

# СУЧАСНІ ЛИТІ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЇ НА ОСНОВІ ПРИРОДНИХ АНАЛОГІВ

*Всяке мистецтво є наслідування природи.*

*Сенека*

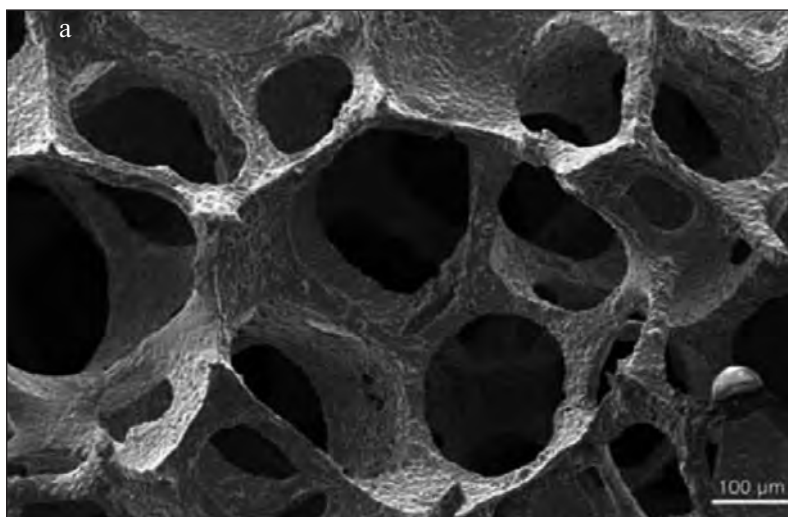


**Володимир Дорошенко**  
канд. техн. наук,  
ст. наук. співроб.  
Фізико-технологічного  
інституту металів та сплавів  
НАН України,  
м. Київ

## Моделювання ливарних виробів за допомогою пінопластової моделі

Сучасне ливарне виробництво орієнтується на суттєве зниження металомісткості продукції. З огляду на цю тенденцію спостерігається динамічне розповсюдження у світовій практиці способу лиття за газифікувальними моделями (ЛГМ-процес), коли пінопластова модель у формі з сухого піску заміщується розплавленим металом і утворює високоточний виливок. Виняткова легкість обробки пінопластів, особливо завдяки вдосконаленню і здешевленню 3-D фрезерів (від настільних до з габаритами вище 6 м), дає можливість такому фрезеру з числовим програмним управлінням (ЧПУ) вирізати з плит пінопласту практично будь-яку конструкцію моделі для ЛГМ, яка зображена на екрані монітора комп'ютера. Окрім того, для пакувальної промисловості створено велике різноманіття високопродуктивних пластавтоматів для отримання різних тонкостінних пінопластових виробів [1].

У напрямку ЛГМ ливарники постійно розширюють свої можливості, прикладом чого можуть бути проведені в Німеччині роботи з виготовлення сталеві пінні способом лиття за піномоделями в піщаних формах. У звіті за 2005 р. інституту IFAM (Дрезден) показано, що на пінополіуретановій пінні з відкритими порами розміром до 2,5 мм, яка слугувала випалюваною моделлю (рис. 1,а) отримали виливанням трубчасті теплообмінники зі сталюю пінною (нержавіюча сталь 316L) із комірками розміром 20 ррі (рис. 1,б) і сталеву пінну (рис. 1,в) [2].





**Рис. 1. Приклади розробок німецьких учених [2]:**  
**а** — пінополіуретанова піна з наскрізними порами (збільшено, розмір комірки до 2,5 мм) (рисунок розміщений на попередній стор. 57);  
**б** — трубчасті теплообмінники зі сталеву піною (сталь 316L, комірка шириною 20 мкм);  
**в** — зразки литої піни з нержавіючої сталі 316L (розмір комірки 20, 45 і 60 мкм)

### Пористі матеріали: переваги перед компактними

Пористі матеріали розширюють існуючий спектр властивостей, оскільки вони на ~ 50—90 % легші від компактних матеріалів, а сталева піна має мінімальну пористість — ~ 80 % і високу для даного рівня пористості конструкційну міцність і жорсткість. Такі матеріали мають потенціал для застосування у вигляді несучих, армуючих, ізолювальних, огорожувальних, демпферних конструкцій. Вони можуть застосовуватися як арматура і каркаси для надлегких конструкцій у будівництві, для композиційних матеріалів, у тому числі для авіакосмічних апаратів, для очистки газів, рідин, глушників шуму, вибухових і пожежних завод, адсорбційних, акустичних, опалювальних, теплообмінних пристроїв, елементів джерел струму, каталізаторів, електродів заземлення та ін. Проте промислове використання поліуретанової піни [1] для виготовлення моделі з розміром пор не більше 2,5 мм обмежує розміри металевої піни як пористого матеріалу. Окрім того, на ній важко стабільно отримувати однакові функціональні властивості (проникність двох однакових зразків різниться).

Якщо пінопласт дозволяє виготовити практично будь-яку модель, то виливок якої конфігурації за такою моделлю можна отримати? Залишилося відповісти на запитання, яке “ставить” нам сам пінопласт, що “вискочив” ніби джин із пляшки і “пропонує” нам свої незвичайні можливості: “Які ви бажаєте мати пінопластові моделі для заміщення у формі з сухою піною розплавленим металом для отримання металовиробів?”. Спеціалісти наукової школи під керівництвом проф. **О.І. Шинського** в Фізико-технологічному інституті металів і сплавів (ФТІМС) НАН України, які протягом останніх десятиріч удосконалюють спосіб ЛГМ, вирішили відповісти на це запитання [1, 3].

### Розробка конструкцій виливок за аналогами будови кристалічних структур

У результаті аналізу багаторічного технологічного і виробничого досвіду використання ЛГМ була поставлена задача дослідження нових можливостей процесу лиття й оптимізації конструкцій виливків із огляду на ресурсозбереження при його зростаючій ролі в конкурентній економіці. Ціль таких розробок — спроба розширити сферу застосування ливарних технологій у перспективних напрямках з позицій сучасного розвитку комп’ютеризації виробництва і досягнень природничих і технічних наук. З цією метою наукову проблему сформулювали у вигляді такого запитання: “Які твердотільні конструкції можуть оптимально заповнити простір, розміститися і “пролитися” в об’ємі піску ливарної форми при ЛГМ?”. На що першими відповідями стали відомості про конструкції, які спостерігаються у живій і неживій природі, а також моделі будови структур органічних і неорганічних речовин, як їх представляє сучасне природознавство.

Головна відмінність запропонованих людиною інженерних конструкцій від створених природою полягає у високій енергоефективності останніх, а також у багатьох випадках у наявності таких характерних властивостей, як повторюваність у різних напрямках однакових елементів, комбінаторика (фрактальність) і комірчастість. До речі, застосування в технічних пристроях принципів організації, властивостей, функцій і структур живої природи вивчається наукою біонікою.

Проте в основу конструювання, тобто створення прототипу, прообразу передбачуваного чи можливого об’єкта, можуть покладатися не лише образи природи, але й уявні, ідеальні (наприклад, математичні) моделі, які загалом не обов’язково сьогодні наявні в

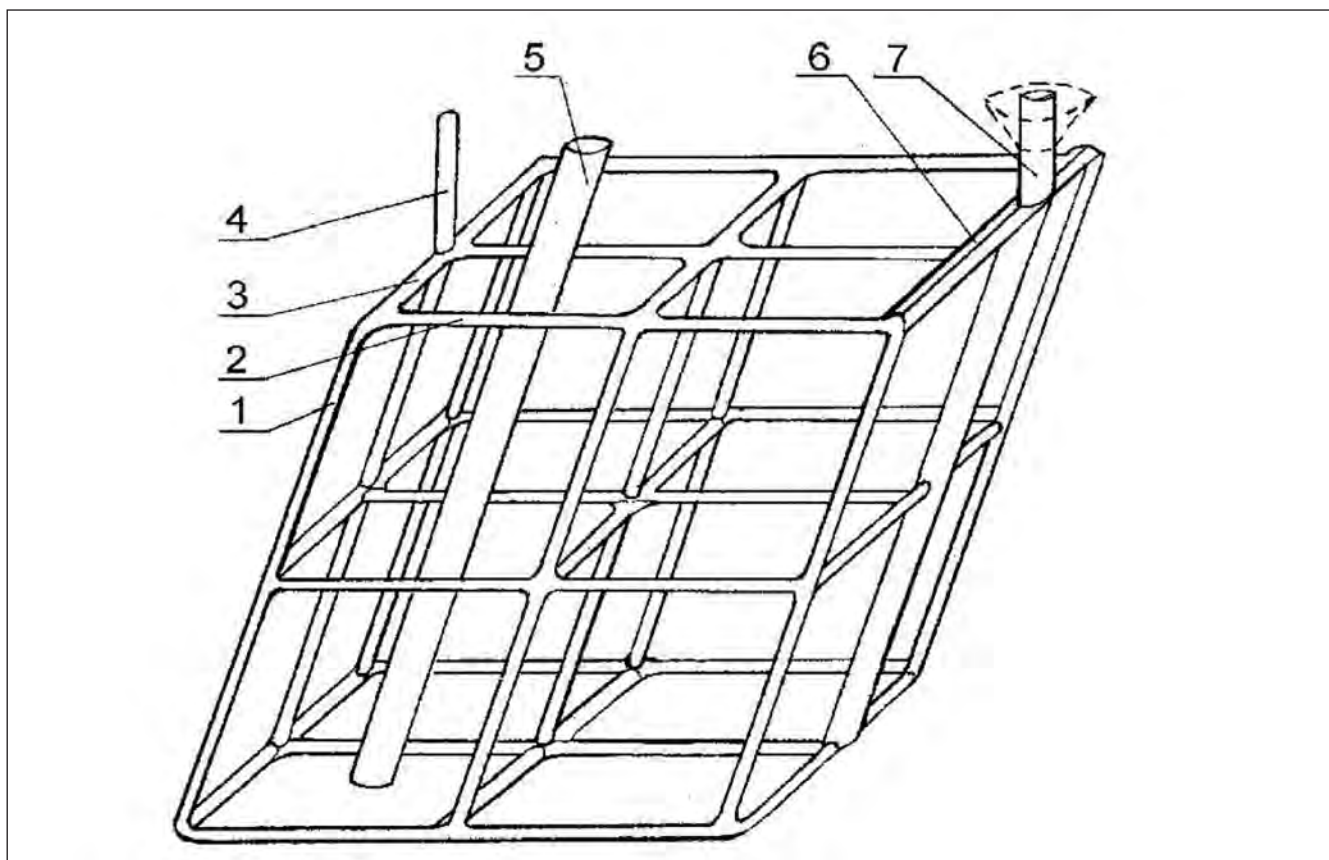


Рис. 2. Модель просторової ґратки: 1, 2 і 3 — перемички (*a, b, c*); 4 — випор, 5 — пористий трубопровід, 6 — шлакоуловлювач, 7 — стояк

фізичному світі. Моделі можуть доповнюватися крипильними чи технологічними деталями або бути “покрашені” з урахуванням технологічності для конкретних видів виробництва.

Дивлячись на структури органічної й неорганічної природи, бачимо їхню переважно комірчасту будову. А чи можна скопіювати в пінопласті таку будову, наприклад конструкцію у вигляді структури просторових ґрат, за аналогією із зображенням кристалічних ґраток з підручника кристалографії? Пінопласт чудово показав свою придатність для виготовлення моделі з розміром комірок до півметра. У моделі ділянки між вузлами комірок заповнили перемичками (пергородками), а самі вузли стали служити з’єднаннями чи схрещуваннями перемичок.

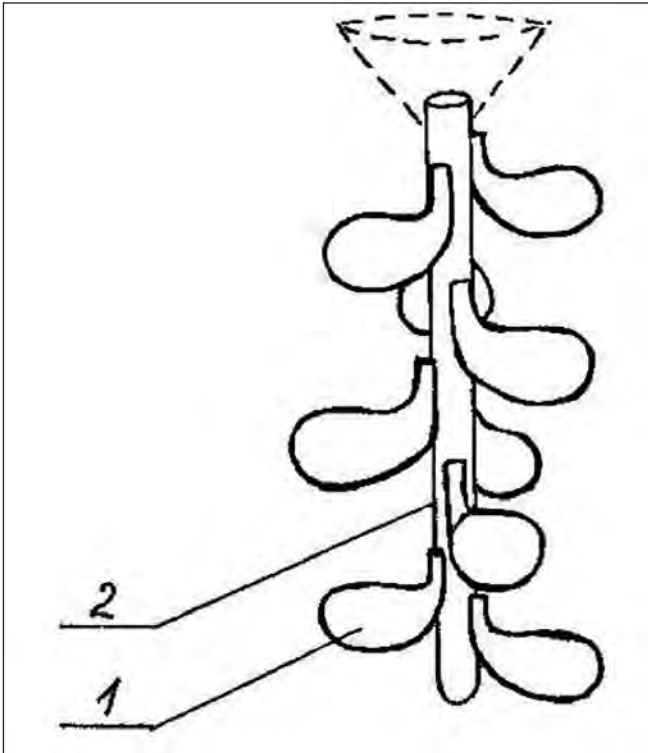
Для кристалічних ґраток за канонами кристалографії характерна тривимірна періодичність. Визначивши структуру однієї елементарної комірки, можна побудувати всю ґратку. Модель ділянки двовимірної “сітки” таких ґраток з одним рядом вертикальних перемичок зручно робити в прес-формі на пластавтоматі. При цьому отримують елементи однієї конструкції, з яких шляхом склеювання у стосик набирають просторову комірчасту конструкцію. Розміри комірок чи отворів отриманого литого матеріалу можуть бути до десятків або більше міліметрів.

Для моделей литого комірчастого матеріалу, складеного з плоских решіток, застосовують усі вимоги ливарної технології, що дозволяє легко виконати лиття.

Приклад такої моделі (рис. 2) показаний у вигляді просторової решітки, де є однакові три елементарні деталі — перемички 1, 2 і 3, які за канонами кристалографії позначаються буквами *a, b, c*. Вони утворюють елементарну комірку як тривимірне утворення, кути між ними позначаються  $\alpha, \beta, \gamma$ . Шляхом продовження одного з рядів перемичок виконано випор 4. При подальшому засипанні піском у ливарній формі може розміщуватися пористий трубопровід 5 для виведення газів, ряд потовщених перемичок може слугити шлакоуловлювачем 6 у ливниковій системі, а другий ряд потовщених перемичок — стояком 7 (місце розташування ливарної лійки показано пунктиром).

### З мікросвіту до макросвіту

Зображувати внутрішню структуру кристалу у вигляді просторової сітки, вузли якої співпадають з центрами частинок у кристалі (тобто ґрати), почав 1848 року *О. Браве*. Він запропонував 14 ґраток (які пізніше назвали “ґратки Браве”), які стали основою кристалографії і відрізняються одна від одної набором елементів симетрії, або сингонією, і типом центрування. Ці 14 типів структур не відображають усе різноманіття просторових ґраток у кристалографії, проте принцип копіювання таких ґраток став основою нової технології комірчастого лиття, яке у даному випадку відтворює структуру кристалів.

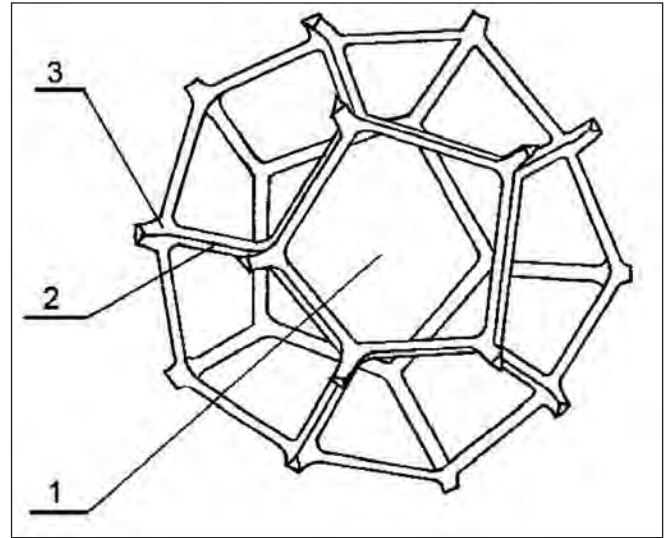


**Рис. 3. Модель, побудована за принципом філотаксису:**  
1 — елемент (модель деталі), 2 — стояк (колектор ливника)

При виготовленні моделі ґраток, схожої на зображення рис. 2, повторювані елементи з пінополістиролу отримують шляхом спікання у прес-формі або вирізання з блока. Створена таким чином модель гарантує отримання наскрізних пор чи порожнин, які заповнюються сухим піском при формовці. Для виготовлення монолітної ділянки чи стінки в заданому місці пористої моделі цю ділянку або декілька перемичок обмотують синтетичною плівкою, запобігаючи попаданню піску до цієї зони моделі, яка у подальшому заповнюється металом.

Кожна поря литого матеріалу, отриманого за такими моделями, має точні стабільні розміри, форму, просторову орієнтацію в матеріалі, періодичність повторення, товщину стінок і перемичок (на відміну від поліуретанової піни), оскільки модель створюється за кресленнями і виготовляється найчастіше в точній металевій прес-формі здебільшого на пластавтоматах. Розширенню службових властивостей матеріалу сприятиме, наприклад, введення до його пор при збиранні моделі вставок з іншого матеріалу, які залишаються у литій конструкції. Порожнини і перемички литого матеріалу можуть створюватися різних розмірів і форм, із різною їх черговістю. Характеристики міцності матеріалу матимуть певну кореляцію з параметрами кристалу, кристалічна ґратка якого копіюється, а метал литих тонких (3–8 мм) перемичок, як правило, в 1,2–1,4 рази міцніший, ніж товстостінних (15–40 мм), через утворення у тонких тілах переважно дрібнозернистої структури.

У окремих випадках для запобігання утворення тріщин від напружень, викликаних усадкою металу,



**Рис. 4. Модель у вигляді пентагонального додекаедра:**  
1 — відкриті наскрізні порожнини; 2 — ребро;  
3 — точка з'єднання чотирьох ребер

деякі чи всі перемички литого матеріалу можуть виготовлятися криволінійними (наприклад, S-подібними), а стінки — не плоскими. Таке “покращення структури” копіюваних природних конструкцій при створенні наших матеріалів посилює службові властивості останніх, коли важливо досягти великої питомої площі поверхні при застосуванні для електродів, теплообмінників, каталізаторів і т.п. Для збирання декількох литих каркасних деталей в одну конструкцію на вільних кінцях перемичок цих деталей можуть виготовлятися литтям засоби монтажу або передбачена можливість зварювання, у тому числі з виробами з прокату. А ливарну модель фасонного виробу з комірчастих матеріалів можна формувати при її збиранні з елементів або вирізати із пінопластового блока, наприклад нагрітим ніхромовим дротом.

Оптимізація просторових литих конструкцій і розміщення одноразових моделей в об'ємі піску — один з резервів нових можливостей, які властиві “об'ємній” формовці при ЛГМ, на відміну від формовки з площиною рознімання в парних опоках, яка притаманна традиційним видам лиття, і для якої розглянуті в цій статті конструкції виливків неприйнятні як нетехнологічні. Цю перевагу ЛГМ перш за все використовують для дрібних виливків при збиранні одноразових моделей з елементів у стоси чи “куші” з одночасним формуванням колектора ливника як несучої конструкції, чим у 1,5–2 рази збільшують металоміцність форми.

### **Конструкція виливки за принципом ботанічного явища філотаксису**

З метою покращення якості і службових можливостей просторових виливків, а також виливків, які виливаються у вигляді блоків або “кущів”, запропоновано збирати модельні конструкції за принципом ботанічного явища *філотаксису* (буквально — розташування листя) [3].

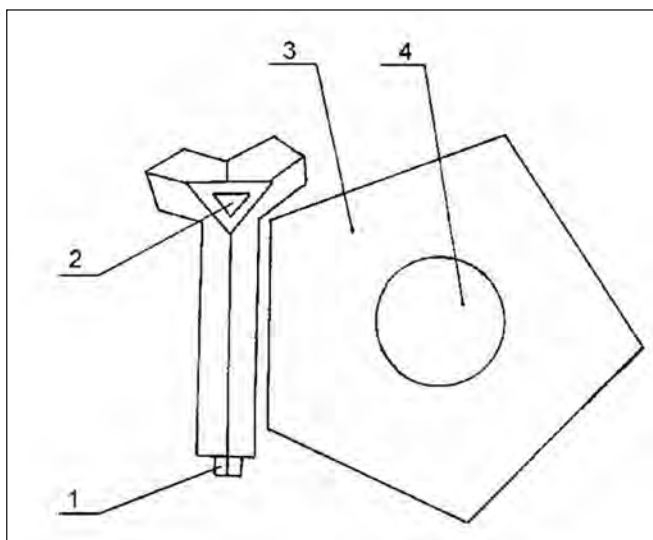


Рис. 5. Повторюваний елемент моделі для збирання каркаса ребер: 1 — шип; 2 — паз; 3 — пластина; 4 — отвір

Це явище вивчає розділ морфології рослин. Згідно з даною ознакою листя розміщується на стеблі в строго визначеній послідовності. Найбільш розповсюджений спіральний філотаксис із одним листком на вузлі, коли однаковий кут між сусідніми листками, близький до значення  $137,5^\circ$ , створює структуру, при якій жоден із листків не затіняє інших. При цьому природні, створені з повторюваних елементів симетричні структури, в яких чітко простежуються числові закономірності [4], підтверджують слова *В.І. Вернадського* про неевклідову геометрію живої природи [5].

На рис. 3 показано приклад моделі у вигляді окремих елементів 1 (або моделей окремих деталей), закріплених на стояку 2 (колекторі ливника). Стояк 2 і елементи 1 виготовляють з пінопласту. Модель на рис. 3 може представляти конструкцію, яку в литому вигляді використовують цілою (наприклад, як армуючу) чи бути блоком з окремих закріплених на стояку деталей, які після виливання з металу відокремлюють від стояка. Лійка стояка показана пунктиром.



Рис. 6. Обкладинка журналу “Nature”, (October 9, 2003, vol. 425)

Подібно до утворення у просторі листяної мозаїки, призначеної для уловлювання рослиною якомога більше світла, найбільш раціональне розташування модельних елементів 1 (рис. 3), як у цілісній просторовій конструкції, так і деталей на колекторі, дозволить рівномірно розташувати елементи моделі у вакуумованому піску форми. Рівномірність вакуумування покращить якість виливків при покращенні режиму евакуації з форми продуктів газифікації моделей, оптимізує газовий тиск як у піску, так і над дзеркалом металу під час заповнення ним форми, зменшить ймовірність утворення дефектів при накопиченні на отриманому виливку продуктів, які містять вуглець. Охолодження рівномірно розміщених в об'ємі піску виливків чи їх частин також сприяє підвищенню стабільності їх властивостей.

### Розробка конструкцій виливків за принципом будови піни

Повертаючись до теми лиття стільникових металевих просторових структур у вигляді великокомірчастої піни, включно з виготовленням схожих на піну матеріалів з регульованою структурою і властивостями, розглянемо розроблену в ФТІМС конструкцію моделі для них з повторюваних елементів. У цій конструкції використані геометричні правила, описані бельгійським ученим *Ж. Плато*, які визначають структуру піни як спонтанно утворювану природну структуру [6].

На рис. 4 показано приклад ділянки ливарної одноразової (пінополістиролової) моделі, подібної до типової комірки монодисперсної піни, у вигляді багатогранника пентагонального додекаедра з відкритими наскрізними порожнинами 1, розташованими в каркасі з ребер 2 цих комірок. Ця комірка моделі аналогічна дрібнокомірчастій моделі з пінополіуретану (рис. 1, а). Ребра тут — взаємозв'язана система, в якій у одній точці 3 сходяться по чотири ребра. Якщо в кожному ребрі багатогранника-комірки піни сходяться три плівки, кути між якими рівні і дорівнюють  $120^\circ$ , то при побудові моделі в базовому варіанті на гранях багатогранника плівку не створюють, залишивши лише ребра і створивши з них каркас.

Згідно з задачею Плато ребра є взаємозв'язаною системою і пронизують увесь каркас піни, а при збиранні чотирьох ребер в одній точці утворюють по всій піні однакові кути  $109^\circ 28'$ . Площа поперечного перерізу трикутного ребра (каналу Плато) визначається як  $S = r^2 (3^{1/2} - \pi/2)$ , де  $r$  — середній радіус бульбашки газу (в наших розрахунках — кулі, вписаної у багатогранник-комірку моделі).

На рис. 5 показано приклад повторюваного елемента для збирання каркаса з трикутних ребер з використанням з'єднання “шип—паз”, шип 1 і паз 2. Цей елемент, як й інші частини моделі, може вироблятися з пінополістиролу, різних пористих пінопластів, льоду, парафіну та інших матеріалів для разових ливарних моделей, які у подальшому видаляються. Для засипання формувального піску щонайменше



Рис. 7. Модель деталі колосника печі

один отвір п'ятикутного перерізу в кожній або в деяких з комірок роблять відкритим, а решту чи один отвір при збиранні моделі можуть закривати пластинами 3 або плівками, розташованими між кутковими ребрами трикутних у перерізі ребер.

На рис. 5 поряд з елементом-ребром показана плоска пластина 3, яка кріпиться до ребер і закриває п'ятикутний отвір (грань комірки) або зроблена для використання як шаблону, навколо якого ребра ступаються у п'ятикутник. У торці пластина 3 може мати по периметру клиноподібну борозну, за якою зручно орієнтувати ребра або кріпити її до ребер, а також може мати отвір 4 круглої чи іншої форми і у визначеній кількості. Аналогічно до пластили може використовуватися плівка для затикання п'ятигранного отвору.

Таким вибіркоким закриванням граней при збиранні моделі можна регулювати проникність конструкції. Якщо необхідно продувати, наприклад, повітрям комірчасту конструкцію в одному прямолинійному напрямі (а в інших напрямках прохід небажаний), то по дві (протилежні) грані в кожній комірці, які мають у цьому напрямі найбільший прохідний переріз, повинні бути відкритими, а решта закритими. Повним або частковим закриттям окремих граней можна створювати різну траєкторію руху речовини у порах комірчастого матеріалу. При цьому закриватися грані комірок можуть пластинками з металу, частково вставленими в тіла ребер моделі. Після заливки і заміщення металом моделі або порожнини від моделі метал ребер охоплює метал пластинок або сплавляється з ним.

На завершення теми про піноподібні конструкції зазначимо, що на рубежі XX—XXI сторіч зроблено важливе відкриття в області експериментальної астрофізики. Результати спостережень, які впродовж багатьох місяців забарно збиралися космічним супутником WMAP, свідчать на користь того, що Всесвіт



Рис. 8. Решітки зливостоків, які виливають в стосах

може мати форму додекаедричного простору Пуанкаре [7]. Або по-іншому. Всесвіт може бути набором безкінечно повторюваних додекаедрів, як показано на рис. 6 з ілюстрації до статті в журналі “Nature” [8], винесеній на титульну сторінку номера цього журналу. Якщо дані свідчать, що галактики мають піноподібну структуру, то і конструкторам належить “взяти на озброєння” схожі конструкції, які зручно отримувати з металів у процесі лиття.

### Приклади пористих, комірчастих виливків і зображень таких конструкцій

Запропоновані нові модельні конструкції з елементів допустимих розмірів від декількох до сотень міліметрів і більше з можливістю отримувати їхні деталі на пластавтоматах спростять конструювання комірчастих матеріалів, які зазвичай називають матеріалами майбутнього і в описаному випадку схожі на пінні конструкції, в тому числі на тверду піну з регульованою структурою. На фотографії (рис. 7) як приклад застосування пористих виливків показана модель кільцеподібної деталі діаметром близько 600 мм, яка має наскрізні отвори конусної форми по всьому своєму тілу, таким чином представляючи собою відносно простий варіант пористої конструкції. Діаметри однакових конусних отворів мають розміри: максимальний — 5 мм, мінімальний — 2 мм. Ця деталь слугує колосником промислової печі для спалювання сухої соломи і очерету як альтернативних джерел енергії. Виливання таких деталей іншими способами, окрім ЛГМ, із порівнянною економічністю практично неможливо.

На рис. 8 зліва показана ґратчаста конструкція виливка, яку зручно збирати в просторові ґрати з моделей, чотири моделі з пінополістиролу показані праворуч. Такий виливок з легованого чавуну отримують у вигляді одного стосу ґрат із десяти штук, стос має

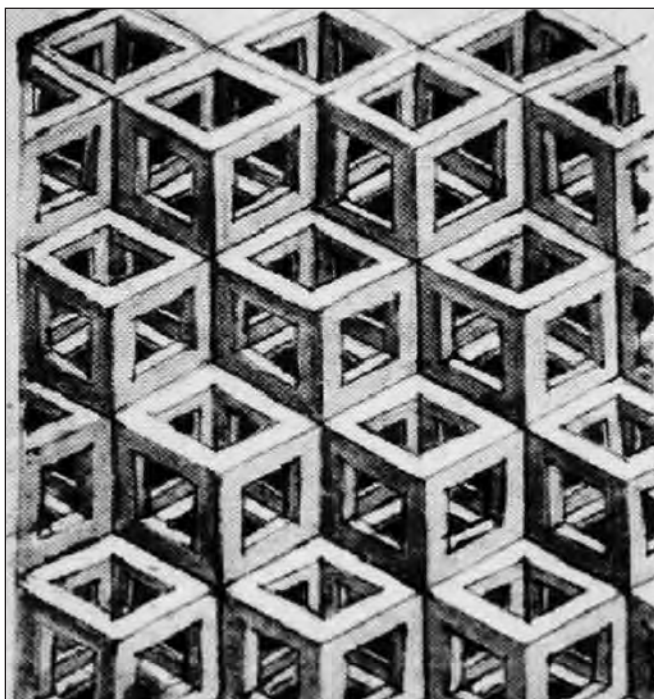


Рис. 9. Рисунок Леонардо да Вінчі

високу жорсткість і дає при литті стабільні розміри окремих плоских ґрат, а також оптимально заповнює об'єм ливарної форми до максимальної кількості виливків у ній. Потім стос розрізають на окремі плоскі ґрати, які слугують решітками зливостоків і каналізаційних систем.

Просторові ґратчасті конструкції мають “магнетичну здатність” приваблювати увагу багатьох конструкторів і архітекторів. Можливо, для того і малювали ще *Леонардо да Вінчі* (рис. 9), а також голландський художник-графік *Мауріц Ешер* (рис. 10) свої “заворожливі” просторові ґрати, щоб ми могли розробити технологію їх виготовлення, причому найбільш придатними з багатьох способів створення конструкцій є лиття способом ЛГМ, якому властива можливість “об’ємної” формовки.

Комірчасті просторові матеріали і фасонні виливки, отримані ЛГМ-процесом, розширяють існуючий спектр властивостей порівняно з компактними матеріалами. А литі ґратчасті матеріали, аналоги яких, зокрема, взяті з макро- і мікросвіту живої і неживої природи, із зібраних модельних елементів полегшать конструювання й дозволять налагодити випуск

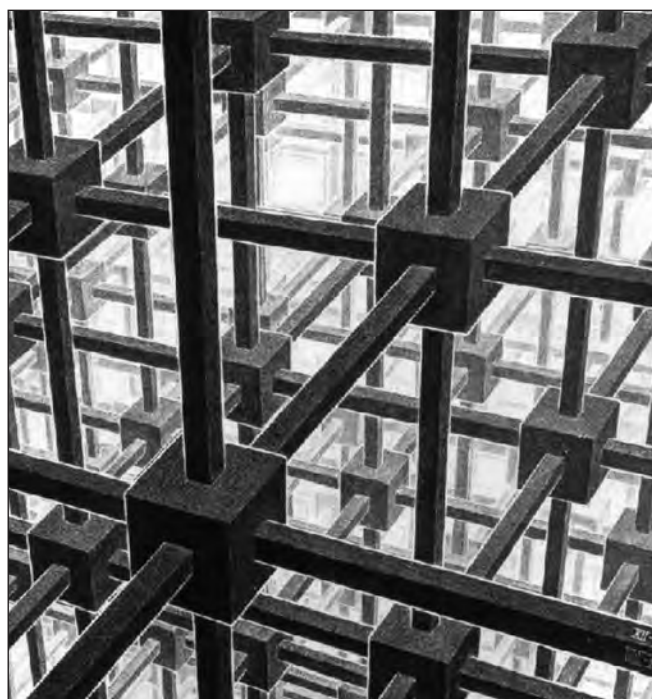


Рис. 10. Рисунок художника Мауріца Ешера

комірчастих матеріалів і каркасних легкових виробів, які часто називають “матеріалами майбутнього”. Раніше вченими нашого відділу був розроблений спосіб лиття розглянутих ґратчастих матеріалів в неперервному режимі [9].

Процес ЛГМ також можна віднести до технологій майбутнього, особливо корисних для тих небагатьох країн, до яких належить і Україна, які мають замкнений металургійний цикл, що отримують метал з власних руд і здатні перетворити його на високотехнологічний наукомісткий товар у вигляді машин і механізмів. Розвиток подібних технологій відкриває шляхи до запозичення відомих нам конструкційних закономірностей природних матеріалів не тільки для їхнього копіювання, але і для створення на принципах будови структур природи нових матеріалів, яких у природі не існує.

Виникнення нових способів створення і обробки матеріалів, методів будівництва та ін. усе частіше стає результатом об’єднання технологій з пізнанням природи, яке відкриває безмежні можливості для змінення нашого світу. ■

#### Література

1. **Дорошенко В.С.** Способи получения каркасных и ячеистых литых материалов и деталей по газифицируемым моделям. — Литейное производство. — 2008. — №9. — С. 28—32.
2. **Моуала Х.** и др. Стальная пена с открытыми порами - изготовление и свойства. — Металлургия машиностроения, 2006, №6. С. 29-33.
3. Патент Украины 83447 МПК В22С7/00, В22С 9/00. — Оpubл. 2008, Бюл. № 13. Литейная одноразовая модель / Шинский О.И., Дорошенко В.С.
4. **Боднар О.Я.** Геометрія філотаксиса. — Доповіді АН України. — 1992. — № 9. С. 9—14.

5. **Вернадский В.И.** Размышления натуралиста. Пространство и время в неживой и живой природе. — М.: Наука, 1975. — 220 с.
6. Патент UA 87782 МПК В22С 7/00. Литейная одноразовая модель / Шинский О.И., Дорошенко В.С. — Оpubл. 2009, Бюл. № 15.
7. **J.-P. Luminet.** A cosmic hall of mirrors — Physics World, September 2005. — P. 23—28.
8. **J.-P. Luminet.** A finite dodecahedral Universe — Nature, 9 October 2003, vol. 425. — P. 593—595.
9. Пат. 2029653 Россия: МКИ В22С 9/02. Способ непрерывного литья / Дорошенко В. С., Шейко Н. И. — Оpubл. 1995, Бюл. №6.