

ПЕРСПЕКТИВИ КОМП'ЮТЕРНОГО КОНСТРУЮВАННЯ ЛИТИХ МЕТАЛОВИРОБІВ

*Я хочу зрозуміти ті сили, які криються в матерії, я хочу пізнати ті причини, які примушують її бути в тих правильних, математично гармонійних формах, в яких ми всюди бачимо і відчуваємо її.
В.І. Вернадський, 1887 р.*



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

Процес лиття за газифікованими моделями (ЛГМ, *Lost Foam Casting*) у піщану форму із застосуванням вакуумування дозволив повному поглянути на конструкцію металевого виливка. З одного боку, матеріал застосовуваної пінопластової моделі на тонкому зрізі виглядає під мікроскопом як дрібнопориста піна, в якій повітря “упаковане” в тонкі полістирольні оболонки, а метал, що заливається (як у посудину, наповнену піною), газифікує ці оболонки і заміщує модель. З другого боку, сухий пісок при вібро- і/або пневмовпливі в процесі формовки схожий за властивостями на “*псевдорідину*” (за словам проф. **В.С. Шуляка**), яка обтікає модель. Тоді ливарну модель можна розглядати як конструкцію, де діють два плинних середовища: одне — метал, який при заливці заміщує модель зсередини, інше — “*псевдорідинний*” пісок, який при формовці обтікає її поверхню ззовні.

При дослідженні граничних можливостей процесу лиття й оптимізації конструкцій виливків з оглядом на ресурсозбереження виявили наукову проблему, яка полягає ось у чому: *які твердотільні конструкції можуть оптимально заповнити простір, розташуватися і “пролитися” в об’ємі піску ливарної форми?* Підказками на це запитання стали конструкції, які спостерігаються у живій і неживій природі, а також моделі будови мікроструктур органічних і неорганічних речовин, як їх уявляє сучасне природознавство. Головна відмінність запропонованих людиною інженерних конструкцій від створених природою полягає у високій енергоефективності останніх, а також у наявності в багатьох випадках таких характерних властивостей як повторюваність у різних напрямках однакових елементів, комбінаторика (фрактальність) і пористість (застосування в технічних пристроях принципів організації, властивостей, функцій і структур живої природи вивчає наука біоніка). Проте в основу конструювання, тобто створення прототипу, прообразу передбачуваного чи можливого об’єкта, можуть бути покладені не лише образи живої й неживої природи, але й уявлювані, ідеальні (наприклад, математичні) моделі, які загалом необов’язково мають (на сьогодні відому) відповідність чомусь у фізичному світі.

Ця стаття в рамках визначеної проблеми продовжує висвітлення прикладів конструювання литих каркасно-коміркових виробів і пошуку шляхів оптимізації їхньої будови включно із запозиченням “*технічних рішень*” у природи, оскільки природою “вже вирішені питання” підкорення простору конструкціями з високою ефективністю і ресурсозбереженням. Раніше [1] вже була описана можливість копіювання в литих виробах будови найпростіших кристалічних ґраток з використання об’ємних збірних структур із повторюваними уніфікованими елементами, пінопластові моделі яких можна виготовити на пластавтоматах або на 3D-фрезерах за

комп'ютерними програмами. Для конструювання зазначених литих конструкцій як аналогів використовувалися найбільш прості й примітні своїми властивостями структури.

Сьогодні комп'ютерне моделювання допомагає відображати наші уявлення про будову природних конструкцій і запозичувати деякі деталі для власних рукотворних конструкцій. Коли ми говоримо про структуру, то маємо на увазі, що основою наших знань із хімії, фізики, матеріалознавства і багатьох інших наук про Землю є, перш за все, знання про структуру речовини, оскільки вона багато в чому визначає властивості останньої. Тому вчені поставили задачу навчитися винаходити нові матеріали за допомогою розрахунків їхніх структур на комп'ютері.

Задача проектування кристалічних структур, яка б ґрунтувалася на їхньому хімічному складі, донедавна вважалась нерозв'язною. Традиційно розроблення нових матеріалів для технічних потреб відбувалося або методом проб і помилок, або і зовсім випадково. Тепер, коли квантова теорія досягла достатньо високого рівня, за результатами робіт *Артема Оганова* і співавторів (див. публікацію "*Як навчити комп'ютер винаходити нові матеріали*") стало можливим розробляти нові матеріали за допомогою комп'ютера.

Стійка кристалічна структура характеризується найнижчою енергією. Таку задачу розв'язують, досліджуючи всі можливі взаємні положення атомів та розраховуючи енергію для кожного з них і у такий спосіб визначаючи найнижчу енергію і оптимальну структуру. Проблема полягає в тому, що кількість варіантів у структурі астрономічно велика. Отже, ця задача не має прямого розв'язку, але можна її розв'язати, не здійснюючи повного перебору варіантів, а спрямовуючи розрахунок за допомогою самонавчання до глобального мінімуму енергії.

У цьому напрямку розроблено підхід, оснований на ідеях еволюції, який являє собою багатовимірну мінімізацію для пошуку будь-яких термодинамічно стійких станів [2]. Створення методів аналізу цих даних привело кристалографів в область багатовимірної геометрії. Аналіз схожих даних привів туди ж антропологів і літературознавців. Подібними методами літературознавці вже давно визначають авторство текстів, а генетики й антропологи визначають спорідненість між націями на основі ДНК.

На стику наук дуже схожі ідеї можуть застосовуватись до найрізноманітніших областей науки. Якщо створені програми проектування структур нових матеріалів з атомів, то, копіюючи атомні ґратки аналогічно [1], можна отримати їх великорозмірні пінопластові моделі для ґратчастих просторових виливків, розвиваючи способи лиття таких комірчастих металовиробів.

Розширюючи спектр конструкцій виливків, ЛГМ-процес дозволяє відкрити новий напрям лиття стільникових, об'ємно-комірчастих, каркасно-ґратчастих металовиробів, які мають потенціал для застосування як полегшені несучі, армувальні, ізолювальні, захисні, демпферні просторові конструкції, що здатні

поглинати або пропускати через свої стільники потік чи речовини енергії.

Концепція спрощення зборки пінопластових моделей комірчастих виливків в об'ємні структури шляхом застосування повторюваних уніфікованих елементів серійного виготовлення має аналоги в різних математичних моделях. Повторюванням певної елементарної комірки також отримано цілий клас періодичних мінімальних поверхонь (МП). Елементарні комірки багатьох з таких МП, у свою чергу, можуть "збиратись" із копій якогось фундаментального елемента і його дзеркального відображення. Теорія МП — класична, але одночасно це одна з областей математики, яка розвивається на стику геометрії, топології та варіаційного обчислення. Наочною реалізацією МП є мильна плівка: вона оповиває контури різних конфігурацій і набуває форми, яка відповідає мінімуму потенціальної енергії (енергії поверхневого натягу), яка прямо пропорційна її площі.

Одним із вдатних прикладів структури з МП, яка безкінечно з'єднується і повторюється у трьох вимірах, є *гіроїд (gyroid)*, вперше описаний американським фізиком *Аланом Шоеном (Alan Schoen)* з NASA в 1970 р., який підбирав надлегкий і міцний матеріал для космічних апаратів [3]. Поверхня гіроїда описується рівнянням

$$\cos x \cdot \sin y + \cos y \cdot \sin z + \cos z \cdot \sin x = 0.$$

Зразок гіроїда, отриманий у бронзі скульптором і математиком *В. Гроссманом (Bathsheba Grossman)* способом лиття за витоплюваними моделями, показано на рис. 1, а [4]. Зменшений ювелірний варіант того ж авторства виробляється з використанням 3D-принтера.

Тіла з гіроїдною структурою присутні в клітинах рослин і тварин в окремих блок-сополімерах при конденсації олігомерів. Узори на набряклих від води долонях учені пояснюють гіроїдною організацією "*скелета*" цих складок з волокон кератину, які в шкіру вкладені так, ніби вони знаходяться в порожнинах гіроїда. Гіроїдна структура (рис. 1, в) представлена на сайті Ульмського університету (University of Ulm, Institute of Polymer Science) [5].

Модель для виливка (рис. 1, а) отримана складанням повторюваних пластин у формі правильних шестикутників з фасонною поверхнею, яка має опуклі й угнуті частини. Фрагмент такого складання моделі з однакових фасонних полімерних пластинок темного й білого кольору показано на рис. 1, б. Такі пластини можна назвати фундаментальними елементами, а їхня форма у вигляді правильного шестикутника дозволяє скласти їх з двох, трьох чи шести частин як повторюваних елементів у поєднанні з копіями їхніх "*дзеркальних відображень*".

Модель з поверхнею гіроїда можна скласти без обмеження розміру, використовуючи такі фундаментальні елементи лише одного виду. Для дрібносерійного виробництва пінопластових моделей такі пластини чи зазначені складові частини можна робити

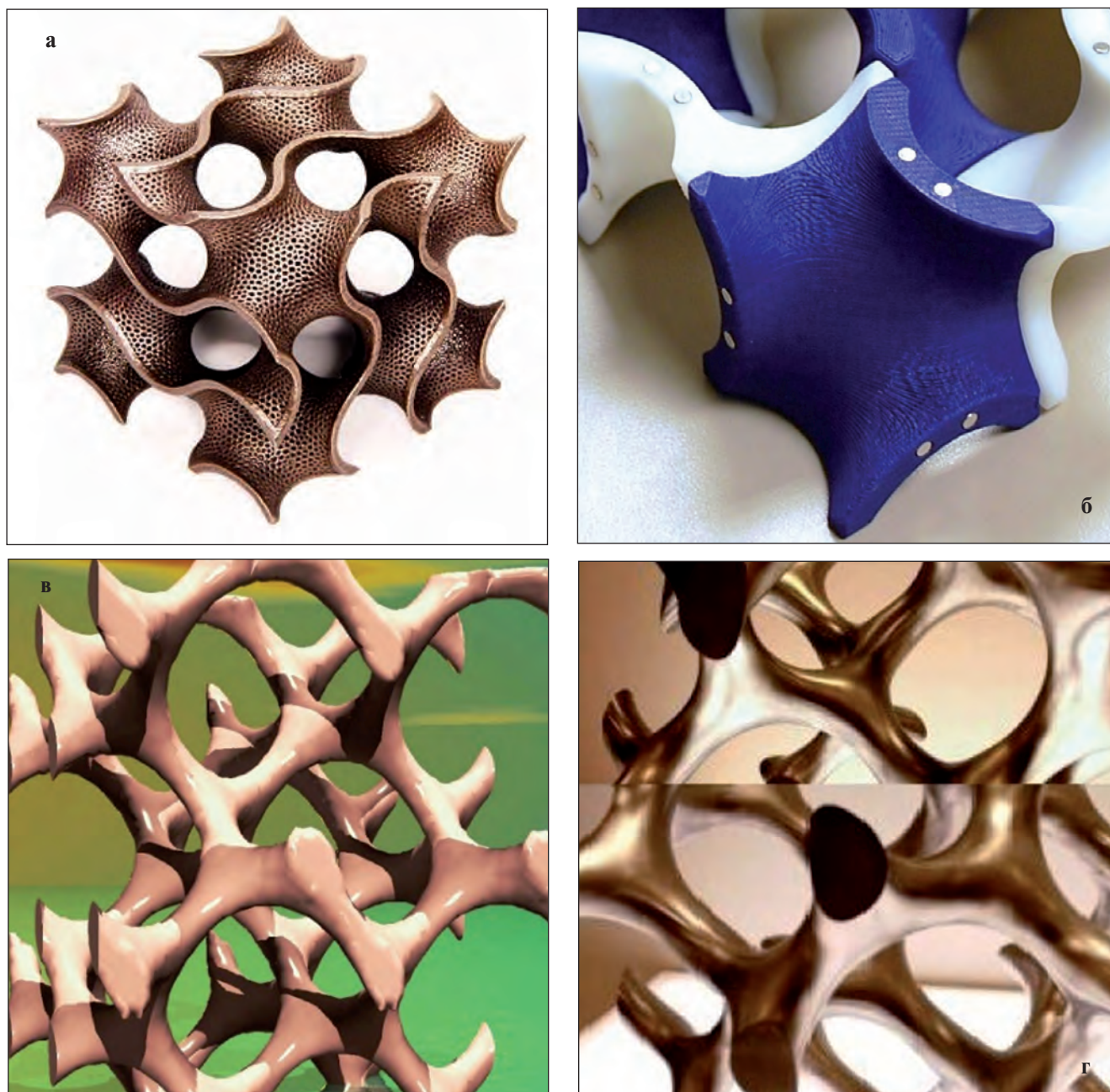


Рис. 1. Конструкції з гіроїдною структурою: а, г — металічні вилівки; б — варіант збірки моделі з однакових вигнутих пластин у вигляді шестикутника; в — модель структури полімера

плоскими й вигинати за методом, описаним у [6]. Для серійного виробництва описаних моделей їхні повторювані елементи більш технологічно виготовляти на пласт-автоматах (чи в прес-формах автоклавним способом) і складати відомими способами: склеюванням, за системою *шип-паз* та ін.

Ливарна модель з МП при формовці взаємодіє з піском на мінімальній ділянці поверхні моделі, яка третяся об пісок, що сприяє рівномірному ущільненню піску. Для разових моделей наявність МП збільшує кількість варіантів їхнього технологічного розташування в піску контейнерної форми, уникаючи небезпеки утворення незаповнених піском піднутрень і каналів. Зі зменшенням поверхні порожни форми, через яку тепло від металу, який заливається, відводиться до піщаного середовища, зменшу-

ється площа контакту цієї поверхні з металом, що покращує заповнюваність форми металом. З тієї ж причини принцип МП ефективний для проектування моделей ливникових систем. Заовалені обриси відливка зменшують імовірність тріщин через утруднення усадки відливка.

На сайті [4] показана модель гіроїда, яка побудована за допомогою вільно розповсюджуваної програми *Surface Evolver*, створеної **Кеннетом Брєкке** (**Kenneth Brakke**). Пошук поверхні з мінімальною площею (чи сумарної енергії поверхневого натягу) — лише найпростіший додаток цієї програми. За її допомогою при проектуванні виливок або оптимізації конструкцій для підвищення їхньої технологічності для будь-якого виду формовки можна створювати поверхні, “мінімальні” з точки зору більш складних

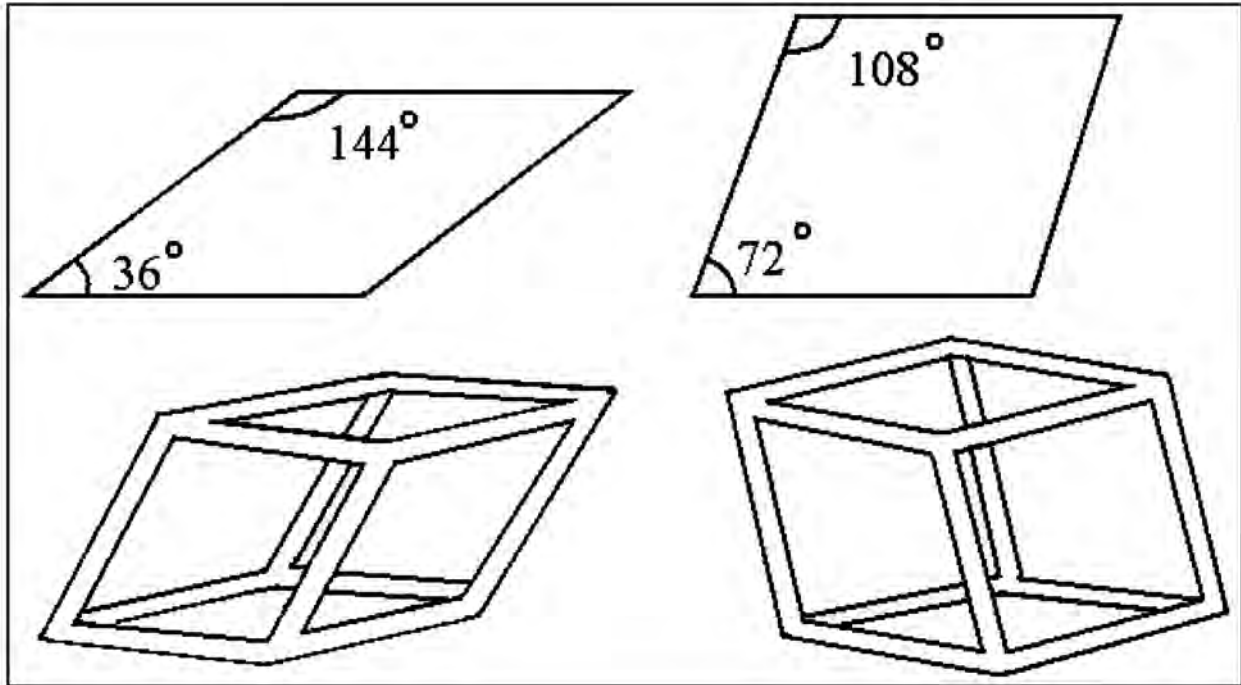


Рис. 2. Ромби з мозаїки Пенроуза і каркасні моделі ромбоєдрів

функціоналів. Такий функціонал (енергія) може бути комбінацією енергії поверхневого натягу, гравітаційної енергії, енергії деформації та ін., а також довільних поверхневих інтегралів, які задаються користувачем [7]. Це дає можливість не тільки отримувати на комп'ютері креслення моделі з МП, але і МП у поєднанні з заданими службовими характеристиками вилівка. Зокрема при ЛГМ таке креслення може відразу подаватися на керований комп'ютером 3D-фрезер, який в автоматичному режимі виготовить з пінопластових блоків ливарну модель або модель її прес-форми (наприклад, з двох половинок) для подальшого серійного виробництва ливарних моделей або їхніх частин за допомогою автоклава чи пласт-автомата.

Програма Surface Evolver при проектуванні виливків може обробляти об'єкти довільної топології, які підпорядковані різноманітним об'ємним і граничним зв'язкам. Наприклад, можна зафіксувати об'єм, який оточений поверхнею (ізопериметричні задачі), або контактний кут на лініях перетину бажаної поверхні з деякою заданою поверхнею. Для пошуку конфігурації з мінімальною енергією програма використовує метод градієнтного спуску і є одним із прикладів програм, придатних для побудови МП і їх поєднання з іншими поверхнями при конструюванні ливарних моделей або ливникових систем для різних ливарних процесів [7]. Аналітичність МП, кожна точка яких визначається у просторі аналітичною функцією, покращує технологічність проектування і виготовлення моделей, а також оснастки для них, контроль їхньої якості і виливків за ними, а також подальшої обробки виливків при здійсненні цих процесів за допомогою сучасного устаткування з програмним забезпеченням.

Дослідження можливості копіювання у литих комірчасто-каркасних конструкціях будови кристалічних ґраток з використанням об'ємних збірних структур з повторюваними уніфікованими елементами [1] отримало подальше продовження. Сучасний розвиток кристалографії в процесі узагальнення нових досліджень окрім традиційних кристалічних структур усе більше уваги приділяє *квазікристалам*, визнання яких відзначено Нобелівською премією з хімії за 2011 р. *Д. Шехтману (D. Shechtman)*. Структурна довершеність термодинамічно стійких квазікристалів ставить їх поруч з найкращими зразками звичайних кристалів і дозволяє класифікувати їх як підклас кристалів. Створені і штучні матеріали зі структурою, аналогічною до структури квазікристалів, названі *квазікристалічними метаматеріалами*. Квазікристали мають дуже низьку теплопровідність і низький коефіцієнт тертя.

Модель будови квазікристала може бути створена на основі мозаїки *Пенроуза* з двома "елементарними комірками", з'єднаними одна з одною за визначеними правилами стикування [8]. У наш час розроблено 3-вимірне узагальнення мозаїки Пенроуза (сітка Аммана—Маккея), яка складається з вузького і широкого ромбоєдрів, шестигранних фігур, кожна грань якої — ромб. На рис. 2 зверху показані "тонкий" і "товстий" ромби з мозаїки Пенроуза, знизу — ескізи каркасних моделей ромбоєдрів, заповнення простору якими аналогічно до побудови квазікристала дає просторову модель [9]. Приклади способів монтажу схожих комірчасто-каркасних моделей наведені в [1].

Дослідження квазікристалів стимулювало відродження інтересу до ідей і методів побудови мозаїк, математичної теорії, яка називається *теорією замоцених*

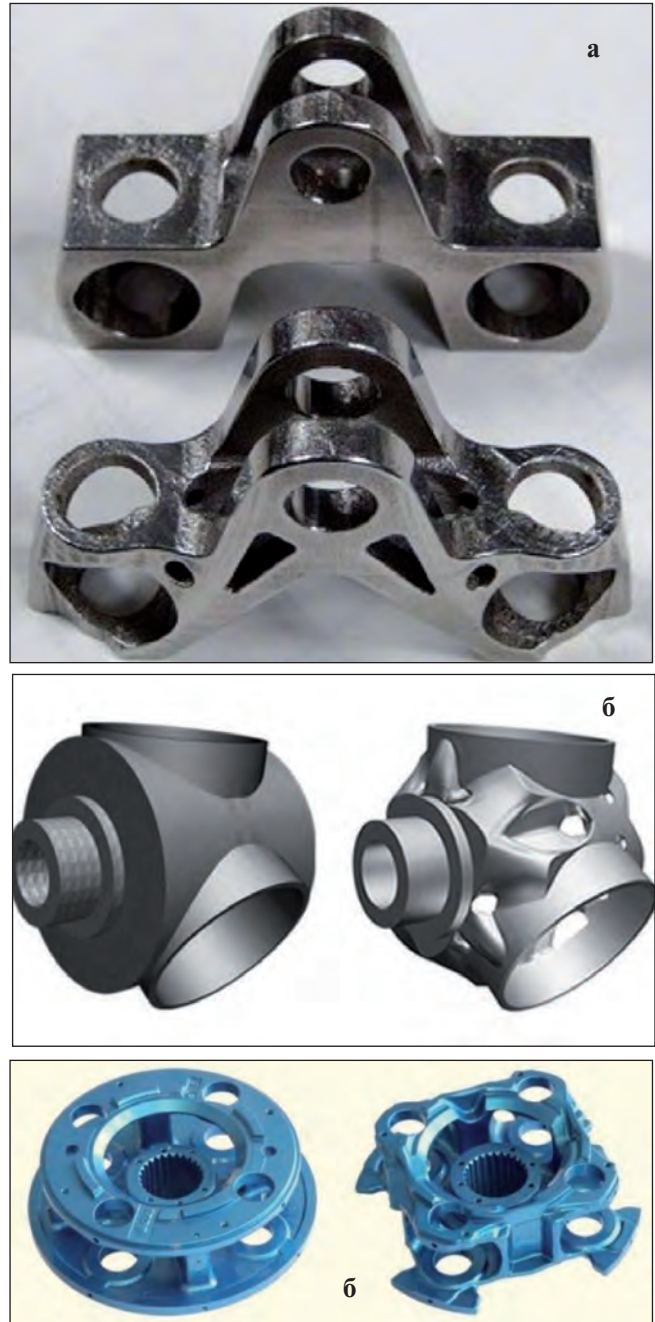
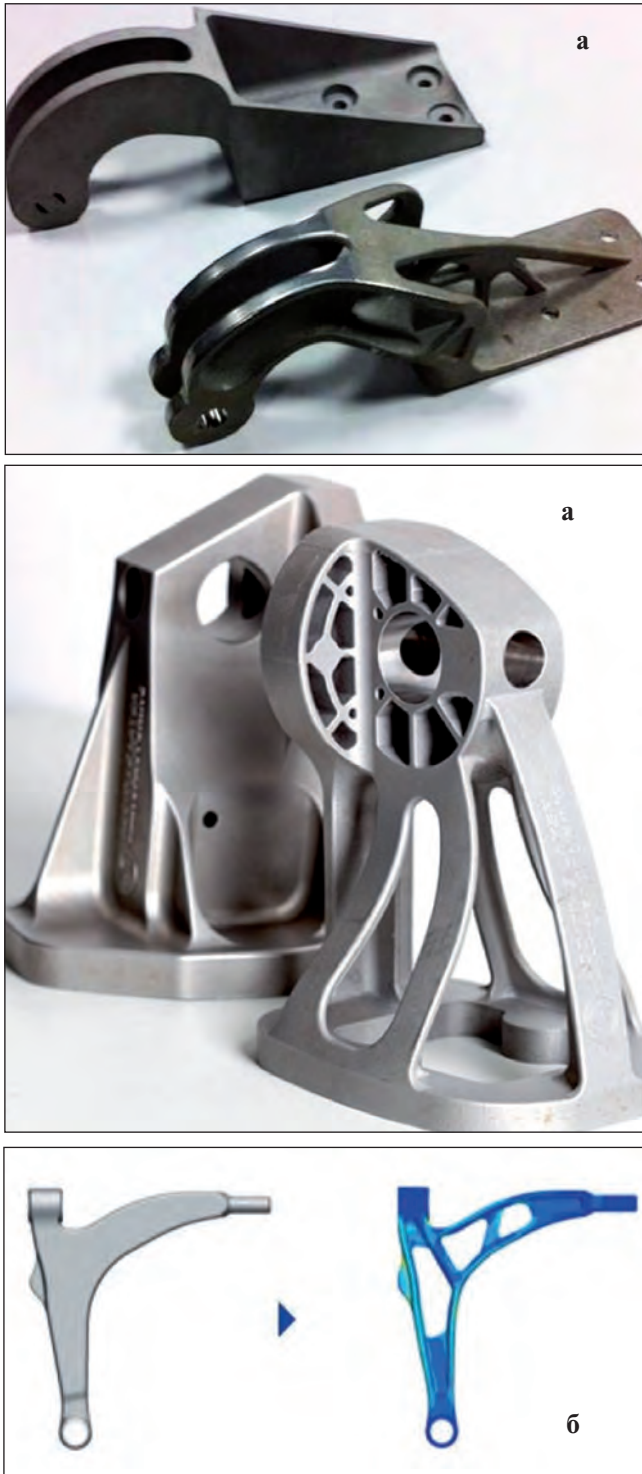


Рис. 3. Приклади комп'ютерної оптимізації конструкцій виливків

необмежених площини чи об'єму [8], до якої належать ізопериметричні задачі для багатогранників, скінченне і безкінечне розбиття на ромби, періодичні МП, 3-вимірні пазли, фрактальні дерева та ін. Зокрема, за допомогою комп'ютерної графіки розв'язуються задачі замощення методом кривих або поверхонь **Бевз'є**, який використовував їх для комп'ютерного проектування автомобільних кузовів. Технології програмно-віртуального конструювання просторових структур інтенсивно розвиваються. Опис квазіперіодичних структур формується на основі об'єднання різних дисциплін, таких, як сучасна геометрія, теорія чисел, статистична фізика і поняття золотого пропорції.

Неочікувана поява золотого пропорції в структурі квазікристалів свідчить про присутність в їхній симетрії *“живого мотиву”*, оскільки на відміну від неживих кристалів тільки живий світ допускає надзвичайні співвідношення золотого пропорції [8].

На рис. 3 показані приклади комп'ютерної оптимізації конструкції шістьох виливків, взяті з відкритих джерел в Інтернеті. На рис. 3, а подано у верхній частині фото — серійні виливки, нижче — конструкції виливків, “запропоновані” комп'ютером, більшість з яких монтують у рухомих конструкціях. На рис. 3, б у кожній парі зліва — серійний виливок, поруч — конструкція виливка, оптимізована комп'ютером з

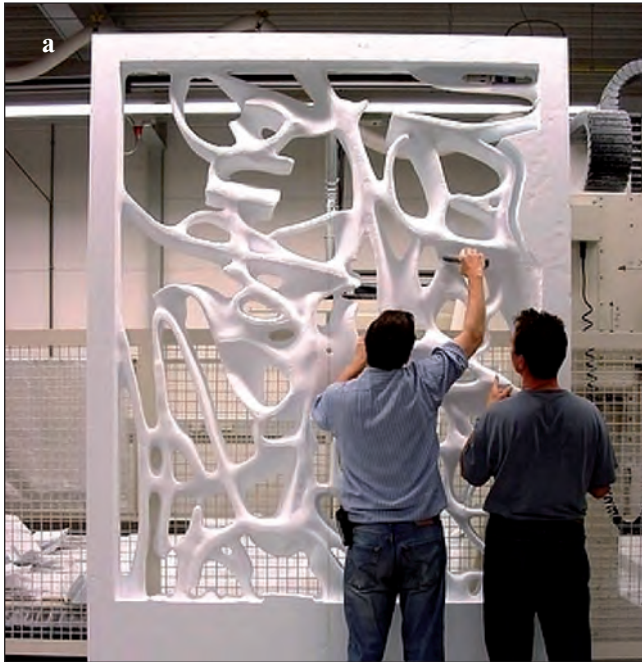


Рис. 4. Приклад художнього лиття як архітектурної прикраси:
а — модель воріт;
б — секції алюмінієвих виливків колажу вздовж великої будівлі Нью-Йорка

урахуванням вимоги до його використання. Видно, як традиційні монолітні конструкції “перетворюються” у витончені каркасно-комірчасті, які є наглядними прикладами металозбереження і покращення зовнішнього вигляду. Нові конструкції нескладно виробити способом ЛГМ.

Усе ширше для виготовлення разових ливарних моделей із пінопластів застосовуються 3D-фрезери. Приклад великогабаритних моделей для художнього лиття показано на рис. 4, а; на задньому плані видно деталі 3D-фрезера. За такими моделям відлита з алюмінію колаж “*графіті*” (рис. 4, б) як багатометрова архітектурна прикраса багатоквартирного будинку в елітному кварталі Нью-Йорка (проект Herzog & de Meuron, 2006). Збірний колаж уздовж лицьової сторони будинку містить десятки виливків (включно з декількома ворітьми), спроектованих за допомогою комп’ютерних технологій, з товщиною стінок, оптимальною для процесу лиття.

Новий крок в отриманні металовиробів — їхнє виготовлення на 3D-принтерах.

Досить фантастично виглядають комірчасті конструкції, отримані на 3D-принтерах за комп’ютерними програмами. Комірчасті виливки можуть копіювати структури природи, створюватися уявою людини, комп’ютерним проектуванням за визначеними наперед вимогами, що значно розширює наявний спектр металопродукції.

У статті ми показали можливість проектування виливків у відповідності з математичними концепціями побудови структур і описали приклади таких виливків, які цілком уписуються в технологію лиття за каркасно-комірчастими пінопластовими моделями легкого складання, що копіюють структури природи з оптимальним поєднанням матеріалоемності, міцності та привабливості зовнішнього вигляду [1, 6, 10].

Безперечно, це перші кроки на шляху комп’ютерного конструювання виливків. Розвиток цього напрямку розширює існуючий спектр металопродукції появою комірчастих виливків, очікувана вага яких буде на 50—90 % легше компактних виробів. ■

Література

1. **Дорошенко В.С.** Способы получения каркасных и ячеистых литых материалов и деталей по газифицируемым моделям // Литейное производство. — 2008. — № 9. — С. 28—32.
2. **Oganov A.R., Lyakhov A.O., Valle M.** How evolutionary crystal structure prediction works — and why // Acc. Chem. Res. — 2011. — 44. — P. 227—237.
3. **Schoen A.H.** Infinite periodic minimal surfaces without self-intersections // NASA Technical Note TN D-5541. Washington D.C., 1970, 99 p.
4. Bathsheba Sculpture. URL: <http://www.bathsheba.com/math/gyroid/>.
5. University of Ulm. Institute of Polymer Science, Germany. URL: http://polymer.physik.uni-ulm.de/mol_graphics/.
6. **Дорошенко В.С.** Пространственные литые конструкции, получаемые в объеме песка // Металл и литье Украины. — 2009. — № 7—8. — С. 45—52.
7. **Мешков В.** Минимальные поверхности и Surface Evolver Кеннета Брэкке // Вестник молодых ученых. — 2004. — № 1. — С. 84.
8. **Белянин В.С.** Квазикристаллы и золотая пропорция // Наука и жизнь. — 2005. — № 10. — С. 68—76.
9. **Чердниченко В.С.** Материаловедение. Технология конструкционных материалов. 2-е изд. М.: Омега-Л., 2006. 751 с.
10. **Дорошенко В.С.** Математическое проектирование каркасно-ячеистых оливок // Литейное производство. — 2013. — № 2. — С. 9—12.