Дорошенко В. Створення технологічних виробів оптимальним заповненням простору каркасними литими металоконструкціями / Дорошенко В., Кравченко В., Муль О. // Вісник ТНТУ. — 2010. — Том 15. — № 3. — С. 29-35. — (механіка та матеріалознавство).

УДК 621.744.072.2: 678.746.22-404.8

В. Дорошенко[1], канд. техн. наук; В. Кравченко[1], канд. фіз.-мат. наук; О. Муль[2], канд. фіз.-мат. наук

[1] Фізико-технологічний інститут металів і сплавів НАН України
[2] Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

СТВОРЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ВИРОБІВ ОПТИМАЛЬНИМ ЗАПОВНЕННЯМ ПРОСТОРУ КАРКАСНИМИ ЛИТИМИ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЯМИ

Резюме. *Запропоновано відливати каркасні та комірчасті металеві конструкції за газифікованими моделями. Описано ряд прикладів таких відливок, одержаних за аналогами із живої та неживої природи. Такі вироби відносять до інноваційних, оскільки вони розширюють існуючий спектр властивостей металопродукції, мають потенціал застосування у конструкціях, що взаємодіють з об'ємом чи потоком речовини або енергії, а також у якості основи для армованих композиційних матеріалів та внутрішніх холодильників для зливків і фасонних відливок.*

Ключові слова: *комірчасто-каркасні конструкції, лиття за газифікованими моделями, оптимізація конструювання відливок, ресурсозбереження, фрактальність конструкцій.*

V. Doroshenko, V. Kravchenko, O. Mul

CREATION OF TECHNOLOGICAL PRODUCTS BY MEANS OF OPTIMAL FILLING OF SPACE BY SKELETON MOULDED METAL CONSTRUCTIONS

The summary. *Casting of skeleton and cellular metal constructions against gasified patterns is proposed. Several examples of such castings carried out according to analogues from the live and lifeless weather are described. Such products are innovation ones as far as they expand an existing spectrum of metal production properties. Also, they have a potential of applications in constructions, which interact with a volume or with a flow of substance or energy, as well as they can be used as a base for reinforced composite materials and internal refrigerators for ingots and shape castings.*

Key words: *cellular-skeleton metal constructions, casting against gasified patterns, optimization of casting design, resources-economy, fractality of constructions*

Постановка проблеми. Ресурсозбереження набуває особливо важливого значення у сучасній техніці та конкурентній економіці. Тому актуальним є проектування комірчасто-каркасних металевих матеріалів та деталей, які є на 50-90% легшими за монолітні вироби. В даній роботі наведено приклади створення методом лиття таких конструкцій, що повторюють ресурсозберігаючі «розв'язки» самої живої та неживої природи. Серед характерних закономірностей будови таких виробів є повторюваність їхніх елементів, способу їхнього розгалуження або створення, що визначається як фрактальність конструкції. Комірка, як правило, має свої стабільні механічні та гідродинамічні характеристики, визначивши які, їх можна екстраполювати на усю структуру, що складається з комірок, складених за певним алгоритмом.

Проектування литої металоконструкції при її отриманні з металевого розплаву в ливарній формі для більшості видів форм передбачає розміщення відливки в площині (дуже рідко, поверхні) роз'єму цієї форми. Існування роз'єму форми в технології лиття металів створило стереотип, який формує уявлення про те, який вигляд повинна мати відливка. В кінцевому результаті, керуються загальнопоширеною думкою, що відливка – це те, що входить у роз'єм форми.

Технологія лиття за газифікованими моделями (ЛГМ) [1] дозволяє розмістити відливку або блок відливок в об'ємі піску нероз'ємної (контейнерної, одноопорної) форми і тим самим виносить на розгляд проблему оптимізації конструювання відливки

як об'ємного просторового виробу, що практично недоступно іншим ливарним технологіям. Замість старого завдання «як розмістити відливку у площині?» для ЛГМ актуальне завдання «як розмістити відливку в об'ємі?», а саме в об'ємі сипучого піску, який за своїми властивостями під час віброущільнення нагадує «псевдорідину». Вирішення цього завдання спрощується особливою легкістю обробки пінопластів різанням, чому сприяє їхня низька щільність 25-30 кг/м^3; високою продуктивністю отримання виробів із них на пласт-автоматах. Ці умови мінімізують обмеження на розміри, форму та темп виготовлення пінопластових моделей.

Вказані можливості ЛГМ-переходу до проектування литих відливок металовиробів в об'ємі піску форми значно розширюють спектр їхніх ймовірних конфігурацій і, зокрема, відкривають новий напрям лиття сотових, об'ємно-комірчастих, скелетно-решітчастих конструкцій, матеріалів і блоків відливок. Відливки такого виду дозволяють застосовувати їх в якості полегшених несучих, армуючих, ізолюючих, огороджуючих, демпфуючих удари конструкцій, здатних знаходитися у середовищі, пропускаючи через себе потік речовини або енергії. Такі конструкції можна використати для виділення відходів при очищенні газів, рідин, а також для теплообмінних, адсорбційних, акустичних пристроїв, елементів джерел струму, каталізаторів, кристалізаторів, електродів та як основу для композиційних матеріалів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Створення литих конструкцій та пошук шляхів оптимізації їхніх конфігурацій з точки зору ресурсозбереження призводять до ідеї їх виготовлення шляхом копіювання за аналогами із живої та неживої природи, включаючи структури мікросвіту. Це випливає з того, що природою уже «розв'язані» проблеми створення конструкцій з надзвичайно високою стабільністю їхніх просторово-часових характеристик [1-4]. Для цього, зокрема, в роботах [1, 3] запропоновано використовувати принципи будови кристалічних решіток, як їх зображують у кристалографії; спіралеподібного розташування листків (філлотаксіс) із ботаніки; піни з наскрізними порами та комірками у вигляді пентагонального додекаедра, що застосовується у фізико-хімічних задачах.

При створенні об'ємних структур, за аналогією з біологічними структурами, які поширюються у просторі, звертають на себе увагу конструкції гілок дерев, які розвиваються від товстих до тонких розгалужень. Очевидно, що така зміна перерізу має перевагу для протікання металу у порівнянні з рівностінними конструкціями.

На рисунку 1 зображено литу деревоподібну конструкцію, що складається зі стовбура 1 та гілок 2. При використанні її в якості внутрішнього холодильника-кристалізатора для лиття відливок гілки 2 доцільно розташувати перпендикулярно до поверхонь 3 стінок виливниці, тобто назустріч найімовірнішому напряму росту кристалів зливка, які також ростуть перпендикулярно до стінки виливниці після заливання в неї металевого розплаву.

Аналогічно можна врахувати конструктивні особливості та розташування гілок для армування бетонних конструкцій тощо. Виготовлення деревоподібної конструкції способом ЛГМ полягає у заливанні розплавленого металу у відповідну модель через лійку. Якщо при цьому модель виконано з пінопласту, то виготовлення її збірних елементів полягає у засипанні гранул цього матеріалу та їх спіканні у прес-формі. Як зображено на рисунку 1, елементи моделі гілки та трубчасті ділянки стовбура можна складати (склеювати) на направляючому штирі (пунктиром позначено лінії стику).

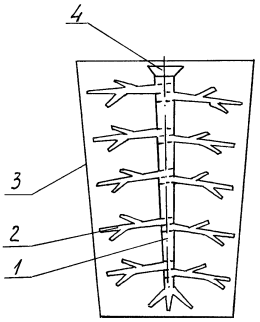


Рис. 1. Лита металева деревоподібна конструкція:
1 – стовбур, 2 – гілки, 3 – контури стінок виливниці, 4 – залишок лійки

У деревоподібних литих конструкціях бажано враховувати деякі загальні закономірності будови дерев, що присутні в живій природі. Як зазначено у монографії Бенуа Мандельброта [2], Леонардо да Вінчі емпіричним шляхом дійшов висновку, що на довільній висоті діаметри стовбура або гілок d до розгалуження та діаметри d_1, d_2 гілок дерева після розгалуження задовольняють співвідношення

$$d^{\Delta} = d_1^{\Delta} + d_2^{\Delta},$$

де діаметральний показник $\Delta = 2$, що доведено на практиці. Там же вказано, що показник «дерева» кровоносних артерій ссавців є близьким до $\Delta = 2{,}7$, а для «дерева» бронхів $\Delta = 3$.

З точки зору гідродинаміки система каналів при $\Delta = 3$ має мінімальний опір. Звідси, якщо важливими є міцнісні властивості конструкції, то показник Δ приймають близьким до 2. Якщо важливим є виконання умови заповнюваності металом ливарної форми, то показник Δ приймають близьким до 3. Цю особливість корисно враховувати в ливарній гідравліці при конструюванні розгалужених ливникових систем.

В ряді конструкцій ливарних моделей використано аналогію з мікроструктурою таких конденсованих середовищ, для яких є характерним невпорядковане розташування атомів у просторі, зокрема, аморфних металевих сплавів (АМС) [5]. Незважаючи на те, що щільність АМС є на 1-2 % нижчою за щільність кристалічних аналогів, їх міцність у 5-10 разів вища і відзначається характерною ізотропією багатьох властивостей, що пов’язано в основному з відсутністю в структурі АМС дислокацій та границь зерен, властивих кристалічному стану.

В останні роки ряд перспективних напрямів у матеріалознавстві, нанотехнологіях пов’язують із фулеренами та відкритими у 1991 році довгими циліндричними вуглецевими утвореннями, що одержали назву “нанотрубки”. Такі та інші подібні структури називають також вуглецевими каркасними структурами [7]. Незважаючи на вдавану крихкість і навіть мереживність, нанотрубки виявилися на рідкість міцним матеріалом каркасної комірчастої конструкції, одержувати аналоги яких пропонується і у макросвіті, зокрема способом ЛГМ, виготовляючи ливарні моделі методом згортання з плоских елементів.

Метою даної роботи є розроблення нового ресурсозберігаючого підходу до технології лиття металевих конструкцій за аналогами з живої та неживої природи з урахуванням закономірностей їх будови, що дозволяє значно покращити властивості металопродукції.

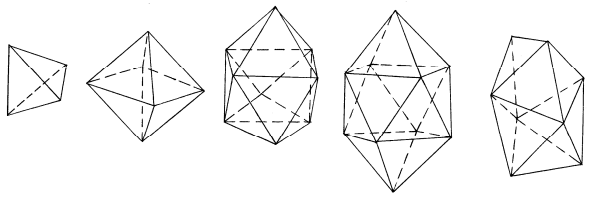
Постановка задачі та результати дослідження. Аналіз останніх досліджень показав, що аналогів технологій виготовлення металевих просторово-комірчастих конструкцій як цілих (нескладених) виробів немає. Тому у даній роботі ставиться завдання створити й обґрунтувати новий ресурсозберігаючий технологічний підхід до лиття такої металопродукції, який би дозволив покращити її властивості.

Виготовлення литої конструкції з перпендикулярними до стовбура гілками зручно для лиття за разовою моделлю тим, що для виготовлення пінопластової моделі можна застосувати просту прес-форму з отвором у моделі, вісь якої перпендикулярна гілці. Лита дендритна конструкція внутрішнього холодильника при литті масивних відливок може бути з одного або різного металу відносно того, що заливається у форму. При затвердінні металу таких відливок кристали, що ростуть від стінки виливниці, конкурують з дендритами, які ростуть назустріч їм від гілок холодильника, що сприяє подрібненню зерна відливки рівномірно по усьому об'єму [3].

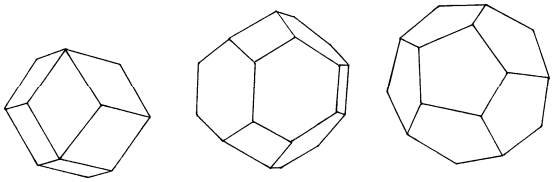
Литі деревоподібні конструкції, що застосовуються як армуючі (наприклад, у бетоні) для опору навантаженню, направленому перпендикулярно осі стовбура, аналоги яких узяті з ботаніки [4], є нескладними для конструювання та технологічними для лиття методом ЛГМ. Просторові деревоподібні відливки наближаються по вигляду до комірчастих або сотових, які усе частіше називають матеріалами майбутнього.

Якщо у роботі [1] використано будову кристалів, то в описаних нижче конструкціях ливарних моделей використано аналогію з будовою аморфних металевих сплавів (АМС) [5]. Тримірні зв'язки в структурі АМС зображають у вигляді багатогранників [6], зокрема тетраедра, октаедра, тригональної призми, архімедової антипризми, тетрагонального додекаедра, як зображено на рисунку 2а. Крім того, атомні конфігурації описують у вигляді поліедрів Вороного, що зображені на рисунку 2б. З кристалографії відомо, що багатогранники Бернала і Вороного оптимально заповнюють простір структури без пустот.

У загальному випадку аморфна структура являє собою неперервний мозаїчний візерунок, що складається з багатогранників, які чергуються, та є характерними для кристалічних і некристалічних структур, що і взято за основу принципу побудови наведеної нижче одноразової ливарної моделі.



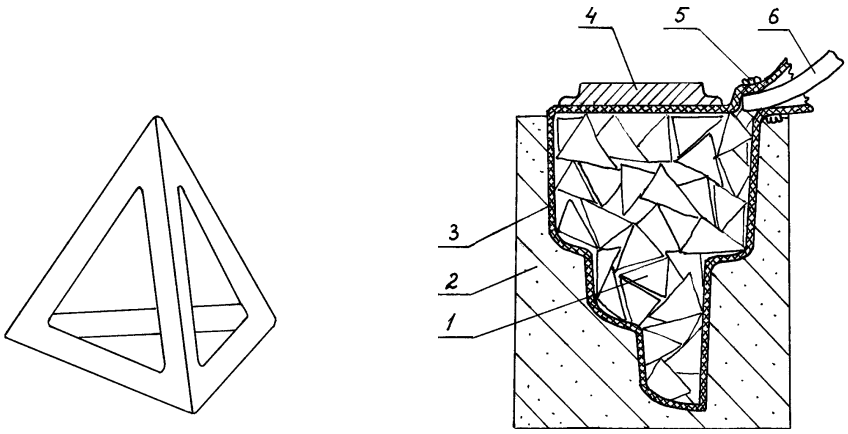
а)



б)

Рис. 2. Поліедри: а) 5 типів правильних поліедрів Бернала (зліва направо): тетраедр, октаедр, тригональна призма, архімедова антипризма, тетрагональний додекаедр; б) поліедри Вороного (зліва направо): ікосаедр, поліедр структури об'ємноцентрованого кристала, поліедр структури гранецентрованого кристала

На рисунку 3а зображено найпростіший повторюваний елемент пінопластової моделі у вигляді тетраедра, а на рисунку 3б – приклад використання таких елементів.



а) б)

Рис. 3: а) елемент моделі у вигляді тетраедра; б) схема одержання фасонної моделі, де: 1 – модель з повторюваних елементів, 2 – формоутворююча ємність, 3 – синтетична плівка у вигляді мішка, 4 – вантаж, 5 – затискач, 6 – патрубок

Схема виготовлення моделі 1 (рис. 3б) у вигляді фасонного каркаса, що складається з багатогранників (тетраедрів), описує операцію їхнього розміщення у формоутворюючу ємність 2, зокрема, у вигляді піщаної форми, порожнину якої покривають синтетичною плівкою 3 у вигляді мішка. Модель 1 з повторюваних елементів має вантаж 4, а порожнина мішка герметично сполучена з вакуумною помпою за допомогою затискача 5 через патрубок 6.

Один із варіантів складання елементів такої моделі в багаторазовій формі полягає в наступному. Попередньо виготовлені багатогранники, подібні до зображених на рисунках 2 та 3, розмірами від кількох до десятків міліметрів, засипають або вручну вкладають у формоутворюючу ємність 2 (рис. 3б). Попередньо там розміщують мішок, що не пропускає повітря, із синтетичної плівки 3. Після засипки усіх елементів вакуумують порожнину мішка, тим самим фіксуючи багатогранники в єдиній моделі шляхом притискання їх один до одного перепадом тиску повітря ззовні та зсередини.

Існують варіанти конструювання без вакуумування мішка, коли після завантаження багатогранників всередину мішка у формі 2 (рис. 3б) туди ж подають самозатвердіваючу формувальну суміш, яка утримує їх разом, а плівка мішка слугує розділяючим покриттям. Як варіант, каркас із модельних багатогранників можна сполучати із суцільною газифікованою моделлю та одержувати каркасну відливку з монолітними частинами. Аналогія каркасних конструкцій з мікроструктурою аморфних металів, атомна конфігурація яких за даними кристалографії має вигляд вказаних багатогранників, як найщільнішої упаковки, дає можливість перенести деякі властивості, наприклад, ізотропію на литі металеві комірчасті конструкції.

Розглянемо ще один варіант каркасного лиття. На рисунку 4 зображено варіант згинання плоского елемента справа. Такий елемент у вигляді пластини із сегментами 1 та надрізами 2 при звертанні закріплюють замком 3. Якщо сума кутів клиноподібних вибірок дорівнює 360°, то при звертанні в замкнену систему сторони усіх клинових вибірок змикаються таким чином, що утворюють суцільне тіло на товщину сегмента 1, а зменшення товщини плоского елемента за рахунок вибірок не зменшує товщину стінки елемента в згорнутому вигляді.

Плоский елемент газифікованої моделі можна виготовляти неперервним, наприклад, за версією способу [8] шляхом складання із частин та нарощування його у процесі формування в облицювальний шар рухомого кристалізатора у вигляді піщаної вакуумуючої форми.

Копіюючи структуру вуглецевих нанотрубок, можна виготовити, за аналогією з ними, елемент конструкції моделі, що зображений на рисунку 5. Модель сітчастої пінопластової трубки складається з повторюваних перегородок 1 у вигляді згорнутої

решітки з комірками з правильних шестикутників. Товщина таких перегородок визначається можливістю їхнього заміщення розплавленим металом.

На рисунку 5 зображено сітчасту перегородку 2 вигнутої форми, що своїм виглядом нагадує закінчення нанотрубки, а сама сітчаста трубка виконана у формі, близькій до циліндра. Якщо згортання подібних графену плоских елементів проводять таким чином, що дві перегородки кожної шестикутної комірки розташовуються перпендикулярно осі, навколо якої відбувається звертання, то така конструкція сітчастої трубки буде в 1,5 раза міцнішою на розрив уздовж цієї осі, ніж у випадку, коли дві перегородки кожної комірки будуть розташовані паралельно цій осі [7].

Розглянутий спосіб згортання плоских елементів у трубки доцільно використовувати для виконання моделей стояків, які застосовуються для більшості видів відливок. Для цього стінки трубчастої конструкції зі згорнутих елементів роблять непроникними для формувальної суміші, а торці трубчастої конструкції закривають кришками. Так формують близьку за формою до циліндра модель стояка або колектора ливникової системи.

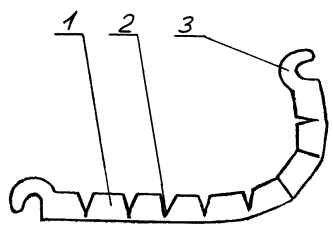


Рис. 4.Вигляд збоку плоского елемента при згинанні справа, де 1 – сегмент пластини, 2 – клинові вибірки (надрізи), 3 – замок

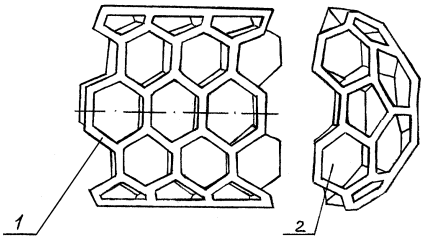


Рис. 5. Частина конструкції моделі, яку виготовлено за аналогією зі структурою вуглецевих нанотрубок, де 1 – перегородка комірок, що є правильними шестикутниками, 2 – сітчаста перегородка (закінчення) трубки

Такий спосіб згортання плоских модельних елементів, попередньо одержаних у прес-формах з плоским роз'ємом, дозволить отримати трубчасті та інші фасонні, каркасні й просторові комірчасті моделі. Це ще один спосіб, який розширює можливості виготовлення литтям комірчастих конструкцій з вигнутою поверхнею, зокрема у вигляді вуглецевих каркасних структур за аналогами з фізики наносвіту. Для монолітних модельних конструкцій такий спосіб вже застосовувався, прикладом чого може слугувати виконана з використанням цього способу та зображена на рисунку 6 пінопластова модель для одержання методом ЛГМ відливки корпуса насоса зі зносостійкої сталі.

У світовій практиці для каркасного лиття є типовим використання ЛГМ-процесу, прикладом чого є 50-фунтова відливка деталі внутрішнього привода клапана з нержавіючої сталі, зображена на рисунку 7, яку також можна віднести до комірчастих виробів [9]. Зокрема, подібні рішення можна запропонувати для лиття двошарових армованих і біметалевих контейнерів, а також деталей конструкцій для захоронення радіоактивних відходів.

Рис. 6. Пінополістиролова модель відливки корпуса насоса для перекачування гірничої пульпи зі зносостійкої сталі

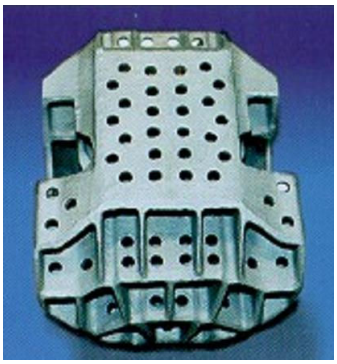


Рис. 7. Відливка деталі внутрішнього привода клапана з нержавіючої сталі

Висновки. Описане проектування комірчасто-каркасних металовідливок в об'ємі піску, яке може бути виконано на основі практичного втілення інноваційних можливостей ЛГМ-процесу, відноситься до сучасних технологій ливарного виробництва й зберігає значні перспективи свого розвитку та розширення усталених уявлень про нього. Запропонованими у статті конструкціями зроблено спробу копіювати природу, використовуючи результати досліджень різних наук. Лиття, як одне з найдавніших ремесел, у цьому плані випереджає інші види обробки металів.

Література

1. Дорошенко В.С. Способы получения каркасных и ячеистых литых материалов и деталей по газифицируемым моделям / В.С. Дорошенко // Литейное производство. – 2008. – № 9. – С. 28–32.
2. Mandelbrot B.B. The fractal geometry of nature. – New York: Freeman and Co., 1983. – 540 p.
3. Дорошенко В.С. Структура литейной ледяной модели с точки зрения теории фракталов / В.С. Дорошенко, В.П. Кравченко // Металл и литье Украины. – 2010. – № 3. – С. 33–37.
4. Ковалев Ю. Архитектура деревьев / Ю. Ковалев// Наука и жизнь. – 1988. – № 12. – С. 147–150.
5. Шинський О.Й. Ливарна одноразова модель і спосіб її збирання / О.Й. Шинський, В.С. Дорошенко // Заявка на винахід UA 200710690, B22C 7/00. – 2009. – Бюл. №7.
6. Судзуки К. Аморфные металлы / К. Судзуки, Х. Худзимори, К. Хасимото. – М.: Металлургия, 1987. – 328 с.
7. Иванов И.П. Современная физика в задачах. http://rc.nsu.ru/text/metodics/ivanov5.html.
8. Дорошенко В.С. Способ непрерывного литья / В.С. Дорошенко, Н.И. Шейко // Патент России 2029653, B22C 9/02. – 1995. – Бюл. №6.
9. American Foundrymen's Society website: http://web.mst.edu/~foundry/.

Отримано 02.06.2010 р.