

О. Й. Шинський<sup>1</sup>  
В. С. Дорошенко<sup>1</sup>  
О. Б. Янченко<sup>2</sup>

## ПЕРСПЕКТИВИ ВИГОТОВЛЕННЯ ЛИТИХ ЛЕГКОВАГИХ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ ДЛЯ БУДІВНИЦТВА СПОРУД МОДУЛЬНОГО ТИПУ

<sup>1</sup>Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ  
<sup>2</sup>Вінницький національний технічний університет

*Виконано огляд швидкозбірних модульних будівельних металоконструкцій з переліком їх переваг та оцінкою повторного використання порівняно з будівельними конструкціями з бетону та дерева. Наведено аналіз структури вартості таких металоконструкцій та їх монтажу. Зазначено, що найефективніший засіб зниження вартості металоконструкцій – це зменшення витрат металу. На відміну від зварних для болтових конструкцій спрощується монтаж та болтові з'єднання забезпечує можливість демонтажу конструкції з перевезенням на інше місце, що важливо для ангарів, складів, які змінюють локацію. Значні можливості має застосування литих металоконструкцій, зокрема виготовлених способом лиття за моделями, що газифікуються, (ЛГМ) у вакуумовані форми з силіконового піску. Розглянуто мотивацію, методи і приклади оптимізації конструкцій, а також наслідування конструкцій природи, зокрема кристалічних матеріалів, для рукотворних металовиробів. Комірчасті просторові матеріали, отримані методом ЛГМ, розширюють існуючий спектр властивостей порівняно з компактними матеріалами. А литі ґратчасті матеріали, зокрема, аналоги яких взяті з макро- та мікросвіту природи, зі збірних модельних елементів спростять конструювання та дозволять налагодити випуск комірчастих матеріалів та каркасних легкового виробів, які часто називають «матеріалами майбутнього». Україна отримує метал із власних руд і здатна перевести його у високотехнологічний наукомісткий товар у вигляді машин, механізмів та будівельних металевих конструкцій. Розвиток подібних технологій відкриває шляхи запозичення відомих нам конструкційних властивостей природних матеріалів не лише для їх копіювання, а й для отримання нових матеріалів та конструкцій з оптимізацією під конкретні механізми чи будівлі. При цьому будівництво із застосуванням металоконструкцій має всі передумови стати ефективним рішенням в будівельній галузі, що сприятиме відбудові країни.*

**Ключові слова:** модульні конструкції, будівельні металоконструкції, моделювання, структури природи, виливки, заощадження металу, лиття за моделями, що газифікуються.

### Вступ

За нинішніх вітчизняних умов створення збірних модульних будівельних споруд, які швидко монтуються з металевих конструкцій, вельми злободенне з урахуванням такого переліку їх основних переваг. Висока несуча здатність – можливість сприймати значні навантаження при відносно невеликих перерізах внаслідок значної міцності металу; висока надійність, оскільки такі конструкції можуть бути розраховані досить точно, легкість та транспортабельність. Металеві конструкції в порівнянні з конструкціями з каменю, залізобетону та дерева найлегші. Вони майже в 4 рази легші за залізобетонні і часто легші за дерев'яні (при використанні на однакові навантаження), а якщо металеві конструкції найлегші при значній питомій вазі металу, то вони і більш транспортабельні і легко монтуються. За умов застосування суцільного матеріалу та сполучень є можливість виконувати водонепроникні конструкції, а індустріальне виробництво будівельних металоконструкцій досягається виготовленням конструкцій на спеціалізованих заводах.

### Результати огляду та технологічних розробок

З огляду виснаження невідновлюваних природних ресурсів і утворення відходів однією з ключових проблем є великий обсяг споживання природних ресурсів і значна частина відходів, що утворюється в будівництві та інфраструктурі, зокрема, в будівництві, ремонті та зносі. Поточні сценарії термінів експлуатації трьох найпоширеніших будівельних матеріалів показано на порівняльній схемі (рис. 1) з будівельної енциклопедії Великобританії [1] для бетону, деревини та сталі. Після закінчення експлуатації 93 % сталевих конструкцій доступно для переробки в конструкції для нових будівель, що в рази більше ніж для таких з бетону чи деревини.

Металеві конструкції зручні в експлуатації, тому що легко можуть бути посилені зі збільшенням допустимих навантажень. Вони найповніше використовуються при реконструкціях та легко ремонтуються. Для оцінки переваг та недоліків будівельних металевих конструкцій враховують їх економічну ефективність залежно від умов монтажу та експлуатації будівель і споруд, що зводяться.



Рисунок 1 – Схема поточних операцій після закінчення терміну експлуатації трьох найпоширеніших будівельних матеріалів: бетону, деревини та сталі [1].

Вартість конструкцій складається з вартості металу для виготовлення конструкцій (60-70 %), вартості виготовлення металоконструкцій на заводі (15-20 %) та вартості монтажу (10-15 %). У вартість металевих конструкцій входять також транспортні витрати (3-7 %) та вартість проектування (3-5 %). Ціна металу, що застосовується для конструкцій, практично пропорційна його масі. Вартість виготовлення та монтажу конструкцій також пропорційна їх масі, тому оптимальна, найбільш економічна конструкція – це конструкція, маса якої мінімальна. Отже, найефективніший засіб зниження вартості металоконструкцій – це зменшення витрат металу. Значного зниження маси металевих конструкцій досягають за рахунок використання сталей підвищеної міцності, а також оптимізації конструкції, при якій вона вимагає мінімуму витрат за умови задоволення вимог міцності, жорсткості та стійкості.

Основним заходом зменшення вартості виготовлення металевих конструкцій є зниження трудомісткості їх виготовлення. Найвища продуктивність праці досягається на спеціалізованих підприємствах, які оснащені спеціальним обладнанням. Вартість монтажу скорочується зі зростанням його швидкості, а ця швидкість збільшується при скороченні числа елементів, з яких збирається споруда, і при спрощенні з'єднань, що залежить від способу з'єднань та виду застосованих вузлів-конекторів. Також кінцевий економічний результат безпосередньо співвідноситься з ефективною простотою конструкції конекторів [2]. Якщо зварювання на будівельному майданчику не застосовується, то це спрощує монтаж та виключає застосування спеціалізованого обладнання для зварювання і контролю сполучень. Крім того, болтові з'єднання забезпечує можливість демонтажу конструкції з перевезенням на інше місце, що важливо для ангарів, складів тощо, які змінюють локацію.

До недоліків металевих конструкцій відноситься низька корозійностійкість та вогнестійкість. Ці недоліки іноді вимагають застосування спеціальних корозійностійких сталей, більш стійких до корозії високоміцних чавунів (ВЧ) та спеціальних захисних покриттів, що оберігають їх від корозії, навіть при відносно високих (понад 400 °С) температурах.

Значні і не досить відомі для будівельників можливості має застосування литих металевих конструкцій, зокрема виготовлених способом лиття за моделями, що газифікуються, (ЛГМ), оскільки ця технологія дозволяє недорого за вартістю (особливо дрібними серіями для будівництва конкретної споруди) виготовити металеві вироби. Цю технологію використовує і впроваджує Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України (ФТІМС). Разові моделі з пінополістиролу (ППС) для ЛГМ виготовляють як у прес-формах, так і вирізанням на простому верстаті нагрітим ніхромовим дротом, або все частіше на 3D-фрезері. Ряд прикладів каркасних і фасонних металоконструкцій та моделей із ППС показано на рис. 2.

Ливарне виробництво, як один з найдавніших видів металообробки, завдяки використанню ЛГМ-процесу отримує можливість істотного зниження металоємності виробів. Легкість обробки ППС з густиною 22-25 кг/м<sup>3</sup> з удосконаленням та здешевленням 3D фрезерів дозволяє вирізати разові ливарні моделі з плит ППС за програмою комп'ютера і кресленням на екрані монітора, а високопродуктивне обладнання, зокрема, з галузі пакувальної промисловості - отримувати по прес-формах будь-які серії моделей для ЛГМ.

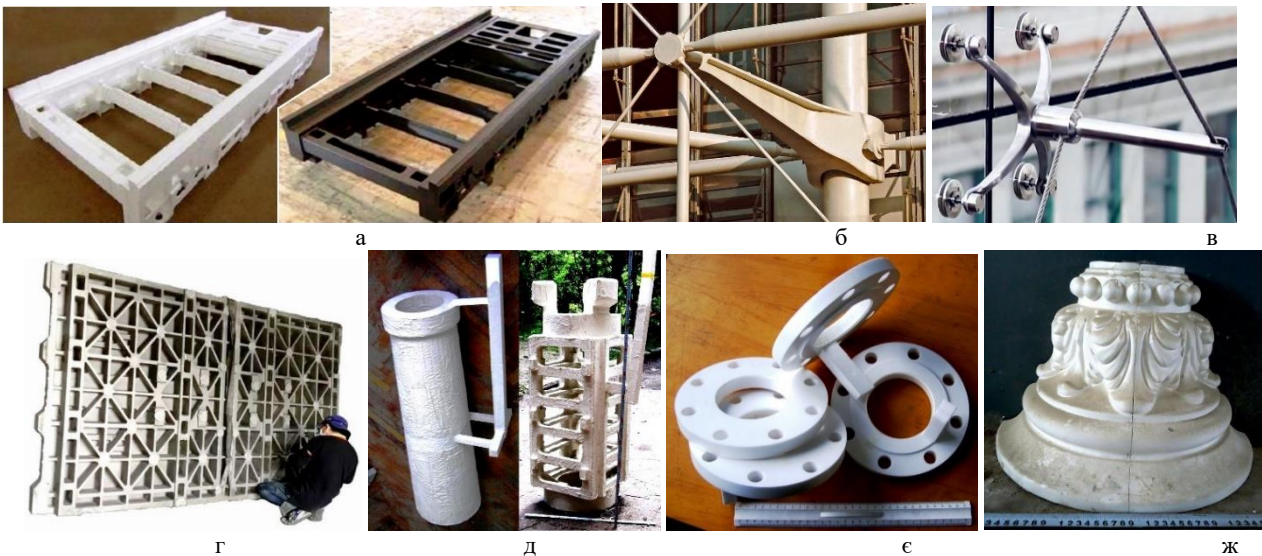


Рисунок 2 – Литі металовироби для будівництва і моделі з ППС: а - модель з ППС і по ній вилівок крупної рами [3]; б - великий кронштейн на колоні [4]; в - кронштейн-спайдер для кріплення скляного заповнення [5]; г – плити компанії Rong Feng (<https://www.rfcccl.com/>, Тайвань); ППС-моделі з ливарного цеху ФТІМС НАНУ: д – труби і каркасного модуля (обидва висотою близько 1,3 м); е – фланців для скріплення трубчастих каркасів; ж – декоративної опори під колону.

Процес ЛГМ у вакуумовані форми з сипкого піску дозволяє виготовляти металеві виливки складної геометрії (без піщаних стрижнів, як при литті металу в традиційні піщані форми), збираючи (склеюючи) каркасні чи ґратчасті моделі з деталей аналогічно до сучасного монтування каркасів металевих будівель. А сухий пісок при виготовленні контейнерної ливарної форми з вібрацією контейнера з моделлю обтікає модель як плинне технологічне середовище, утворюючи таку піщану форму для заливання в неї металу.

Такий процес формування у плинному вогнетривкому середовищі разових моделей з ППС значно спрощує лиття з металу легковагих тонкостінних каркасних деталей, пошук методів оптимізації конструкцій яких призвів до досліджень зі створення конструкцій виливків, подібних до конструкторських рішень, аналоги яких спостерігаються в неживій і живій природі, в тому числі за моделями будови мікроструктур органічних і неорганічних речовин, як їх представляє сучасне природознавство. Головна відмінність запропонованих людиною інженерних конструкцій від створених природою полягає у високій ресурсоефективності останніх завдяки тривалому еволюційному відбору з досягненням досконалості. Вирізняють глобальну еволюцію Всесвіту, геологічну еволюцію й еволюцію живої природи. При цьому конструкціям природи характерні такі властивості, як повторюваність в різних напрямках однакових елементів, комбінаторність (фрактальність) і пористість.

В процесі виконаного циклу досліджень з конструювання литих металовиробів нами було розглянуто не лише аналоги з живої та неживої природи, а й уявні, ідеальні, наприклад, математичні або комп'ютерні моделі, що в загальному випадку не обов'язково мають (чи на сьогодні виявлені) відповідність чому-небудь у фізичному світі [6, 7]. Комп'ютерне моделювання та топологічна оптимізація конструкцій дозволяє відобразити наші уявлення про будову навколишнього світу та запозичувати з нього деякі деталі та композиції для власних рукотворних конструкцій. А розвиток адитивного виробництва в останнє десятиліття зробив практично невід'ємним такі моделювання і оптимізацію при його застосуванні.

Коли ми говоримо про структуру речовини, то маємо на увазі, що основу наших знань в хімії, фізиці, матеріалознавстві і інших областях науки складають, перш за все, знання про структуру речовини, яка багато в чому визначає його властивості. Вчені все частіше відкривають нові матеріали шляхом розрахунку їх структур на комп'ютері. Завдання передбачення будови кристалічних структур, виходячи з хімічного складу, до недавнього часу вважалося нездійсненним. Традиційно відкриття нових матеріалів для потреб техніки відбувалося або методом проб і помилок, або зовсім випадково. Зараз, коли квантова теорія матеріалів досягла значного рівня, зокрема, за методами з робіт по темі «Як навчити комп'ютер відкривати нові матеріали», створено можливості розробки нових матеріалів за допомогою комп'ютера [8].

Стійка кристалічна структура з конкретних заданих атомів характеризується найбільш низькою енергією. Розробка нових матеріалів потребувала досліджень всіх можливих взаємних положень атомів з розрахунками енергії для кожного з цих положень, визначенням найнижчої енергії і оптимальної структури. Проблема в тому, що число варіантів в структурі астрономічно велике. Якщо завдання таке складне, то їх вирішують, не вдаючись до повного перебору, а направляючи розрахунок за допомогою самонавчання до «глобального» мінімуму енергії. У цьому ключі розроблено підхід, заснований на ідеях еволюції, що представляє собою багатовимірну мінімізацію для пошуку будь-яких термодинамічно стійких станів [8], що привело кристалографію в область багатовимірної геометрії. Аналіз схожих даних до того ж привів антропологів і літературознавців. Подібними методами останні визначають авторство текстів, а генетики та антрополози визначають спорідненість між націями на основі ДНК. За аналогічним підходом (з еволюційним алгоритмом) все більше з'являється комп'ютерних програм для проектування конструкцій, в тому числі будівельних.

Таке технологічне використання науки для проектування структур нових матеріалів на основі багатовимірної мінімізації підказало нам підхід до оптимізації конструкцій з метою металозаощадження в ливарному виробництві. На перших кроках нами застосовано метод макровимірного копіювання найбільш поширених і простих атомних решіток у вигляді (за допомогою) пінопластових моделей для виготовлення легковагих просторових металевих конструкцій [9], що поклало початок створенню цілого напрямку технологічних способів ЛГМ для лиття ресурсоефективних металовиробів і розробки методики їх конструювання.

Завдання розробки технології ЛГМ [9] і проектування литих стільникових, об'ємно-пористих, скелетно-гратчастих металовиробів ґрунтувалось на тому, що вони мають потенціал для застосування [10] як полегшені несучі, армувальні, ізолюючі, огорожувальні, демпфуючі навантаження просторові конструкції (найбільш доречні для будівельних металоконструкцій), а також такі, що здатні поглинати, або пропускати крізь свої стільники потоки речовини або енергії. Крім того, вони придатні для очищення газів, рідин, глушників шуму, систем протидії тиску, вибухо-, та перешкод для полум'я, адсорбційних, акустичних, опалювальних, теплообмінних пристроїв, елементів джерел струму, електродів (заземлення), легких конструкцій, в тому числі літальних і космічних апаратів, і як кістяк для композиційних матеріалів.

Одним із аналогів для лиття пористих металоконструкцій послужили проведені в Німеччині досліди з виготовлення сталевих піни литтям по випалюваних моделях в формах зі зв'язувальним компонентом [10]. У звіті інституту Fraunhofer Institute for Manufacturing Technology and Applied Materials Research (IFAM, Dresden) за 2005 р. показано фотографії пінополіуретанової піни з відкритими порами розмірами до 2,5 мм (рис. 3, а). Вона служила випалюваною моделлю для лиття сталевий піни, зразки якої зі сталі 316L і трубчасті теплообмінники зі сталеву піною показано на рис. 3, б, в. Комірчасті матеріали на 50-90 % легші компактних матеріалів; а сталева піна має мінімальну пористість ~ 80 % і високу для даної пористості міцність і жорсткість [10].

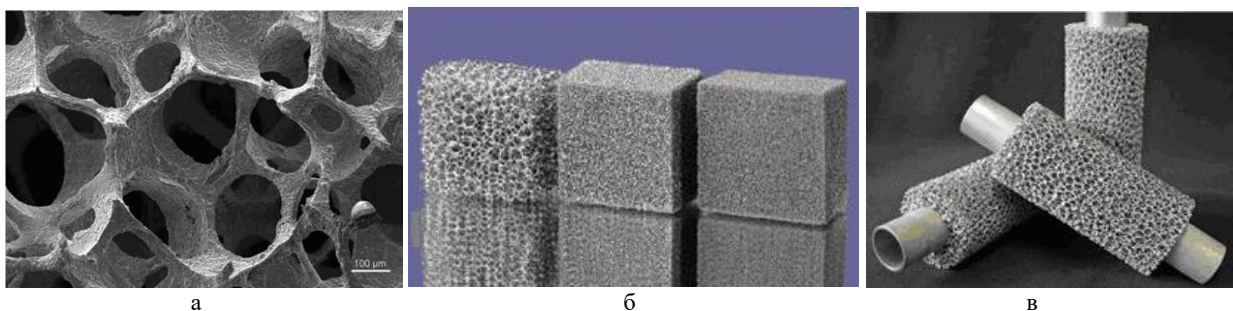


Рисунок 3 – Приклади пористих конструкцій: а - пінополіуретан - піна з наскрізними порами (збільшено), розмір осередку до 2,5 мм; б - зразки литої піни з нержавіючої сталі 316L з осередками 20, 45 і 60 ppm; в - трубчасті теплообмінники зі сталеву піною (сталь 316L, осередок шириною 20 ppm).

Однак, пінополіуретанова піна в якості моделі з розміром пор не вище 2,5 мм цим обмежує показники литого металевий пористого матеріалу, на такій піні важко стабільно отримувати однакові функціональні властивості, оскільки проникність і міцність будь-яких двох однакових зразків, як правило, різні. Тому розробили проекти стільникових виливків з повторюваними стабільними показниками і великих розмірів – ряд нових конструкцій разових моделей для ЛГМ, оскільки описаний [10] процес їх отримання по випалюваних моделях має витратні енергоємні високотемпературні

операції, подібні до лиття по виплавлених моделях.

Плинність сухого піску як піщано-повітряної твердо-газової дисперсії – основи піщаної форми при ЛГМ послужила тою підмогою – недостатньо розкритим потенціалом для відповіді на запитанні «які матеріалоощадні металокопії можуть оптимально заповнити простір і «пролитися» металом в об’ємі піску ливарної форми при ЛГМ?». Виявилось, що саме каркасно-комірчасті ливарні моделі з ППС доступні для проектування з точки зору оптимального заповнення їх конструкцією простору контейнерної форми, враховуючи вищезгадану легку оброблюваність ППС, з якого можна швидко і недорого виготовляти різні, комірчасті збірні легковагі модельні конструкції практично без обмежень по геометрії, але з огляду технологічної здатності заміщення їх розплавленим металом і раціонального живлення цим металом кризь ливникову систему.

При цьому враховували те, що модель з ППС, яка газифікується у ливарній формі, виконує такі технологічні функції: 1) засіб перенесення конфігурації з креслення литої конструкції до її втілення в металі; 2) рухливе джерело газового тиску для зміцнення (пресування цим тиском) вакуумованої форми з сипкого піску; 3) носій протипригарно-герметизуючого покриття, що підвищує чистоту і якість поверхні виливків. Структуру досліджень і розділів методики конструювання легковагих виливків і способів їх моделювання показано на рис. 4.



Рисунок 4 – Структура досліджень і напрямів конструювання легковагих виливків та способів їх моделювання.

### Проектування литих конструкцій за аналогами будови кристалічних структур

Першу конструкцію литого матеріалу запатентовано в вигляді просторової решітки, що нагадує зображення кристалічних решіток в кристалографії (рис. 5) [11]. При цьому ділянки між вузлами осередків ливарної моделі [12] заповнили перемичками (перегородками), а самі вузли стали служити сполученнями або схрещуваннями перемичок. Для кристалічних решіток за канонами кристалографії характерна тривимірна періодичність. За структурою однієї елементарної комірки можна побудувати всю решітку, використовуючи просту геометричну операцію паралельного перенесення.

Модель ділянки двовимірної «сітки» таких решіток з одним рядом вертикальних перемичок зручно виконати в прес-формі з плоским роз’ємом, потім шляхом склеювання в стосі (повторенням в решітці) зібрати просторову решітку конструкцію. Збірка такої моделі гарантує отримання наскрізних однакових пор або порожнин, мінімальні розміри яких обмежені лише можливістю їх заповнення сухим піском в цехах ЛГМ. Розміри пор - отворів литого матеріалу можуть бути до десятків і більше міліметрів.

Модель у вигляді просторової решітки (рис. 5) має однакові елементарні три деталі - перемички 1, 2 і 3. Їх позначили літерами а, в, с. Вони складають елементарну комірку як тривимірне утворення, кути між ними в кристалографії позначаються  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ . Шляхом продовження одного з рядів перемичок виконаний випор 4. На певній відстані від перемичок при засипці піском рекомендовано встановлювати пористий фільтр 5 для вакуумування піщаного середовища між перемичками, ряд потовщених перемичок служить шлакоуловлювачем 6, а інший ряд потовщених перемичок - стояком 7 (ливарна воронка показана пунктиром).

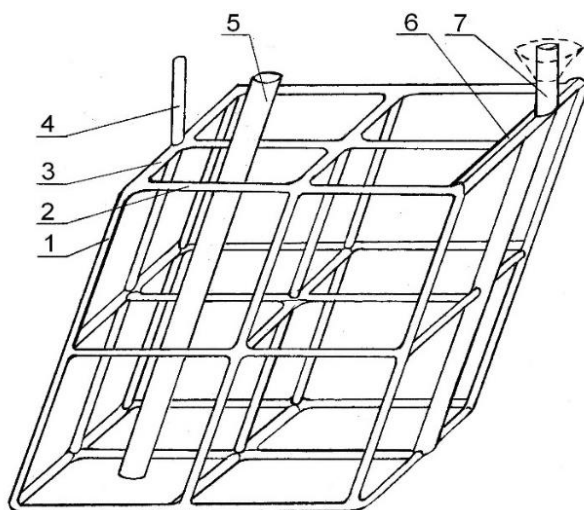


Рисунок 5 – Модель просторової решітки: 1, 2 і 3 – перемички а, в, с (табл. 1), 4 – випір, 5 – пористий фільтр, 6 – шлакоуловлювач, 7 – стояк.

За аналог до решітки (рис. 5) взято зображення структури кристала, як її з 1848 р. почав відображати французький фізик Огюст Браве як просторову сітку (гратку), вузли якої збігаються з центрами частинок в кристалі. Він запропонував 14 ґраток Браве, які лягли в основу кристалографії і відрізняються один від іншого набором елементів симетрії, або сингонії, і типом центрування. У таблиці 1 вказано параметри, які в сукупності з елементами симетрії, визначають елементарну комірку для кожної кристалографічної системи. Ці 14 типів структур є основними, але не вичерпують розмаїття просторових решіток, описаних в кристалографії. У примітивних кубічних ґратах атоми займають позиції по вершинах куба. Елементарна комірка кубічної сингонії описується параметром а ( $a = b = c$ , всі кути між перемичками - по  $90^\circ$ ).

Таблиця 1

**Параметри ґраток Браве**

Система ґратки	Параметри елементарної комірки	Кількість типів
кубічна	$a=b=c, \alpha=\beta=\gamma=90^\circ$	3
тетрагональна	$a=b \neq c, \alpha=\beta=\gamma=90^\circ$	2
ромбічна	$a \neq b \neq c, \alpha=\beta=\gamma=90^\circ$	4
гексагональна	$a=b \neq c, \alpha=\beta=90^\circ, \gamma=120^\circ$	1
тригональна	1) $a=b \neq c, \alpha=\beta=90^\circ, \gamma=120^\circ$ 2) $a=b=c, \alpha=\beta=\gamma \neq 90^\circ$	1
моноклинна	$a \neq b \neq c, \alpha=\gamma=90^\circ, \beta \neq 90^\circ$	2
триклинна	$a \neq b \neq c, \alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	1

Таке виконання ливарної моделі з ППС (рис. 5) гарантує отримання наскрізних пор або порожнин, які заповнюють сухим піском в контейнері при формуванні. Для виготовлення в заданому місці моделі монолітної ділянки або стінки цю ділянку або кілька перемичок обмотують синтетичною плівкою, запобігаючи доступ піску в цю зону моделі, яку заповнюють згодом металом. Кожна з пор такого литого матеріалу має точні стабільні розміри, форму, просторову орієнтацію в матеріалі, періодичність повторення, оскільки модель з ППС виконується за кресленнями і виготовляється найчастіше в металевій прес-формі переважно на напівавтоматах. Розширенню службових властивостей матеріалу сприятиме, наприклад, введення в його пори при складанні моделі вставок з іншого матеріалу, які залишаються в литий конструкції. Порожнини і перемички литого матеріалу можуть виконуватися різних розмірів і форм, з різними їх чергуванням. Характеристики міцності матеріалу матимуть деяку кореляцію з параметрами кристала, кристалічна решітка якого копіюються.

В окремих випадках, щоб уникнути утворення тріщин від напружень, викликаних усадкою металу, перемички можуть виконувати криволінійними, наприклад S-подібними, а стінки неплоскими. Таке «поліпшення» структури природних конструкцій, що копіюються, варіює службові властивості литих матеріалів. Для складання кількох каркасних металовиробів (як модулів) в одну конструкцію на крайніх кінцях перемичок цих деталей виливають засоби монтажу або передбачають можливість зварювання. А ливарну модель фасонного виробу з комірчастих матеріалів можна формувати при її

складанні з елементів, чи вирізати з комірчастого пінопластового блоку [9, 13].

Оптимізація просторових каркасних литих конструкцій, що копіюють природні, та розміщення їх разових моделей в об'ємі піску, як один з резервів нових можливостей «об'ємної» формовки при ЛГМ, для традиційних ливарних видів формування з плоским роз'ємом в парних опоках вважались би неприйнятними, а для лиття такі конструкції - нетехнологічними.

Просторові гратчасті конструкції мають «магнетичну здатність» привертати увагу багатьох конструкторів та архітекторів. Можливо, для того й зображали (рис. 6) ще Леонардо да Вінчі (а), а також голландський художник-графік Мауріц Ешер (б) свої «казкові» просторові решітки, щоб ми могли розробити технологію їх виготовлення, в тому числі для модульних будівельних конструкцій, прикладом чого може служити проєкт Daekwon Park (в) по темі екологічних будівель, представлений на конкурсі хмарочосів eVolo 2008 р. (з сайту <https://www.trendhunter.com/>).

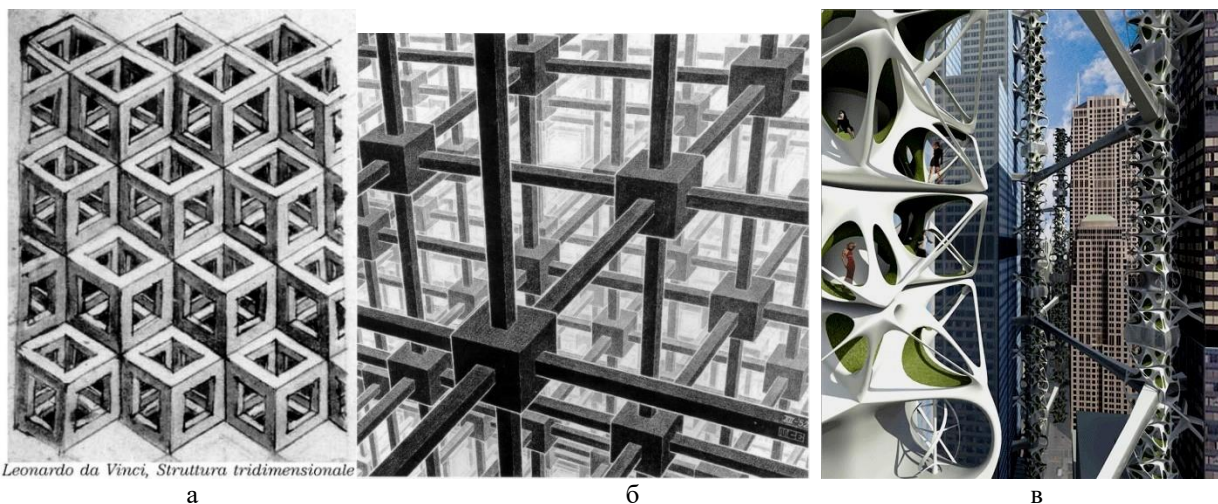


Рисунок 6 – Зображення комірчастих структур: а — Леонардо да Вінчі; б – Мауріца Ешера; в – за проєктом Daekwon Park.

## Висновки

Комірчасті просторові металеві матеріали, отримані методом ЛГМ, розширяють існуючий спектр властивостей порівняно з компактними матеріалами і металоконструкціями та є особливо перспективними для будівництва. А литі гратчасті матеріали, зокрема, аналоги яких взяті з макро- та мікросвіту природи, зі збірних модельних елементів спростять конструювання та дозволять налагодити випуск комірчастих матеріалів та каркасних легкових виробів, які нерідко називають «матеріалами майбутнього». Також і ЛГМ за його потенціалом можна віднести до технологій майбутнього, особливо корисних для нечисленних країн із замкнутим металургійним циклом, як Україна, які отримують метал із власних руд і здатні перевести його у високотехнологічний наукомісткий товар у вигляді машин, механізмів та будівельних металевих конструкцій. Розвиток подібних технологій відкриває шляхи запозичення відомих нам конструкційних закономірностей природних матеріалів не лише для їх копіювання, а й для отримання нових матеріалів та конструкцій з оптимізованими властивостями під конкретні механізми чи будівлі. При цьому будівництво із застосуванням металоконструкцій має всі передумови стати імпульсом та ефективним рішенням в будівельній галузі, що сприятиме відбудові країни.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Current end-of-life scenarios for three common construction materials. The free encyclopedia for UK steel construction information. URL: [https://www.steelconstruction.info/Life\\_cycle\\_assessment\\_and\\_embodied\\_carbon](https://www.steelconstruction.info/Life_cycle_assessment_and_embodied_carbon).
2. Дорошенко В.С., Янченко О.Б. Передумови виробництва вузлів-конекторів будівельних металоконструкцій ливарним способом за разовими моделями. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2022. Том 32. № 1. С. 14-20.
3. M.G. Landage, S. Kumbhar. Lost Foam Casting technology – Review Paper. *International Journal of Innovations in Engineering Research and Technology*, 2019. P. 1-6.
4. Centre Pompidou Construction. <http://hotcore.info/kareff-07079.html>.
5. Проектирование металлических конструкций. Ч. 1. / С.М. Тихонов, В.Н. Алехин, З.В. Беляева и др. М.: Издательство «Перо», 2020. 468 с.
6. Шинський О.И., Дорошенко В.С. Получение газифицируемых моделей на станке с ЧПУ по виртуальным электронным прототипам. *Перспективные технологии, материалы и оборуд-е в литейном пр-ве: мат-лы II междунар. конф.*, 7-11.09.2009. Краматорск: ДГМА, 2009. С. 222-223.

7. Дорошенко В.С. Давайте лить металл, копируя структуры Вселенной! *Винахідник і раціоналізатор*. 2008. №8. - С. 12 - 17.
8. Oganov A. R., Lyakhov A. O., Valle M. How evolutionary crystal structure prediction works - and why. *Acc. Chem. Res.* 2011, 44. P. 227-237.
9. Дорошенко В. С. Способы получения каркасных и ячеистых литых материалов и деталей по газифицируемым моделям. *Литейное производство*. 2008. №9. С. 28-32.
10. Моуала Х., Айгенфельд К., Гирлих Д. Стальная пена с открытыми порами – изготовление и свойства. *Металлургия машиностроения*. 2006. №6. С. 29-33.
11. Патент № 96915 Україна, МПК В22С 7/02, В22С 9/04. Литий матеріал стільникової структури з кризними порами / О.И. Шинський, В.С. Дорошенко. Опубл. 26.12.2011, Бюл. № 24.
12. Патент № 70286 Україна, МПК В22С 7/02. Ливарна одноразова модель / О. И. Шинський, В. С. Дорошенко. Опубл. 11.06.2012, Бюл. №11.
13. Дорошенко В.С. Воспроизведение структур природы как метод получения ресурсосберегающих металлоконструкций. *Вісник Донбаської держ. машинобудівної академії*. 2014. №1 (32). С. 43-49.

## REFERENCES

1. Current end-of-life scenarios for three common construction materials. The free encyclopedia for UK steel construction information. URL: [https://www.steelconstruction.info/Life\\_cycle\\_assessment\\_and\\_embodied\\_carbon](https://www.steelconstruction.info/Life_cycle_assessment_and_embodied_carbon).
2. Doroshenko V.S., Yanchenko O.B. Prerequisites for production of connectors-nodes of building metal structures by casting method according to one-off models. *Suchasni tehnologiyi, materialy i konstrukciyi v budivnictvi*. 2022. Tom 32. № 1. S. 14-20.
3. M.G. Landage, S. Kumbhar. Lost Foam Casting technology – Review Paper. *International Journal of Innovations in Engineering Research and Technology*, 2019, pp. 1-6.
4. Centre Pompidou Construction. <http://hotcore.info/kareff-07079.html>
5. Design of metal structures. Ch. 1. / S.M. Tihonov, V.N. Alehin, Z.V. Belyaeva i dr. M.: Izdatelstvo «Pero», 2020. - 468 с.
6. Shinskij O.I., Doroshenko V.S. Obtaining gasified models on a CNC machine using virtual electronic prototypes. *Perspektivnyye tehnologii, materialy i oborud-e v litejnom pr-ve: mat-ly II mezhdunar. konf., 7-11.09.2009*. - Kramatorsk: DGMA, 2009. S. 222-223.
7. Doroshenko V.S. Let's pour metal, copying the structures of the Universe! *Vinahidnik i racionalizator*. 2008. №8. S. 12-17.
8. Oganov A.R., Lyakhov A.O., Valle M. How evolutionary crystal structure prediction works - and why. *Acc. Chem. Res.* 2011, 44, P. 227-237.
9. Doroshenko V.S. Methods for obtaining frame and cellular cast materials and parts according to gasified models. *Litejnoe proizvodstvo*. 2008. №9. S. 28-32.
10. Mouala H., Aigenfeld K., Girlich D. Steel foam with open pores - production and properties. *Metallurgiya mashinostroeniya*. 2006. №6. S. 29-33.
11. Pat. 96915 UA, IPC B22C 7/02, B22C 9/04. Cast material of cellular structure with through pores / O.Y. Shinskij, V.S. Doroshenko. Publ. 26.12.2011. Bul. No. 24.
12. Pat. 70286 UA, IPC B22C 7/02. Foundry disposable model / O.Y. Shinskij, V.S. Doroshenko. Publ. 11.06.2012. . Bul. No. 11.
13. Doroshenko V.S. Reproducing the structures of nature as a method of obtaining resource-saving metal structures. *Visnik Donbaskoyi derzh. mashinobudivnoyi akademiyi*. 2014. №1 (32). С. 43-49.

**Шинський Олег Йосипович** – д-р техн. наук, професор, зав. відділу фізико-хімії ливарних процесів, Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України (м. Київ), e-mail: [aluprt@ukr.net](mailto:aluprt@ukr.net), orcid.org/0000-0001-6200-0709.

**Дорошенко Володимир Степанович** – д-р техн. наук, провідний науковий співробітник відділу фізико-хімії ливарних процесів, Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України (м. Київ), e-mail: [doro55v@gmail.com](mailto:doro55v@gmail.com), orcid.org/0000-0002-0070-5663.

**Янченко Олександр Борисович** – кандидат техн. наук / Ph.D., доцент, кафедри галузевого машинобудування, Вінницький національний технічний університет, e-mail: [1961yab@gmail.com](mailto:1961yab@gmail.com), orcid.org/0000-0002-3888-3772

**O. Shinsky<sup>1</sup>**  
**V. Doroshenko<sup>1</sup>**  
**O. Yanchenko<sup>2</sup>**

## PROSPECTS FOR THE PRODUCTION OF CAST LIGHTWEIGHT METAL STRUCTURES FOR THE CONSTRUCTION OF MODULAR BUILDINGS

<sup>1</sup>Physical and Technical Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv  
<sup>2</sup>Vinnitsia National Technical University

*A review of prefab modular building metal structures with a list of their advantages and an assessment of reuse compared to building structures made of concrete and wood is carried out. An analysis of the cost structure of such metal structures and their*



installation is given. It is noted that the most effective means of reducing the cost of metal structures is to reduce metal consumption. Unlike welded for bolted structures, installation is simplified and bolted connections provide the possibility of disassembling the structure with transportation to another place, which is important for hangars, warehouses that change location. The use of cast metal structures, in particular, made by gasification model casting (LGM) in vacuum molds made of loose sand, has significant opportunities. The motivation, methods and examples of optimization of constructions, as well as imitation of constructions of nature, in particular crystalline materials, for man-made metal products are considered. Cellular spatial materials obtained by the LGM method expand the existing range of properties compared to compact materials. And cast lattice materials, in particular, the analogues of which are taken from the macro- and microworld of nature, from prefabricated model elements, will simplify construction and allow the production of cellular materials and frame lightweight products, which are often called "materials of the future." Ukraine obtains metal from its own ores and is able to transform it into a high-tech, knowledge-intensive product in the form of machines, mechanisms and metal construction structures. The development of such technologies opens up ways to borrow the structural properties of natural materials known to us not only to copy them, but also to obtain new materials and structures with optimization for specific mechanisms or buildings. At the same time, construction with the use of metal structures has all the prerequisites to become an effective solution in the construction industry, which will contribute to the reconstruction of the country.

**Key words:** modular structures, building metal structures, modeling, structures of nature, castings, saving metal, casting according to gasifying models.

**Shinsky Oleg** – Dr. Sci. (Engin.), Professor, Head of the Department of Physics and Chemistry of Foundry Processes, Physical and Technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv), e-mail: [aluprt@ukr.net](mailto:aluprt@ukr.net), [orcid.org/0000-0001-6200-0709](https://orcid.org/0000-0001-6200-0709).

**Doroshenko Volodymyr** – Dr. Sci. (Engin.), Leading Researcher, Department of Physical Chemistry of Foundry Processes, Physical and Technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv), e-mail: [doro55v@gmail.com](mailto:doro55v@gmail.com), [orcid.org/0000-0002-0070-5663](https://orcid.org/0000-0002-0070-5663).

**Yanchenko Olexander** – PhD (Engin.), Associate Professor, Department of Industrial Engineering, Vinnytsia National Technical University, e-mail: [1961yab@gmail.com](mailto:1961yab@gmail.com), [orcid.org/0000-0002-3888-3772](https://orcid.org/0000-0002-3888-3772).