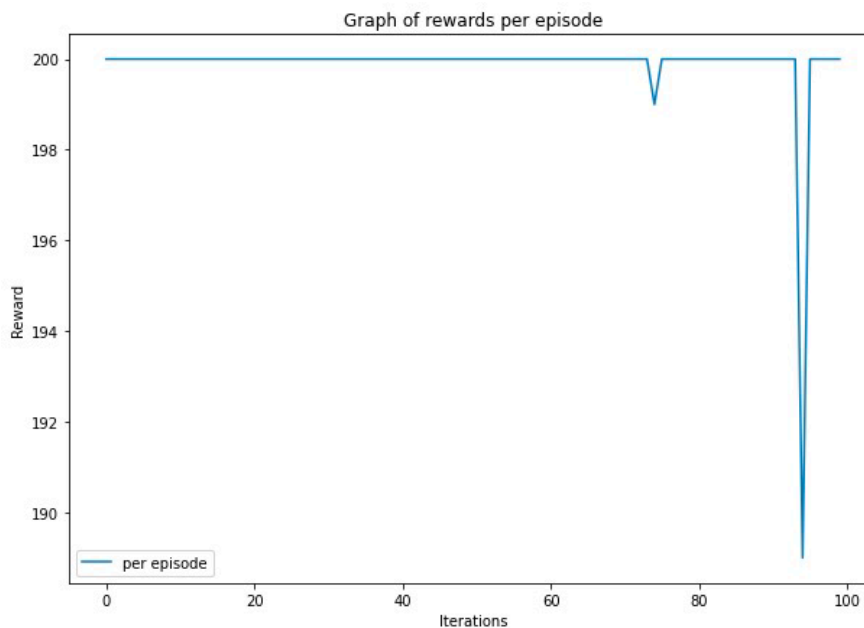


Рис. 5. Графік середніх винагород випадкових ста агентів

**Висновки.** У цій роботі було проведено дослідження використання генетичного алгоритму для еволюції агентів навчання з підкріпленням. Було виявлено, що генетичний алгоритм може бути ефективним інструментом для покращення процесу навчання агентів.

У цій роботі ми провели детальне дослідження використання генетичного алгоритму для еволюції агентів навчання з підкріпленням. Наші результати показали, що генетичний алгоритм може значно покращити процес навчання агентів, зокрема в контексті складних задач, де традиційні методи навчання можуть бути недостатніми.

Ми виявили, що використання генетичного алгоритму дозволяє агентам більш ефективно адаптуватися до нових ситуацій, що підтверджує його потенціал як інструмента для покращення процесу навчання.

Однак, ми також виявили, що вибір оптимальних параметрів генетичного алгоритму є важливим фактором, який впливає на його ефективність. Тому ми рекомендуємо провести додаткові дослідження для визначення оптимальних параметрів генетичного алгоритму в різних контекстах.

Також, ми бачимо потенціал для подальшого дослідження в області комбінації генетичного алгоритму з іншими методами машинного навчання. Це може відкрити нові можливості для покращення ефективності навчання агентів.

#### Список використаних джерел

1. The marginal value of adaptive gradient methods in machine learning [Electronic resource] / A. C. Wilson, R. Roelofs, M. Stern, N. Srebro, B. Recht // Advances in neural information processing systems. – Access mode: <https://arxiv.org/abs/1705.08292>.
2. Arzate C. A survey on interactive reinforcement learning: Design principles and open challenges / C. Arzate, T. Igarashi / Proceedings of the 2020 ACM designing interactive systems conference (2020, July). – Pp. 1195-1209.
3. Evolution strategies as a scalable alternative to reinforcement learning [Electronic resource] / T. Salimans, J. Ho, X. Chen, S. Sidor, I. Sutskever. – 2017. – Access mode: arXivpreprintarXiv:1703.03864.
4. Deep neuroevolution: Genetic algorithms are a competitive alternative for training deep neural networks for reinforcement learning [Electronic resource] / F. P. Such, V. Madhavan, E. Conti, J. Lehman, K. O. Stanley, J. Clune. – Access mode: <https://arxiv.org/abs/1712.06567>.
5. Khadka S. Evolution-guided policy gradient in reinforcement learning [Electronic resource] / S. Khadka, K. Tumer // Advances in Neural Information Processing Systems. – 2018. – № 31. – Access mode: <https://arxiv.org/abs/1805.07917>.

6. Openai gym [Electronic resource] / G. Brockman, V. Cheung, L. Pettersson, J. Schneider, J. Schulman, J. Tang, W. Zaremba. – Access mode: <https://arxiv.org/abs/1606.01540>.
7. Nandy A. OpenAI basics [Electronic resource] / A. Nandy, M. Biswas // Reinforcement Learning. – 2018. – Pp. 71-87. – Access mode: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4842-3285-9\\_3](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4842-3285-9_3).
8. Lambora A. Genetic algorithm-A literature review / A. Lambora, K. Gupta, K. Chopra // 2019 international conference on machine learning, big data, cloud and parallel computing (COMITCon) (2019, February). – Pp. 380-384.
9. Genetic algorithm: Review and application / M. Kumar, D. Husain, N. Upreti, D. Gupta // International Journal of Information Technology and Knowledge Management. – 2010. – Vol. 2, No. 2, July-December. – Pp. 451-454.
10. Mishra P. Introduction to neural networks using PyTorch / P. Mishra // PyTorch Recipes: A Problem-Solution Approach to Build, Train and Deploy Neural Network Model. – Apress, Berkeley, CA, 2023. – Pp. 117-133.

### References

1. Wilson, A.C., Roelofs, R., Stern, M., Srebro, N., & Recht B. (2017). The marginal value of adaptive gradient methods in machine learning. *Advances in neural information processing systems*. <https://arxiv.org/abs/1705.08292>.
2. Arzate, C., & Igarashi, T. (2020, July). A survey on interactive reinforcement learning: Design principles and open challenges. *Proceedings of the 2020 ACM designing interactive systems conference* (pp. 1195-1209).
3. Salimans, T., Ho, J., Chen, X., Sidor, S., & Sutskever, I. (2017). *Evolution strategies as a scalable alternative to reinforcement learning*. arXivpreprintarXiv:1703.03864.
4. Such, F.P., Madhavan, V., Conti, E., Lehman, J., Stanley, K. O., & Clune, J. (2017). *Deep neuroevolution: Genetic algorithms are a competitive alternative for training deep neural networks for reinforcement learning*. <https://arxiv.org/abs/1712.06567>.
5. Khadka, S., & Tumer, K. (2018). Evolution-guided policy gradient in reinforcement learning. *Advances in Neural Information Processing Systems*. <https://arxiv.org/abs/1805.07917>.
6. Brockman, G., Cheung, V., Pettersson, L., Schneider, J., Schulman, J., Tang, J., & Zaremba, W. (2016). *Openai gym*. <https://arxiv.org/abs/1606.01540>.
7. Nandy, A., & Biswas, M. (2018). OpenAI basics. *Reinforcement Learning* (pp. 71-87). [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4842-3285-9\\_3](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4842-3285-9_3).
8. Lambora, A., Gupta, K., & Chopra, K. (2019, February). Genetic algorithm-A literature review / A. Lambora // 2019 international conference on machine learning, big data, cloud and parallel computing (COMITCon) (pp. 380-384).
9. Kumar, M., Husain, D., Upreti, N., & Gupta, D. (2010). Genetic algorithm: Review and application. *International Journal of Information Technology and Knowledge Management*, 2(2), 451-454.
10. Mishra, P. (2023). Introduction to neural networks using PyTorch. *PyTorch Recipes: A Problem-Solution Approach to Build, Train and Deploy Neural Network Model* (pp. 117-133). Apress, Berkeley, CA.

Отримано 10.05.23

УДК 004.421

**Artem Volokyta<sup>1</sup>, Bohdan Hereha<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor of Department of Computer Engineering  
National Technical University of Ukraine “Ihor Sikorskyi Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)  
E-mail: [artem.volokita@kpi.ua](mailto:artem.volokita@kpi.ua). ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9069-5544>

<sup>2</sup>Student of the 6th year of the Faculty of IOT  
National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky” (Kyiv, Ukraine)  
E-mail: [bogdangerega19@gmail.com](mailto:bogdangerega19@gmail.com)

## EVOLUTION OF REINFORCEMENT LEARNING AGENTS USING THE GENETIC ALGORITHM

*Reinforcement learning (RL) allows agents to make decisions based on a reward function. However, in the process of learning, the choice of the values of the parameters of the learning algorithm can significantly affect the overall learning process. Agents using the policy gradient algorithm can be trained for a long time, but even then, they may not behave perfectly.*

*Thinking more about it, we realized that the reason for the long training is that gradients are almost absent, and therefore not very useful. Gradients help in supervised learning tasks, such as image classification, by providing useful information on how to change the parameters (weights or offsets) of the network for better accuracy. In image classification, after each mini-series of training, backpropagation provides a clear gradient (direction) for each parameter in the network. In reinforcement learning, however, the gradient information is only provided occasionally when the environment provides a reward or punishment. In most cases, our agent performs actions without knowing whether they are useful or not. Therefore, in this paper, we will improve the agents by using a genetic algorithm, i.e., we evolve the agents.*

*This research explores the use of genetic algorithms to improve the performance of reinforcement learning agents. We conducted a series of trials using various neural network parameters, including weights, biases, and activation functions, in order to find the optimal values that cause the agent to receive more rewards. Our approach includes the use of domain knowledge to initialize the population of the genetic algorithm as well as to evaluate solutions. This allows us to direct the search towards more promising solutions. Special attention is paid to the impact of various genetic algorithm parameters on learning efficiency. The potential applications of this research are broad, ranging from robotics and autonomous vehicles to gaming and finance. The results of the study can also be used to develop new algorithms and methods to improve the performance of reinforcement learning agents, which further contributes to the development of machine learning.*

*Our research has shown that the use of a genetic algorithm can significantly improve the efficiency of agent learning. The result is the successful completion of the CartPole-v0 game by evolved agents. 98 % of our population will reach the maximum, i.e. successfully complete the game.*

**Keywords:** reinforcement learning; genetic algorithm; agent; gradient-free approach; neural network; CartPole; policy gradients.

*Fig.: 5. References: 10.*