

Дорошенко В. С.

(ФТІМС НАН України, Київ)

## ВИГОТОВЛЕННЯ МЕТАЛО-ПІЩАНОГО КОМПОЗИТУ МЕТОДОМ ЛИТТЯ ЗА МОДЕЛЯМИ, ЩО ГАЗИФІКУЮТЬСЯ

E-mail: doro55v@gmail.com



**АНОТАЦІЯ.** У статті досліджено перспективний напрям створення композиційних матеріалів (КМ) з металевою матрицею та неметалевими наповнювачами за допомогою технології лиття за моделями, що газифікуються (ЛГМ). Автор наводить класифікацію сучасних композитів, адаптовану до актуальних тенденцій матеріалознавства, та визначає місце метало-піщаних структур у цій системі. Детально описано технологічний процес виготовлення КМ, який дає змогу формувати складну внутрішню геометрію виробу та інтегрувати наповнювачі без використання складного додаткового оснащення. Такий підхід забезпечує високу структурну жорсткість і термічну стабільність отриманих виробів при одночасному зниженні собівартості виробництва. Наведені приклади підтверджують ефективність методу ЛГМ для отримання функціонально-градієнтних конструкцій у сучасному машинобудуванні.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** композиційні матеріали, лиття за моделями, що газифікуються, метало-піщаний композит, металева матриця, класифікація матеріалів.

Композиційні матеріали (КМ) відіграють ключову роль у розвитку сучасного машинобудування, авіації, енергетики та інших галузей, які потребують поєднання високої міцності, термостійкості та невисокої густини. Значне різноманіття КМ і зростання потреби в них вимагають їхньої чіткої класифікації, що показано на схемі (рис. 1), адаптованій на основі загальноприйнятих принципів, викладених у [1–3] з урахуванням сучасних тенденцій у матеріалознавстві.

Особливу увагу привертають композити з металевою матрицею та неметалевими наповнювачами, зокрема піщаними, які забезпечують структурну

жорсткість і термічну стабільність. Одним із перспективних напрямів є виготовлення КМ методом лиття за моделями, що газифікуються (ЛГМ). Такий підхід дає змогу реалізувати складну внутрішню геометрію виробу, інтегрувати наповнювачі без додаткового оснащення (як показано нижче) та знизити витрати на виробництво. Як приклад виготовлення КМ методом лиття, розглянемо розроблений нами спосіб формування та лиття металевого каркасно-комірчастого композиту з інтегрованими піщаними стрижнями, які виконують роль внутрішнього наповнювача. Проведемо аналіз фізико-технологічних передумов та порівняння з аналогічними ливарними методами для обґрунтування цього способу.

Серед наших розробок відомий спосіб виготовлення виливків із чавуну з кулястим графітом литтям у вакуумовану піщану форму [4], в якому аргументовано обмеження товщини стінок до 16 мм завдяки інтенсифікації тепловідведення дією вакууму, що сприяє утворенню міцної дрібнозернистої кристалічної структури металу. За недостатньої міцності таких тонких стінок пропонується застосування ребер жорсткості, хоча з конструктивних міркувань це часто неприйнятно.

У монографії [5] зазначено, що тривалість затвердіння виливка обернено пропорційна квадрату його питомої поверхні. Описано способи виготовлення піщаних форм із геометричним орнаментом, що збільшує площу поверхні та сприяє утворенню міцної дрібнокристалічної кірки виливка. Проте застосування таких технологій ускладнює процес формування та потребує складного оснащення, що обмежує їх промислове використання. У більшості випадків товщина стінок литих деталей перевищує оптимальні значення і становить 15–50 мм [5].

Спосіб виготовлення просторового металевого каркасно-комірчастого матеріалу [6] передбачає використання біонічної конфігурації, але має обмежене застосування – як внутрішній холодильник або арматура. За умови його використання складання моделей із різностінних елементів потребує значних витрат і ручної праці.

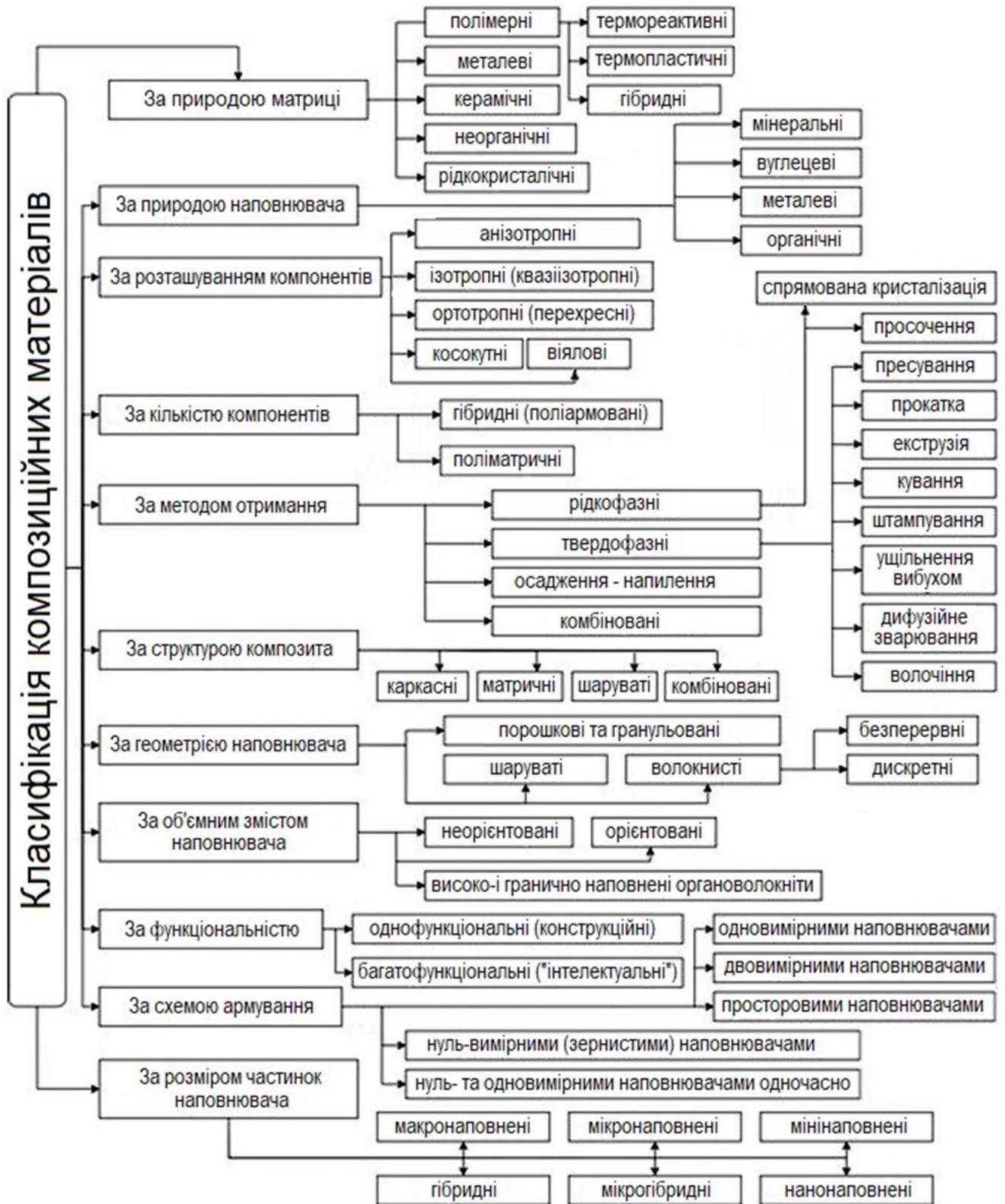


Рис. 1. Загальна класифікація композиційних матеріалів

За ЛГМ-процесом у разі виготовлення виливків з відкритими комірками складної геометрії нерідко важко забезпечити достатньо щільне заповнення

сухим піском, що може призводити до браку литва. А для закритих комірок КМ необхідним є застосування стрижнів із піщаної суміші із зв'язувальним компонентом, оскільки сухий пісок не утримується непорушно в замкненому об'ємі ливарної моделі в процесі її газифікації. Традиційно такі стрижні виготовляють у стрижневих ящиках [7], що потребує складного оснащення, високої точності та значних витрат. Це обмежує застосування таких технологій для каркасних композиційних виливків.

Найближчим аналогом розробленого способу є технологія виготовлення литого матеріалу стільникової структури з наскрізними порами [8]. Модель формується з елементів пінополістиролу (ППС), які спікаються у прес-формах або вирізаються, що ускладнює отримання тонкостінних деталей. Крім того, такі матеріали не дають змоги реалізувати закриті пори, заповнені неметалевим матеріалом для зменшення маси конструкції та її армування як КМ. Закриті пори доцільно формувати в зонах надлишкової товщини виливка, яка нерідко утворюється з огляду можливості формування в піщаній суміші та (або) за умовами протяжки моделі. Це дає змогу зменшити масу виробу без втрати міцності. Виконання таких пор піщаними стрижнями сприяє утворенню більш міцного металу в тонких стінках, як рекомендовано в роботах [4, 5].

На основі проведеного аналізу, основна мета розробки нового способу лиття полягала у досягненні трьох ключових результатів: зменшенні витрат на виготовлення оснащення для лиття каркасно-комірчастого матеріалу, скороченні обсягу ручної праці в процесі виготовлення моделі з комірками, які формуються піщаними стрижнями, а також в отриманні метало-піщаного КМ.

Особливість переліку операцій цього способу на основі ЛГМ-процесу для отримання металевого КМ полягала у використанні полімерної моделі як комбінованого формувального та стрижневого оснащення. Крім традиційного використання моделі з ППС, яку виготовляли з порожнинами, які відповідають коміркам майбутнього виливка, перед розміщенням моделі у формі її порожнини заповнюють стрижнями із піщаної суміші із зв'язувальним компонентом, які виготовляють безпосередньо в порожнинах моделі, використовуючи її як

стрижневе оснащення. При цьому відпадає потреба у стрижневому оснащенні, функцію якого виконує модель.

В іншому варіанті виготовлення ливарної полімерної моделі у вигляді двох половинок-оболонок здійснюється інноваційно 3D-друком або термоформуванням із термопластичного листа. У цьому випадку під час збирання моделі з двох оболонок простір між ними (крім піщаних стрижнів) частково або повністю заповнюється вставками з ППС, що дає змогу регулювати масу, газотвірність та геометрію моделі.

Розроблений нами спосіб розкриває додатковий потенціал ЛГМ-процесу шляхом використання полімерної моделі двояко: не лише як засобу формоутворення, а також і як стрижневого оснащення для формування піщаних стрижнів та носія цих стрижнів у робочій порожнині ливарної форми. Залежно від ступеню обливання розплавом металу, стрижні можуть як вибиватися традиційним способом, так і залишатися невивбитими, утворюючи з металом єдиний КМ. У випадку без вибивання, піщані стрижні з густиною  $1,6\text{--}2,0\text{ г/см}^3$  інтегруються в металеву матрицю (наприклад, із залізобуглецевих сплавів із густиною понад  $7,0\text{ г/см}^3$ ), що дає змогу зменшити масу КМ з закритими порами при збереженні його структурної цілісності та механічної міцності.

Під час випробування способу використано піщано-рідкоскляну суміш за  $\text{CO}_2$ -процесом як недорогого та поширеного для виготовлення форм і стрижнів [7, 9]. Отриманий металевий каркасно-комірчастий виріб містив піщані стрижні, механічно затиснені металом завдяки його усадці в процесі охолодження.

Варіанти способу ілюструє рис. 2. На рис. 2 (а) показано фрагмент полімерної моделі (у перерізі), що складається з: двох оболонок 1 (верхньої та нижньої), піщаного стрижня 2, який опирається на дві вставки 3 з ППС (розташовані знизу і зверху), фіксувальних елементів-гвіздків 4, отвору 5, повітряного простору 6. На рис. 2 б показано у перерізі фрагмент виливка 7 (відповідає фрагменту моделі), у якому стрижень 2 залишився невивбитим.

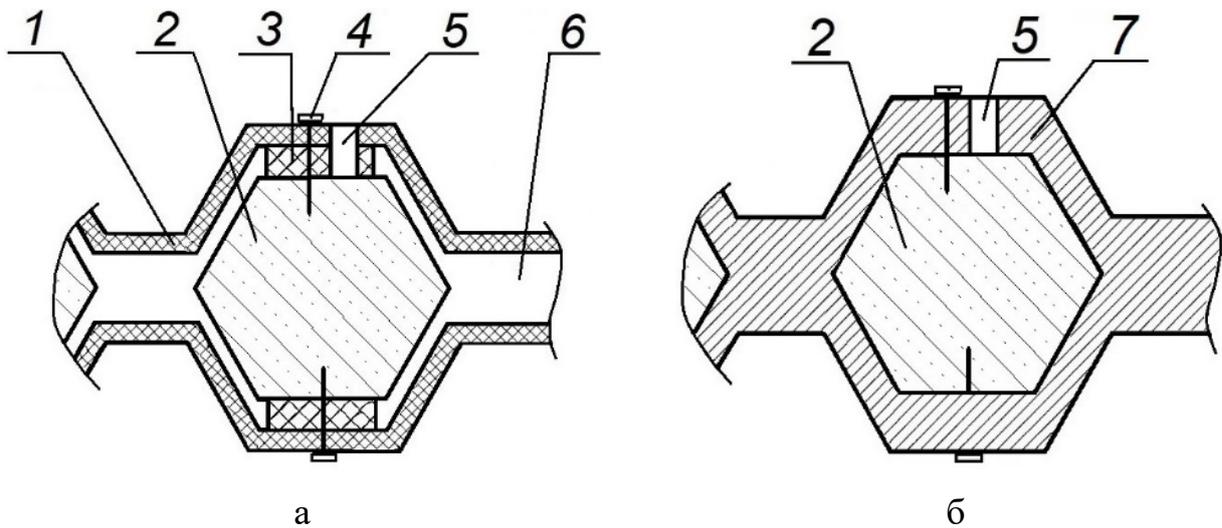


Рис. 2. Фрагменти моделі (а) та відповідної частини виливка (б): 1 – полімерна оболонка (верхня); 2 – стрижень; 3 – вставка з ППС; 4 – гвіздки; 5 – отвір; 6 – вільний простір; 7 – виливок

У першому варіанті реалізації модель з ППС для литого каркасно-комірчастого матеріалу являла собою такий «контейнер», у комірки нижньої половинки якої поміщали дозовані кількості пластичної стрижневої піщано-рідкоскляної суміші (5 % натрієвого рідкого скла). Цю суміш ущільнювали і підформовували шляхом накривання верхньою половиною моделі.

Після формування стрижнів у половинках моделі стрижневу суміш по щілинах їх стику продували вуглекислим газом  $\text{CO}_2$ , що призводило до її тверднення. Стрижні 2 за формою були подібні до зображених на рис. 2. Вставки (прокладки) 3 у випадку з половинками моделі з ППС достатньої товщини (5–10 мм) не застосовували. Перед твердненням стрижнів їх додатково фіксували в стінках моделі за допомогою тонких гвіздків 4. Зібрану модель зі стрижнями по периметру покривали стрічкою типу «скотч». В обох варіантах застосовували протипригарне покриття зовнішньої поверхні моделі, яке ретельно висушували.

Перед розміщенням моделі в піщаній формі в одній з оболонок 1 і вставках 3 висвердлювали канали 5 навпроти стрижнів 2 для того, щоб гази могли виходити із стрижнів 2 після обливання їх металом. Ці канали під час формування моделі в сухому піску з віброущільненням заповнювались піском,

який контактував із стрижнями 2. Це давало змогу газам виходити у вакуумований пісок, вакуум з якого частково проникав у пори стрижнів і сприяв видаленню з них газів, запобігаючи потраплянню їх у метал вилівка. Подальші операції отримання виливків не відрізнялись від типових операцій для ЛГМ-процесу. Товщина стінок отриманого литого матеріалу навколо стрижнів відповідала товщині стінок тих ділянок моделі, які охоплювали стрижні, а на ділянках між стрижнями – дорівнює сумі товщин двох половинок моделі у стику. На виливковій 7 (рис. 2 б) канал, який раніше був заповнений піском, також утворювався.

В другому варіанті виготовляли модель з двох полімерних тонкостінних оболонок 1 (рис. 2, а) аналогічно процесу, описаному вище. Спочатку без вставок 3 ці оболонки змикали і формували в їх порожнинах стрижні 2 за  $\text{CO}_2$ -процесом. Після часткового тверднення суміші під стрижні і над ними розміщували вставки з ППС, половинки моделей змикали, фіксували гвіздками 4 і продували зібрану модель вуглекислим газом крізь простір 6 для остаточного тверднення стрижнів. Після фарбування і сушіння покриття виконували канали 5, формували модель в піску і заливали отриману форму аналогічно першому прикладу, отримавши в обох випадках виливок 7 із стрижнями 2.

Для другого прикладу полімерні оболонки 1 моделі виготовляли 3D-друком з матеріалу PLA, аналогічно способу [10]. Оскільки друкований матеріал має більшу питому масу і газотвірність, ніж звичний для ЛГМ-процесу ППС, то об'ємну масу всієї моделі в цілому зменшували шляхом зменшення товщини стінок оболонки 1, а також регулюванням об'єму простору 6 за рахунок вибору товщини вставок 3, що є новою особливістю цього способу ЛГМ за друкованими чи комбінованими моделями. По суті, піщаний стрижень 2 разом із вставками 3 виконує роль розпірки для «наповнення повітрям» моделі і регулювання її газотвірності під час термодеструкції, що відкриває додаткові можливості ЛГМ-процесу за рахунок використання друкованих моделей. Перевагою є те, що при цьому друкуються лише дві оболонки моделі, тоді як відомі аналоги моделей комірчастих литих виробів містять значно більшу кількість деталей для

подальшого збирання. Крім того, ЛГМ-процес для комірчастих литих виробів за друкованими моделями ще не розроблено.

Водночас, сучасні, навіть бюджетні (настільні) 3D-принтери дають змогу друкувати оболонки товщиною від 0,1 мм і більше для моделей будь-яких конкретних структур литого металевого каркасно-комірчастого матеріалу. Це дає змогу гнучкого варіювання товщини стінки оболонкової моделі для забезпечення необхідних розмірів, конструкції та умов експлуатації кінцевого литого матеріалу.

Також для виготовлення оболонок описано спосіб термоформування виробів із термопластичного полімерного листа, наприклад, товщиною від 0,2 до 2,0 мм. Він включає нагрівання листа до температури, відповідної типу полімеру, з подальшим формуванням у прес-формі під дією вакууму або тиску. Для поширених видів полімерів ця температура знаходиться в інтервалі 85–170 °С. За цим методом масово виготовляють лотки для яєць, блістери для цукерок – прозорі пластикові вставки з осередками, які утримують кожну цукерку окремо, ложементи для фіксації виробів в упаковці та касети для багатоосередкових вкладок. Термоформування вигідне для моделей серійних виробів з КМ.

Вакуумування піску ливарної форми в процесі ЛГМ призводить до того, що після нагрівання розплавом металу оболонки моделі в ливарній формі міцно присмоктуються до поверхні піску, який оформлює обриси робочої порожнини форми, і газифікуються в контакт з ним. За потреби, для більш надійного фіксування крупних стрижнів, гвіздки 4 можна висунути на 2–5 мм з поверхні моделі, щоб вони заглиблювались у пісок форми. На виливку виступи гвіздків легко видаляються механічним способом. Також для збільшення жорсткості моделей можливе застосування в просторі 6 додаткових вставок з легкового ППС, аналогічних вставкам 3.

Описаний спосіб дає змогу виготовлення литого КМ без вибивання стрижнів із виливків. Але також доступні варіанти повного або часткового вибивання всіх чи частини стрижнів, для яких можливим є використання легковибивних стрижневих сумішей разом із передбаченими конструкцією моделі отворами в литому металі. Це характеризує технологічну гнучкість

способу, коли матеріал, який не містить в собі стрижнів, є не КМ, а каркасно-комірчастим цільнометалевим.

Реалізація описаного способу за рахунок зменшення витрат в процесі виготовлення стрижнів без стрижневого оснащення, а також скорочення ручної праці в процесі виготовлення моделей з комірками методами 3D-друку та термоформування розширюють застосування ЛГМ-процесу як за друкованими моделями, так і для отримання метало-піщаного композиту. Переваги способу включають можливість зменшення маси металовиробів без втрати носійної здатності разом із збільшенням питомої поверхні стінок вилівка і зменшенням їх товщини, що прискорює затвердіння металу з формуванням дрібнозернистої структури високої міцності.

Армування металевих матеріалів неметалевими елементами дає змогу надати виробу додаткових функціональних властивостей, зокрема підвищення опору проникненню – збільшення протидії можливого імпульсного проникному руйнуванню за рахунок зміни механічних характеристик матеріалу в напрямку дії силового вектора руйнування, що характерно для бронеперешкод.

Таким чином, запропонований спосіб виливання як метало-піщаного композиту, так і каркасно-комірчастого матеріалу забезпечує ресурсоефективне виробництво, зменшення маси виробів без втрати міцності, а також можливість інтеграції додаткових функціональних властивостей шляхом армування. Технологія придатна для широкого застосування в галузях, де важливі оптимізація масогабаритних характеристик, структурна міцність та економічність литва. Наведено класифікацію композиційних матеріалів, що дає змогу позиціонувати розробку в межах сучасної системи матеріалознавства.

### **Література**

1. Callister W. D., Rethwisch D. G. Materials Science and Engineering: An Introduction. 9th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2014. – 960 p.
2. Hull D., Clyne T. W. An Introduction to Composite Materials. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1996. – 352 p.

3. ASM International. ASM Handbook. Volume 21: Composites. Materials Park, OH: ASM International, 2001. – 812 p.
4. Патент 126031 Україна, МПК В22D 7/00, В22D 23/00. Виливок з чавуну з кулястим графітом. Опубл. 11.06.2018, Бюл. № 1.
5. Цибрик А. Н., Аверченков М. И., Цибрик В. А. Основы структурно-геометрического упрочнения деталей. – Київ: Наукова думка, 1979. – 178 с.
6. Патент 90494 Україна, МПК В22D 7/00, В22D 23/00, В22D 25/0025. Просторовий металевий виливок. Опубл. 11.05.2010, Бюл. № 9.
7. Лютий Р. В., Гурія І. М. Формувальні матеріали: підручник для студ. спец. 136 «Металургія». – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 257 с.
8. Патент 96915 Україна, МПК В22С 7/02, В22С 9/04. Литий матеріал стільникової структури з кризними порами. Опубл. 26.12.2011, Бюл. № 24.
9. Патент 128924 U Україна, МПК В21С 5/00, В21D 19/00. Спосіб одержання зносостійких біметалевих плоских виливків. Опубл. 10.10.2018. – Бюл. № 19.
10. Патент 157522 Україна, МПК В22С 7/02, В22С 9/04. Спосіб лиття металу за 3D-друкованими моделями, що газифікуються у вакуумованих формах з сипкого піску. Опубл. 30.10.2024, Бюл. № 44.



**ABSTRACT.** The article explores a promising direction for creating composite materials (CMs) with a metal matrix and non-metallic fillers using lost foam casting (LFC) technology. The author provides a classification of modern composites, adapted to current trends in materials science, and determines the position of metal-sand structures within this system. The technological process for manufacturing CMs is described in detail, allowing for the formation of complex internal geometries and the integration of fillers without complex additional equipment. This approach ensures high structural rigidity and thermal stability of the resulting products while simultaneously reducing production costs. The provided examples confirm the effectiveness of the LFC method for producing functionally graded structures in modern mechanical engineering.

**KEYWORDS:** composite materials, lost foam casting, metal-sand composite, metal matrix, materials classification.