

В. С. Дорошенко<sup>1</sup>  
О. В. Хоменко<sup>2</sup>  
О. Б. Янченко<sup>3</sup>

## РОЗРОБКА МЕТОДУ ЛИТТЯ МЕТАЛО-ПІЩАНИХ КОМПОЗИТІВ ЗА ПОЛІМЕРНИМИ МОДЕЛЯМИ В КОНТЕКСТІ СУЧАСНОЇ СИСТЕМАТИЗАЦІЇ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

<sup>1</sup>Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України

<sup>2</sup>Вінницький національний технічний університет

<sup>3</sup>ТОВ «ЗГАР»

В умовах динамічного розвитку композиційних матеріалів (КМ) критично необхідною є їхня наукова систематизація, оскільки традиційні класифікаційні підходи недостатні для ефективного прогнозування експлуатаційних властивостей при проектуванні таких матеріалів. У першій частині роботи представлена багатофакторна, багаторівнева схема систематизації КМ. Ця блок-схема відображає взаємозв'язок технологічних, структурних та функціональних аспектів створення матеріалу, що слугує методологічним підґрунтям для позиціонування об'єктів дослідження в межах сучасної системи матеріалознавства. На основі систематизації розроблено спосіб лиття метало-піщаних композиційних матеріалів (ЛКМ) із застосуванням ЛГМ-процесу (лиття за моделями, що газифікуються). Мета полягала у подоланні обмежень ЛГМ-процесу при отриманні конструкційних КМ із замкненими, неметалевими, заповненими комірками, та зниженні собівартості виробництва шляхом оптимізації стрижневого оснащення. Сутність інновації – принципово нове використання полімерної моделі як комбінованої формувальної та стрижневої оснастки (носія). Модель використовується для формування піщаних стрижнів з піщано-рідкоскляної суміші (СО<sub>2</sub>-процес), які утримуються в ливарній формі та залишаються в тілі ЛКМ. Це усуває необхідність у дорогавартісній традиційній стрижневій оснастці, підвищуючи економічну ефективність процесу. Розроблений спосіб використовує тонкостінні полімерні оболонки, виготовлені з ППС, 3D-друком із PLA або термоформуванням. Використано ту особливість, що для друкованих моделей можливе регулювання газотвірності за рахунок зміни товщини стінок та використання інтегрованого піщаного стрижня як внутрішньої розпірки.

Отриманий метало-піщаний композит (стрижні з густиною 1,6...2,0 г/см<sup>3</sup> в матриці з густиною >7,0 г/см<sup>3</sup>) має істотне зменшення маси виробу без втрати міцності. Прискорена кристалізація металу через зменшення товщини стінок сприяє формуванню дрібнозернистої структури високої міцності. Армування надає вилітку додаткових функціональних властивостей, зокрема підвищення опору імпульсному проникаючому руйнуванню, що є критичним для бронеперешкод і захисних споруд. Спосіб технологічно гнучкий, дозволяючи отримувати як метало-піщаний КМ, так і каркасно-комірчастий цільнометалевий виріб. Технологія спроектована для розробки легковагих модулів швидкісного будівництва захисних споруд.

**Ключові слова:** композиційні матеріали, систематизація, лиття за моделями, що газифікуються (ЛГМ-процес), метало-піщаний композит, стрижнева оснастка, 3D-друк, каркасно-комірчаста структура, зменшення маси, захисні споруди

### Вступ

Композиційні матеріали (КМ) відіграють ключову роль у розвитку сучасних високотехнологічних галузей, зокрема машинобудування, авіації, енергетики та спеціальної техніки. Їхня зростаюча цінність зумовлена унікальною здатністю зберігати високі міцні, жорсткі та експлуатаційні характеристики, навіть в екстремальних умовах, включаючи високі температури, агресивні середовища та значні механічні навантаження [1-3]. За своєю суттю, КМ являють собою об'ємне поєднання не менше двох різнорідних за хімічним складом фаз, розділених вираженою межею. Саме це синергетичне поєднання компонентів дозволяє матеріалу набувати таких експлуатаційних властивостей, які не притаманні жодній із фаз окремо, як у якісному, так і в кількісному вимірах.

Основними елементами КМ є матриця і наповнювач. Варіювання їхнього хімічного складу, співвідношення, орієнтації та дисперсності забезпечує надзвичайно широкий спектр різноманітних композитів. Така структурна варіативність є підґрунтям для подальшого вдосконалення та створення принципово нових матеріалів і процесів їх виготовлення. Ця особливість дозволяє заздалегідь проектувати фізико-механічні властивості КМ (відтак їх відносять до категорії design materials),

оптимізуючи виробу під конкретні умови експлуатації та розширюючи сфери їхнього застосування. Типовими представниками КМ є волокноармовані полімери, керамічні та вуглецеві матеріали, а також дисперсно-зміцнені сплави та псевдосплави. Зважаючи на безперервне зростання різноманіття КМ та їхній міждисциплінарний характер, нагальною потребою стає їхня адекватна наукова систематизація. Традиційні класифікаційні підходи, які здебільшого базуються на типі матриці (металеві, полімерні, керамічні), є недостатніми, оскільки вони ігнорують ключові структурні, технологічні та функціональні фактори, які визначають кінцеві експлуатаційні характеристики матеріалу. Для ефективного прогнозування властивостей, цілеспрямованого пошуку оптимальних рішень та організації інженерних задач необхідна чітко структурована, комплексна та багатофакторна система.

*Метою роботи є представлення такої багатофакторної схеми систематизації та демонстрація її практичного застосування на прикладі розробки нового ливарного процесу для метало-піщаного композиту.*

### **Розробка принципів систематизації композиційних матеріалів**

На виконання поставленої задачі, була розроблена багатофакторна схема систематизації КМ (рис. 1). Вона ґрунтується на детальному аналізі сучасних та класичних літературних джерел [1-4], а також використовує два взаємопов'язані принципи – технологічний та матеріалознавчий, які були застосовані в аналогічній, але менш розгалуженій схемі [5]. Головною відмінністю розробленої системи є принцип її багаторівневості та охоплення одинадцяти критичних параметрів, кожен з яких відображає фундаментальний аспект створення та функціонування КМ. Ця схема є не просто статичним набором категорій; вона функціонує як логічна блок-схема, де вибір компонента, структури чи методу виготовлення на одному рівні систематизації має прямий детермінуючий вплив на наступні складові рівні. Такий підхід забезпечує системний пошук та проектування композитів з цільовими експлуатаційними властивостями.

Систематизація розпочинається з базових параметрів, що визначають основу матеріалу. Першим є критерій за природою матриці, який задає температурний, хімічний та електрофізичний діапазон експлуатації, розрізняючи полімерні, металеві, керамічні неорганічні та рідкокристалічні матеріали, в тому числі виокремлюючи вид терморективних, термопластичних та гібридних матриць. Наступним є критерій за природою наповнювача, який виділяє мінеральні, вуглецеві, металеві та органічні компоненти, що несуть передусім функцію зміцнення.

Далі схема переходить до архітектурних та структурних ознак. Критерій за розташуванням компонентів визначає ступінь анізотропії, тобто залежності властивостей від напрямку, розділяючи ізотропні, анізотропні та ортотропні композити. Тут же деталізується тип укладання: косокутне, в'ялове. Четверта ознака – за кількістю компонентів – відображає складність, виділяючи гібридні (поляризовані) та поліматричні системи. Технологічна складова описується критерієм за методом отримання, який є ключовим для промисловості, розрізняючи рідкофазні, твердофазні та комбіновані процеси, включаючи специфічні методи осадження/напилення, а також серед ряду традиційних методів спрямовану кристалізацію та ущільнення вибухом. Ґрунтовне значення має систематизація за структурою композиту, яка поділяє матеріали на каркасні, матричні, шаруваті та комбіновані, прямо впливаючи на механіку руйнування. Критерій за геометрією наповнювача відділяє порошкові/гранульовані від шаруватих та волокнистих, причому останні поділяються на безперервні та дискретні. Кількісну сторону описує критерій за об'ємним вмістом наповнювача, де окрім орієнтованих/неорієнтованих, виділяються високо-гранично наповнені матеріали.

Завершальні критерії стосуються найсучасніших аспектів матеріалознавства. Критерій за функціональністю розрізняє однофункціональні (конструкційні) та багатофункціональні («інтелектуальні») КМ, здатні до адаптації. Критерій за схемою армування деталізує просторове розташування наповнювачів, поділяючи їх на нуль-вимірні (зернисті), нуль- та одновимірні, а також одно-, двовимірні та просторові (тривимірні). І, нарешті, одинадцятий критерій – за розміром частинок наповнювача – вводить шкалу дисперсності: макро-, мікро- аж до нанонаповнених, включаючи гібридні та мікрогібридні види, що є вирішальним для матеріалів, які можуть демонструвати квантові ефекти.

Технологічна ознака (метод отримання) в роботі [5] вважається найбільш універсальною, оскільки технологічний процес безпосередньо визначає початкові властивості, структуру, вартість та кінцеве призначення КМ. Саме тому, в контексті представленої систематизації, ми конкретизуємо тему нашого дослідження – розробку одного із способів лиття метало-піщаних композитів за моделями, що газифікуються (ЛГМ-процес).

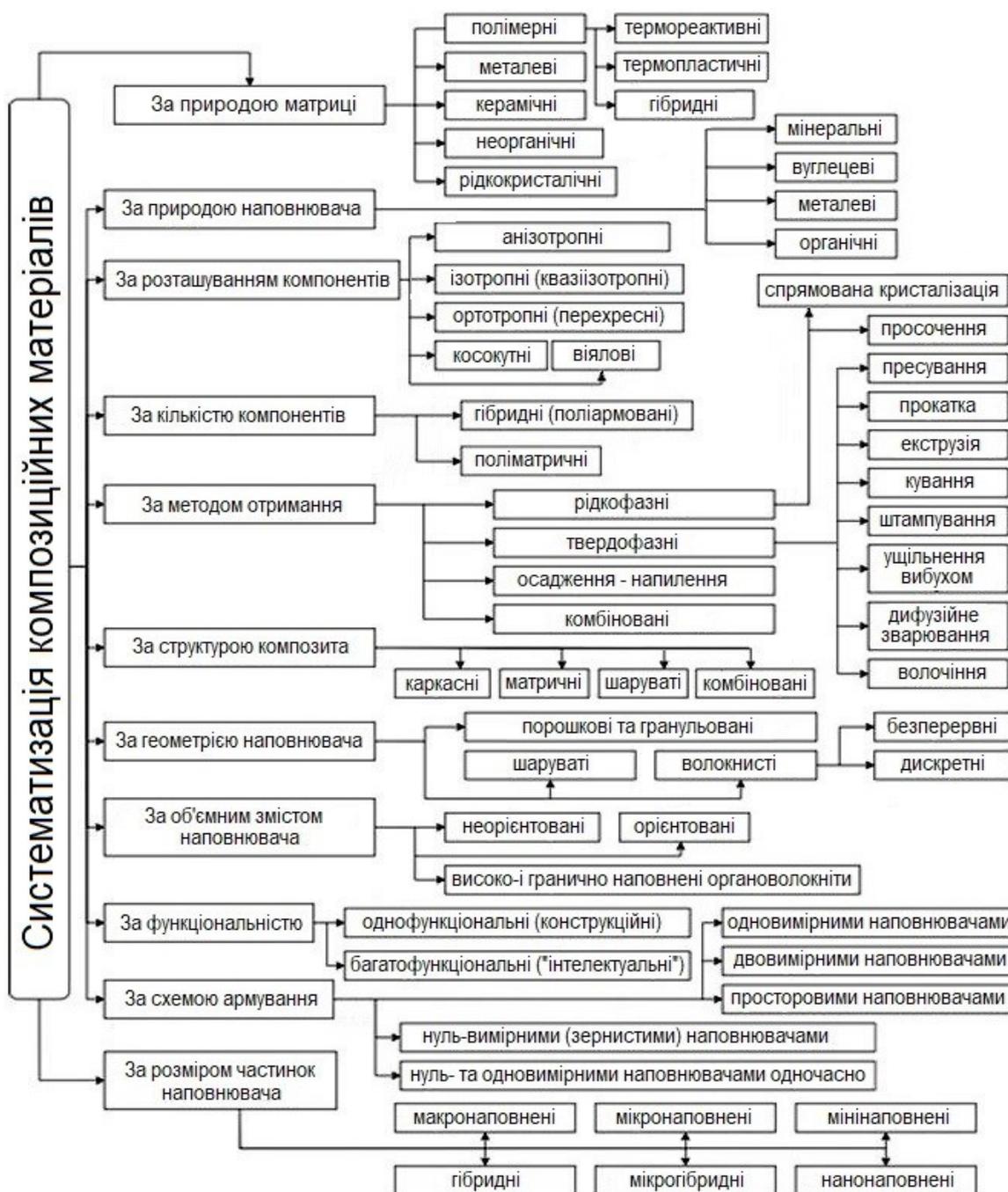


Рис. 1. Схема систематизації композиційних матеріалів

Згідно зі схемою (рис. 1), даний спосіб відноситься до технологічного розділу методів отримання литих композиційних матеріалів (ЛКМ), які, як відомо з публікацій [5-9], виготовляються двома головними шляхами: сполученням твердої фази з рідкою, або рідкофазним сполученням різних компонентів між собою. При цьому хімічна сумісність компонентів є важливою умовою для забезпечення стабільності композиту при експлуатаційних навантаженнях [5]. Об'єкт нашого дослідження є функціональним КМ з металевою матрицею, отриманою рідкофазним методом, та з мінеральним (неметалевим) дисперсним наповнювачем. Таким чином, представлена схема слугує методологічним підґрунтям для наукового позиціонування об'єкта дослідження – розробки способу ЛГМ метало-піщаних композитів – опису якого присвячено наступний розділ.

### Розробка способу лиття метало-піщаних композитів за моделями, що газифікуються

ЛГМ-процес, на потенціальних можливостях якого ґрунтується розроблений нами спосіб виготовлення ЛКМ, є однією із найбільш перспективних та ресурсоефективних технологій [10-12]. Цей метод дозволяє отримувати металеві виливки складної форми з високою точністю та, що є важливим для нашого дослідження, інтегрувати в їх стінки наповнювачі, тим самим створюючи композитні

виливки з нерідко унікальними властивостями [12]. Це стає можливим завдяки використанню полімерної моделі (як правило, з пінополістиролу, ППС) як носія наповнювача чи арматури, що забезпечує їхнє точне позиціонування в литій матриці після заміщення металом моделі при заливанні ним піщаної форми з такою моделлю.

Аналіз технологічних обмежень та існуючих аналогів показує, що дослідження КМ на основі залізвуглецевих сплавів (сталі та чавуну) із застосуванням ЛГМ-процесу є епізодичними [12]. Розглядаючи ширше коло аналогів, варто зазначити, що з теплофізичної точки зору піщаний наповнювач ЛКМ, розташований всередині вилівка, можна розглядати як елемент піщаної форми. Він виконує роль, подібну до внутрішнього холодильника або стінки піщаної форми при традиційному литті, сприяючи інтенсифікації тепловідводу. Так, відомий спосіб лиття вилівок із чавуну з кулястим графітом у вакуумованих піщаних формах (подібних до ЛГМ), в якому аргументовано корисність обмеження товщини стінок до 16 мм [13]. Це класичний метод, в якому інтенсифікація тепловідводу за рахунок зменшення стінки вилівка сприяє формуванню дрібнозернистої структури металу, що підвищує його міцність [14]. Проте, у більшості випадків товщина стінок литих деталей перевищує оптимальні значення, а застосування існуючих технологій, як-от виготовлення методом ЛГМ литого матеріалу стільникової структури з кризними порами [15], не дає змоги створити закриті комірочки, заповнені неметалом. Саме такі закриті комірочки дозволяють зменшити масу металоконструкції без втрати її зовнішньої цілісності, що є ключовою перевагою такої каркасно-комірчастої структури КМ. Крім того, для формування таких закритих комірок ЛКМ методом ЛГМ, наповнювач повинен бути попередньо сформований у вигляді стрижнів із піщаної суміші зі зв'язувальним компонентом. При цьому традиційне виготовлення стрижнів у стрижневих ящиках є витратним через необхідність виготовлення, зберігання та обслуговування цієї дорогої формувальної оснастки [16].

На основі проведеного аналізу конструкції каркасно-комірчастих вилівок [15, 17], мета нашої розробки полягала у створенні технології, що дозволяє зменшити витрати на оснащення, використовуючи формування елементів (стрижнів) наповнювача, зокрема за CO<sub>2</sub>-процесом, описаним у роботах [16, 18], скоротити обсяг ручної праці та отримати метало-піщаний ЛКМ із закритою комірчастою структурою.

Сутність розробленого способу лиття метало-піщаного ЛКМ на основі ЛГМ-процесу полягає у використанні ливарної полімерної моделі не лише як традиційного засобу формоутворення вилівка, а водночас як стрижневої оснастки для формування піщаних стрижнів. Далі в технології лиття така модель також слугує засобом утримання, або носієм, цих стрижнів в робочій порожнині ливарної форми, де вони частково чи повністю обливаються розплавом металу. Таким чином, полімерна модель стає комбінованою формоутворюючою та стрижневою оснасткою, в якій спочатку формують піщані стрижні, а потім її газифікують під час ЛГМ-процесу. Це конструктивне та технологічне рішення повністю усуває необхідність у традиційній стрижневій оснастці (зазвичай дерев'яній чи металевій), що значно підвищує економічну та виробничу ефективність технології. Для прикладу проектування способу модель каркасно-комірчастого матеріалу виконується у вигляді двох тонкостінних оболонок (половинок). Вони можуть бути виготовлені з ППС, за допомогою 3D-друку (з PLA), наприклад, як описано в способі [19], або термоформуванням. Формування піщаних стрижнів проходить шляхом заповнення порожнин моделі піщаною сумішшю зі зв'язувальним компонентом, використовуючи модель як стрижневу оснастку. Такі ливарні полімерні моделі у вигляді двох половинок-оболонок виготовляли методом вирізання їх з блочного ППС, а піщано-рідкоскляну суміш за CO<sub>2</sub>-процесом, як поширену у ливарних цехах та недорогу за собівартістю, використали для виготовлення стрижнів. 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, що опирається на дві вставки 3 з ППС (розташовані знизу та зверху), фіксуючих елементів – гвіздків 4, отвору 5, повітряного простору 6. На рис. 2 б показано у перерізі фрагмент отриманого вилівка 7 (відповідає фрагменту моделі), у якому стрижень 2 залишився невідбитим [20].

Деталізація технологічного процесу лиття метало-піщаного ЛКМ розглянемо на прикладі двох варіантів реалізації. У першому варіанті реалізації модель з ППС для зразка ЛКМ представляла собою «контейнер», в комірочки нижньої половинки якого поміщали дозовані кількості пластичної стрижневої піщано-рідкоскляної суміші (із 5% рідкого натрієвого скла). Цю суміш ущільнювали і формували шляхом притискання при накриванні верхньою половинкою моделі. Після формування стрижнів у половинках моделі стрижневу суміш по щілинах їх стику продували вуглекислим газом CO<sub>2</sub>, взаємодія рідкого скла з яким призводила до тужавлення та тверднення суміші. У випадку використання половинок моделі з ППС достатньої товщини (5...10 мм) вставки-розпірки 3 з ППС можна не застосовувати. Перед тужавленням 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 типове для ЛГМ протипригарне покриття зовнішньої поверхні моделі, яке ретельно висушували.

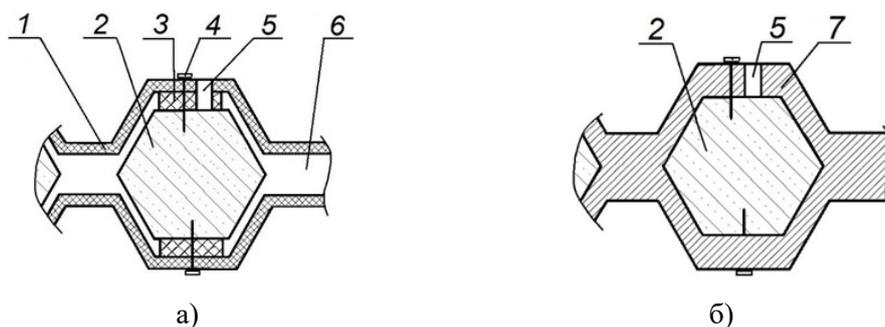


Рис. 2. Фрагменти моделі (а) та відповідної частини виливка (б): 1 – полімерна оболонка (верхня); 2 – стрижень; 3 – вставка з ППС; 4 – гвіздки; 5 – отвір; 6 – вільний простір; 7 – виливок

В процесі виготовлення піщаної форми та лиття металу при ЛГМ піщані стрижні 2 функціонують як внутрішні розпірки, утримуючи тіло моделі, зібране з двох половинок. Перед розміщенням моделі в піщаній формі в одній з оболонок 1 та вставках 3 висвердлювали канали 5 навпроти стрижнів 2 для забезпечення виходу газів із стрижнів під час обливання та нагрівання їх металом. Ці канали під час формування моделі у сухому піску з віброущільненням у контейнерній опоці заповнювались піском, що контактував зі стрижнями 2. Це дозволяло газам виходити у вакуумований пісок, при цьому вакуум частково проникав у пори стрижнів та сприяв видаленню з них газів, запобігаючи попаданню продуктів газифікації у метал виливка. Подальші операції виготовлення виливків не відрізнялись від типових операцій для ЛГМ-процесу. Товщина стінок отриманого литого матеріалу навколо стрижнів відповідає товщині стінок тих ділянок моделі, що охоплювали стрижні, а на ділянках між стрижнями дорівнює сумі товщин двох половинок моделі у стику. На виливкові 7 (рис. 2 б) канал 5, що раніше був заповнений піском, також утворювався після висипання піску.

Другий варіант реалізації способу передбачав виготовлення полімерних оболонок 1 моделі за допомогою 3D-друку з матеріалу PLA. Оскільки друкований полімер має більшу питому вагу та газотвірність, ніж звичайний для ЛГМ-процесу ППС, виникла необхідність у зменшенні об'ємної ваги всієї моделі. Це завдання вирішували шляхом зменшення товщини стінок оболонки 1, а також регулюванням об'єму вільного простору 6 за рахунок вибору товщини вставок 3. Цей принцип регулювання газотвірності моделі при термодеструкції шляхом зменшення її загальної маси за рахунок «наповнення повітрям» стінок є новою особливістю цього способу ЛГМ для друківаних чи комбінованих моделей, що відкриває широкі можливості для використання 3D-друку. При цьому піщаний стрижень 2 разом із вставками 3 функціонує як ефективна розпірка.

У цьому варіанті модель із двох полімерних тонкостінних оболонок 1 (Рис. 2, а) збирали аналогічно процесу, описаному вище, включно з виготовленням стрижнів 2. Після фарбування та сушіння покриття виконували канали 5, формували модель у піску та заливали металом отриману форму аналогічно першому прикладу, отримавши в обох випадках виливок 7 зі стрижнями 2. Перевагою розробленого підходу 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 [15, 17, 20]. Крім того, ЛГМ-процес для комірчастих литих виробів за друківаними моделями ще не розроблено, оскільки друкування ливарних піномоделей знаходиться лише на експериментальному рівні, що підтверджує новизну запропонованого підходу. Водночас, сучасні, навіть бюджетні (настільні), 3D-принтери дозволяють друкувати оболонки товщиною від 0,1 мм та вище для полімерних моделей з наступним отриманням 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 ЛКМ. Як альтернативний, проте високопродуктивний метод, для виготовлення оболонок описано поширений спосіб термоформування виробів із термопластичного полімерного листа, наприклад, товщиною 0,2...2,0 мм [20]. Цей процес включає нагрівання листа до температури в інтервалі 85...170 °С (залежно від типу полімеру) з подальшим формуванням у прес-формі під дією вакууму або тиску. Термоформування вигідне для виготовлення моделей серійних виробів з КМ, оскільки за цим методом масово виготовляють лотки для яєць, блістери для цукерок, ложементи для фіксацій виробів в упаковці та касети для багатоосередкових вкладок. Технологічна особливість, властива ЛГМ-процесу, – вакуумування піску ливарної форми – призводить до того, що при нагріванні розплавом металу

оболонки моделі міцно присмоктуються до поверхні піску, що 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...3 мм з поверхні моделі, щоб вони заглиблювались у пісок форми. На виливку виступи гвіздків легко видаляються механічним способом. Також для збільшення жорсткості крупних моделей можливе застосування в просторі 6 додаткових вставок з легковагого ППС, аналогічних вставкам 3. Отриманий металевий каркасно-комірчастий виріб (як варіант ЛКМ) у своїх комірках містив піщані стрижні, які механічно затиснуті металом завдяки його усадці, властивій для процесу охолодження.

У розробленому способі виготовлення ЛКМ вибівання стрижнів з виливків не виконується. Для формування стрижнів можуть вибиратись піщані суміші, яким властиве додаткове зміцнення шляхом спікання [21], а також створення з металом хімічного зв'язку [22]. Отриманий метало-піщаний композит демонструє особливі функціональні властивості. Наприклад, за цим принципом у ФТІМС НАН України розроблено конструкції литих легковагих металевих модулів для швидкісної побудови захисних споруд різної конфігурації, призначених для збереження об'єктів критичної інфраструктури, ЗСУ, промисловості та захисту цивільного населення [23, 24]. Крім того, для виготовлення протирадіаційних укриттів доцільно взяти за аналог спосіб виготовлення литого контейнера з високоміцного чавуну для захоронення та транспортування радіоактивних відходів, корпус якого містить влиті стрижневі вставки з кам'яного металургійного матеріалу з густиною 3,40 г/см<sup>3</sup>, які практично не зменшують (порівняно з чавуном) рівень біологічного захисту від радіоактивних відходів [20, 25]. Водночас, підкреслимо технологічну гнучкість розробленого методу. Доступні варіанти повного або часткового вибівання всіх чи частини стрижнів, для яких можливо використання легковибивальних стрижневих сумішей разом з передбаченими конструкцією моделі отворами у литому металі. У цьому випадку матеріал без стрижнів вже не є КМ, а стає каркасно-комірчастим цільнометалевим виробом. Реалізація описаного способу розширює застосування ЛГМ-процесу завдяки значному зменшенню витрат під час виготовленні стрижнів (через відмову від дорогої стрижневої оснастки), а також скороченню обсягу ручної праці під час виготовленні моделей із комірками методами 3D-друку та термоформування. Основні переваги способу включають можливість зменшення маси металовиробів без втрати несучої здатності. Це досягається завдяки тому, що піщані стрижні з низькою густиною (1,6...2,0 г/см<sup>3</sup>) інтегруються в металеву матрицю, наприклад, із залізовуглецевих сплавів із густиною понад 7,0 г/см<sup>3</sup>, що дозволяє значно зменшити масу КМ із закритими порами при збереженні його структурної цілісності та механічної міцності. Крім того, збільшення питомої поверхні стінок виливка і зменшення їх товщини (аналогічно роботам [13, 14]) прискорює затвердіння металу з формуванням дрібнозернистої структури високої міцності. Також армування металевого матеріалу неметалевими елементами, що спікаються і зміцнюються при нагріванні металом, дозволить надати виробу додаткових функціональних властивостей, зокрема підвищення опору проникненню. Це проявляється як збільшення протидії можливого імпульсному проникаючому руйнуванню за рахунок зміни механічних характеристик матеріалу у напрямку дії силового вектора руйнування, що є критично важливим для бронеперешкод.

### Висновки

Таким чином, розроблений спосіб виливання як метало-піщаного композиту, так і каркасно-комірчастого матеріалу забезпечує ресурсоефективне виробництво, зменшення маси виробів практично без втрати міцності, а також можливість інтеграції додаткових функціональних властивостей. Розроблена технологія придатна для широкого застосування в галузях, де важливі оптимізація масогабаритних характеристик, структурна міцність та економічність лиття. Представлена схема систематизації КМ дозволила здійснити наукове позиціонування розробки у межах сучасної системи матеріалознавства.

Дослідження виконано згідно з договором 226 (166/24) від 22.02.2024 про наукове співробітництво між ФТІМС НАН України та ВНТУ.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] W. D. Callister and D. G. Rethwisch, *Materials Science and Engineering: An Introduction*, 9th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2014.
- [2] D. Hull and T. W. Clyne, *An Introduction to Composite Materials*, 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.
- [3] ASM International, *ASM Handbook. Volume 21: Composites*. Materials Park, OH: ASM International, 2001.
- [4] O. P. Cheiliakh and Ya. O. Cheiliakh, "Implementation of Physical effects in the Operation of Smart Materials to Form Their Properties," *Progress in Physics of Metals*, vol. 21, no. 3, pp. 363 – 463, 2020.

- [5] Altenbach, H., J. Altenbach, K. Naumenko: *Ebene Flächentragwerke – Grundlagen der Modellierung und Berechnung von Scheiben und Platten*. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, New York, 2. Aufl., 2016.
- [6] Olena Dana, An Analysis of the Features of Cast Composite Materials Based on Light Alloys Reinforced by Particles. *Journal of Casting Materials Engineering* 2022/6/1.
- [7] D. B. Miracle, "Metal matrix composites – From science to technological significance," *Composites Science and Technology*, vol. 65, pp. 2526–2540, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2005.05.02>.
- [8] A. Mortensen and J. Llorca, "Metal Matrix Composites," *Annual Review of Materials Research*, vol. 40, pp. 243–270, 2010. <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070909-104511>
- [9] P. Garg, A. Jamwal, D. Kumar, K. K. Sadasivuni, C. M. Hussain, and P. Gupta, "Advance research progresses in aluminium matrix composites: manufacturing & applications," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 8, no. 5, pp. 4924–4939, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.06.028>.
- [10] W. Jiang and Z. Fan, "Novel technologies for the lost foam casting process," *Frontiers of Mechanical Engineering*, vol. 13, no. 1, pp. 37–47. 2018.
- [11] K. A. Guler, A. Kisasoz and A. Karaaslan, "A novel method for Al/SiC composite fabrication: Lost foam casting," *International Journal of Materials Research*, vol. 3, pp. 304–308. 2011.
- [12] П. Б. Калюжний, В. А. Слюсарев та Д. О. Калашник, "Армування виливків за технологією лиття за моделями, що газифікуються," *Металознавство та обробка металів*, № 4, с. 48 – 53. 2017.
- [13] В. С. Дорошенко та В. О. Шинський, "Виливок з чавуну з кулястим графітом," Патент України, МПК В22 D7/00, В22 D23/00. № 126031, 11.06.2018.
- [14] А. Н. Цибрик, М. И. Аверченков та В. А. Цибрик, *Osnovy strukturno-geometricheskogo uprochneniya detaley* Київ: Наукова думка, 1979.
- [15] О. Й. Шинський та В. С. Дорошенко, «Литий матеріал стільникової структури з крізними порами», Патент України, МПК В22С 7/02, В22С 9/04. № 96915, 26.12.2011.
- [16] Р. В. Лютий, І. М. Гурія, *Формувальні матеріали: підручник для студ. спец. 136 «Металургія»*. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020.
- [17] О. Й. Шинський та В. С. Дорошенко, "Просторовий металевий виливок," Патент України, МПК В22D 7/00, В22D 23/00, В22D 25/00. № 90494, 11.05.2010.
- [18] В. П. Лихошва, П. М. Каричковський, О. А. Пелікан та ін., "Спосіб одержання зносостійких біметалевих плоских виливків," Патент України, МПК В21С 5/00, В21D 19/00. № 128924 U, 10.10.2018.
- [19] Патент 157522, Україна, "Спосіб лиття металу за 3D-друкованими моделями, що газифікуються у вакуумованих формах з сипкого піску," Опубл. 30.10.2024.
- [20] В. С. Дорошенко, Виготовлення метало-піщаного композиту методом лиття за моделями, що газифікуються, *Нові матеріали і технології в машинобудуванні – 2025: XVII МНТ конференція*. Київ, Україна: 25...26.09.2025, с. 211 – 219.
- [21] І. А. Шалевська, В. С. Дорошенко та М. М. Дьяченко, "Особливості вибору дисперсних неметалевих матеріалів для армування литих металокопункцій," у *Литво. Металургія. 2023: XIX МНП конференція*. Харків – Київ, Україна: 10..12.10.2023, с. 224 – 227.
- [22] М. М. Дьяченко, І. А. Шалевська, І. В. Корнієць, С. В. Гнилюсценко та І. А. Небожак, "Дослідження формування перехідного шару в системі «метал-неметалевий наповнювач», на *Перспективні технології, матеріали й обладнання в ливарному виробництві: X Міжнародн. наук.-техн. конференція*. Краматорськ, 21 – 23.10.2025, с. 44 – 45.
- [23] І. А. Шалевська, В. С. Дорошенко, П. Б. Калюжний, та Ю. Г. Квасницька, "Огляд застосування металевих литих матеріалів у будівництві підземних та захисних споруд," *Метал і лиття України*, № 4, с. 54-61. 2022. <https://doi.org/10.15407/steelcast2022.04.054>
- [24] Національна академія наук України, Національна академія наук України в 2020 – 2025 роках. Основні підсумки. Київ: Академперіодика, 2025.
- [25] Д.С. Козак, В.Б. Бубликов, А.А. Шейко та ін., "Спосіб виготовлення виливка корпусу контейнера для захоронення та транспортування радіоактивних відходів," Патент України, МПК В22D 25/00, В22D 15/00, G01F 5/00. № 88741, 10.11.2009.

Стаття надійшла до редакції 17.02.2025 р.

Прийнята до друку після рецензування 20.03.2026 р.

Опублікована 30.03.2026

**Дорошенко Володимир Степанович** – д-р техн. наук, старший наук. співробітник, провідний науковий співробітник відділу фізико-хімії ливарних процесів, <https://orcid.org/0000-0002-0070-5663>, e-mail: [doro55v@gmail.com](mailto:doro55v@gmail.com)

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, м. Київ

**Хоменко Олександр Валерійович** – студент, кафедра галузевого машинобудування, <https://orcid.org/0009-0001-3895-8981>, e-mail: [sanek2017sto@gmail.com](mailto:sanek2017sto@gmail.com)

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

**Янченко Олександр Борисович** – канд. техн. наук, доцент, директор, <https://orcid.org/0000-0002-3888-3772>, e-mail: [1961yab@gmail.com](mailto:1961yab@gmail.com)

ТОВ «ЗГАР», м. Вінниця

V. Doroshenko<sup>1</sup>  
O. Khomenko<sup>2</sup>  
A. Yanchenko<sup>3</sup>

## Development of the metal-sand composite casting method using polymer patterns in the context of modern composite materials systematization

<sup>1</sup>Physico-technological institute of metals and alloys National academy of sciences of Ukraine

<sup>2</sup>Vinnitsia National Technical University

<sup>3</sup>ZGAR LLC

*In the context of the dynamic development of Composite Materials (CMCs), their scientific systematization is critically necessary, as traditional classification approaches are insufficient for effectively predicting operational properties during the design of such materials. The first part of the work presents a multi-factor, multi-level CMC systematization scheme. This block diagram reflects the interrelation of technological, structural, and functional aspects of material creation, serving as a methodological basis for positioning research objects within the modern system of materials science. Based on the systematization, a method for casting Metal-Sand Cast Composite Materials (LCMCs) using the Lost Foam Casting (LFC) process was developed. The goal was to overcome the limitations of the LFC process in obtaining structural CMCs with closed, non-metallic, filled cells, and to reduce production cost by optimizing core tooling. The essence of the innovation is the fundamentally new use of the polymer pattern as a combined molding and core tooling (carrier). The pattern is used to form sand cores from a sand-liquid glass mixture (CO<sub>2</sub>-process), which are held in the mold and remain in the LCMC body. This eliminates the need for expensive traditional core tooling, significantly increasing the economic efficiency of the process. The developed method utilizes thin-walled polymer shells made from Expanded Polystyrene (EPS), PLA by 3D printing, or thermoforming. The feature utilized is that for printed patterns, gas-forming capacity can be regulated by changing the wall thickness and using the integrated sand core as an internal spacer. The resulting metal-sand composite (cores with a density of 1.6...2.0 g/cm<sup>3</sup> in a matrix with a density of >7.0 g/cm<sup>3</sup>) shows a significant reduction in the product's mass without loss of strength. Accelerated metal crystallization due to reduced wall thickness promotes the formation of a fine-grained, high-strength structure. The reinforcement provides the casting with additional functional properties, particularly increased resistance to impulsive penetrating destruction, which is critical for anti-armor obstacles and protective structures. The method is technologically flexible, allowing for the production of both metal-sand CMC and a hollow metallic cell-framework product. The technology is designed for the development of lightweight modules for the rapid construction of protective structures.*

**Keywords:** composite materials, systematization, Lost Foam Casting (LFC), metal-sand composite, core tooling, 3D printing, cell-framework structure, mass reduction, protective structures.

**Doroshenko Volodymyr** – Dr. Sc. (Eng.), Leading Researcher, Leading Researcher, Department of Physics and Chemistry of Foundry Processes, <https://orcid.org/0000-0002-0070-5663>, e-mail: [doro55v@gmail.com](mailto:doro55v@gmail.com)

**Khomenko Oleksandr** – student, Department of Industrial Mechanical Engineering, e-mail: [sanek2017sto@gmail.com](mailto:sanek2017sto@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0001-3895-8981>

**Yanchenko Oleksandr** – Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Director, <https://orcid.org/0000-0002-3888-3772>, e-mail: [1961yab@gmail.com](mailto:1961yab@gmail.com)