

<https://doi.org/10.15407/plit2022.04.063>

УДК 621.74.045: 624.014.2

О. Й. Шинський, д-р техн. наук, зав. відділу; e-mail: aluprt@ukr.net,
ORCID 0000-0001-6200-0709.

П. Б. Калюжний, канд. техн. наук, старш. наук. співроб.;
e-mail: kpb.ptima@gmail.com, ORCID 0000-0002-1111-4826.

В. С. Дорошенко, д-р техн. наук, пров. наук. співроб.;
e-mail: doro55v@gmail.com, ORCID 0000-0002-0070-5663

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України (Київ, Україна)

БІОНІЧНИЙ ПІДХІД ДО ВИГОТОВЛЕННЯ ЛИТИХ ЛЕГКОВАГИХ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ ДЛЯ БУДІВНИЦТВА СПОРУД МОДУЛЬНОГО ТИПУ

Швидкозбірні модульні будівельні металоконструкції мають ряд переваг, особливо для повторного використання, порівняно з будівельними конструкціями з бетону та дерева. Аналіз структури вартості таких металоконструкцій та їх монтажу засвідчив, що найефективніший засіб зниження їх вартості – це зменшення витрат металу. На відміну від зварних для болтових конструкцій спрощується монтаж та болтові з'єднання забезпечують можливість демонтажу конструкції з перевезенням на інше місце, що важливо для ангарів, складів, що змінюють локацію. Посиленню потенціалу для нового та швидкого будівництва може сприяти виливання легковагих металоконструкцій, для чого найбільш придатний спосіб лиття за моделями, що газифікуються, у вакуумовані форми з сипкого піску. Ніякий інший ливарний спосіб не може конкурувати з ЛГМ у виробництві каркасних несучих конструкцій складної геометрії. Розглянуто приклади оптимізації металоконструкцій шляхом наслідування конструкцій природи, зокрема біологічних і структури ДНК, як біонічного підходу до проектування рукотворних металовиробів. Каркасні і комірчасті просторові матеріали, отримані методом ЛГМ, розширюють існуючий спектр властивостей порівняно з компактними матеріалами. А описані литі матеріали за аналогами з макро- та мікросвіту природи і за збірними моделями спростять конструювання та випуск каркасних легковагих виробів, які відносять до «матеріалів майбутнього». Україна отримує метал із власних руд і здатна перевести його у високотехнологічний наукомісткий товар у вигляді машин, механізмів та будівельних конструкцій. Технологічний напрям запозичення конструкційних властивостей природних матеріалів досліджується не лише для їх копіювання, а й для отримання нових матеріалів та конструкцій з оптимізацією під конкретні механізми чи будівлі, сприяючи застосуванню металоконструкцій як ефективного рішення в будівельній галузі при відбудові країни.

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

За нинішніх вітчизняних умов зведення збірних модульних будівельних споруд, що швидко монтуються з металевих конструкцій, вельми злосудне 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 порівняно 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

транспортбельні, легко монтуються, а також за умов болтових з'єднань демонтуються для перевезення на інше місце, що важливо для ангарів, складів тощо, які змінюють локацію. За умов застосування суцільного матеріалу та сполучень є можливість виконувати водо- та газонепроникні конструкції, а індустріальне виробництво будівельних металоконструкцій досягається виготовленням їх чи опорно-несучих деталей для них в спеціалізованих, в тому числі ливарних цехах.

З огляду виснаження невідновлюваних природних ресурсів і утворення відходів однією з ключових проблем є великий обсяг споживання природних ресурсів зі значною частиною 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 придатні для переробки в конструкції для нових будівель, що в рази більше, ніж для таких з бетону чи деревини.



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

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.

Вартість конструкцій складається з вартості металу для їхнього виготовлення (60–70 %), вартості виготовлення на заводі (15–20 %) та вартості монтажу (10–15 %). У вартість металевих конструкцій входять також транспортні витрати (3–7 %) та вартість проектування й інжинірингу (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, за якою 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 для сполучення повторювальних модульних елементів. Також кінцевий економічний результат безпосередньо співвідноситься з ефективною простотою конструкції таких конекторів, виготовлення яких рекомендовано методом лиття [2]. Якщо

зварювання на будівельному майданчику не застосовується, то це спрощує монтаж та не передбачає застосування спеціалізованого обладнання для зварювання і контролю сполучень. Болтові з'єднання забезпечують можливість демонтажу металоконструкції і її релокації, що актуально для ангарів, складів, баз тощо, а також для швидкісної побудови різновидів споруд захисту військових і цивільних об'єктів при попередженні чи ліквідації наслідків техногенних аварій та в інших надзвичайних чи екстремальних умовах, в тому числі з застосуванням типових конструкцій литих легковагих (порожнистих) модулів зі сталі чи високоміцного чавуну (ВЧ) з заданою масою на одиницю об'єму.

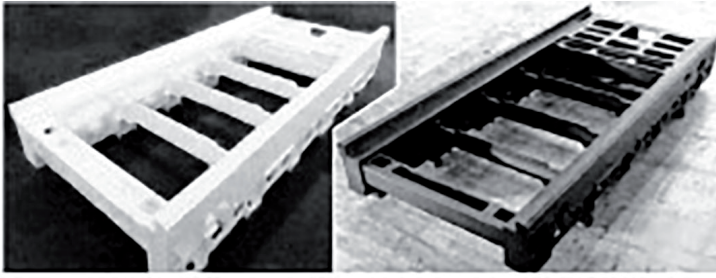
До недоліків металевих конструкцій відноситься низька корозійностійкість та вогнестійкість. Ці недоліки іноді вимагають застосування спеціальних корозійностійких сталей, більш стійких до корозії ВЧ та спеціальних захисних покриттів, що оберігають їх від корозії, навіть при відносно високих (понад 400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

Значні і не достатньо 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 монтажу конкретної споруди) виготовити металеві вироби. Цю технологію використовує в своїх ливарних цехах, удосконалює і впроваджує у виробництво в Україні і за її межами Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України (ФТІМС НАН України). 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. Також триває розробка нових технологій лиття за 3D-друкованими легковагими моделями у складі ЛГМ-процесу. Ряд прикладів каркасних і фасонних несучих металоконструкцій, для виливання яких вигідно застосувати ЛГМ, та моделей із ППС показано на рис. 2.

Ливарне виробництво, як один з найдавніших видів металообробки, завдяки використанню ЛГМ-процесу отримує можливості істотного зниження металоємності виробів. Легкість обробки ППС з густиною $\sim 25 \text{ кг/м}^3$ і з удосконаленням та здешевленням 3D-фрезерів дозволяє, вирізати разові ливарні моделі (дрібних серій) з плит ППС за програмою комп'ютера і кресленням на екрані монітора, а високопродуктивне обладнання, зокрема, з галузі пакувальної промисловості – отримувати по прес-формах великі серії моделей для ЛГМ, в тому числі на верстатах типу пласт-автомата. При цьому монтаж (склеювання) моделей з деталей дозволяє відтворювати каркасно-комірчасті виливки довільної форми, що недоступно іншим традиційним способам лиття. Лише 3D-друк металовиробів чи в перспективі моделей для ЛГМ, можуть «конкурувати» за рівнем складності комірчастих конструкцій з сучасною технологією ЛГМ, але вони поки значно здорожчують литво чи недостатньо освоєні.

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) за зібраними (склеєними) каркасними чи ґратчастими моделями з деталей аналогічно до сучасного монтування каркасів металевих будівель. А сухий пісок при виготовленні контейнерної ливарної форми з вібрацією її контейнера з моделлю обтікає модель як плинне технологічне середовище, утворюючи таку піщану форму для заливання в неї металу, як правило, піддаючи при цьому форму вакуумуванню.

Такий процес формування у плинному вогнетривкому середовищі разових моделей з ППС при ЛГМ значно спрощує виливання з металу легковагих тонкостінних каркасних деталей, пошук методів оптимізації конструкцій яких призвів до досліджень зі створенням конструкцій виливків, подібних до конструкторських рішень, аналогі 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. Вчені вирізняють глобальну еволюцію Всесвіту, геологічну еволюцію й еволюцію живої природи. При



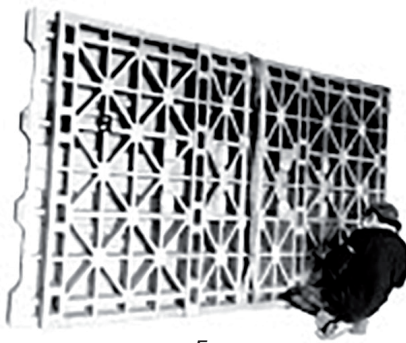
а



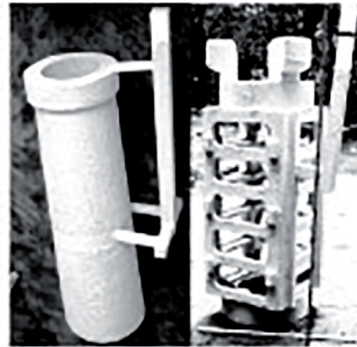
б



в



г



д



е



ж

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

цьому конструкціям природи характерні такі властивості, як повторюваність в різних напрямках однакових елементів, комбінаторність (фрактальність) і пористість.

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 металоконструкції 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 крізь 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 наведено в таблиці.

Таблиця

**Структура розділів досліджень з оптимізації
литих конструкцій, їх моделей**

Дослідження методів металоаощадження і розробка конструкцій легковагих виливків				
1	2	3	4	5
Аналіз фрактальних ресурсо-ефективних конструкцій природи для наслідування в металевих виробках	Створення концепцій конструювання при формовці в плинному піску комірчастих моделей з повторюваними елементами	Конструювання за аналогами і методами		
		За аналогами будови таких структур: кристали, аморфне тіло, квазікристали, алмаз, вуглецеві нанотрубки	За аналогами з деякими біо-структурами: філлотаксис в ботаніці, дендрити, модекула ДНК	З використанням теорії мінімальних поверхонь, структури піни і гіроїда, метод висячого ланцюга для оболонкових конструкцій

В процесі проектування литих просторових металовиробів за аналогами будови деяких структур живої природи і в результаті аналізу конфігурацій просторових, найчастіше ажурних, каркасних конструкцій природи для нових металовиробів, зокрема, запропоновано модельні конструкції для ЛГМ збирати за принципом ботанічного явища філлотаксиса (phyllotaxis, буквально – листорозміщення) [6]. Згідно з цією ознакою листя і пагони розміщується на стеблі в строго заданій послідовності. Спіральний філлотаксис листків на стеблі характеризується однаковим кутом між сусідніми листками, близьким до значення $360^\circ/2,618 = 137^\circ30'28''$, де 2,618 – квадрат числа Фі (золотий переріз, а вказаний кут називають кутом Фібоначчі). Це створює несучу структуру, при якій жоден листок не затінює інших. При цьому природні, створені з повторюваних елементів симетричні структури, в яких простежуються числові закономірності, підтверджують слова В. І. Вернадського про «неєвклідову» геометрію живої природи [7], а серед причин спіральності філлотаксису називають відображення спіральної структури ДНК.

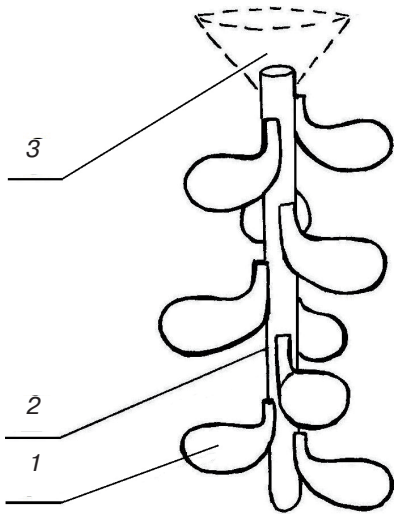


Рис. 3. Модель, що побудована за принципом філлотаксису [6]: 1 – елемент моделі чи модель окремого виливка; 2 – стояк (ливниковий колектор); 3 – воронка для заливання металу

На рис. 3 показано приклад моделі у вигляді окремих елементів 1 (чи моделей окремих деталей), закріплених на стояку 2 (колекторі). Стояк 2 і елементи 1 виконують з ППС. Модель може бути конструкцією, яку в литому виді використовують цілою, наприклад, як армувальну чи несучу, або бути блоком з окремих закріплених на стояку деталей, які після виливання з металу відділяють від стояка. Воронку 3 стояка зображено пунктиром.

Подібно до утворення в просторі листової мозаїки, покликаної уловлювати рослиною якомога більше світла одночасно з оптимальним навантаженням на центральну опору, найбільш раціональне розміщення модельних елементів 1, як в цілісній просторовій конструкції, так і деталей на колекторі 2, дозволяє рівномірно розташувати елементи моделі у вакуумованому піску форми [6, 8], а несучі елементи в просторі навколо осі стояка, до якого вони кріпляться. Таке розташування оптимізує режим евакуації з форми продуктів газифікації моделей та газовий тиск, як в піску, так і над дзеркалом металу, під час його заповнення форми, зменшить вірогідність утворення дефектів

на отриманому виливкові. Охолодження рівномірно розміщених в об'ємі піску виливків або їх частин також сприяє підвищенню стабільності їх властивостей.

Дослідження по оптимізації литих конструкцій з огляду ресурсоощадності неминуче призводять до одного з висновків про доцільність копіювання прикладів «підкорення простору» конструкціями природи (включаючи структури мікросвіту) з надзвичайно високою стабільністю їх просторово-часових характеристик. При створенні об'ємних конструкцій за аналогією з біологічними, що поширюються в просторі, звернули увагу на конструкції гілок дерев. Вони розвиваються від товстих до тонких розгалужень [9]. Очевидно, така зміна перерізу також більш сприятлива для течії металу, ніж рівностінні конструкції. На рис. 4, а показано ескіз литої деревовидної (дендритної) металоконструкції, що складається із ствола 1 і гілок 2 [10].

При використанні стінок ливарної контейнерної форми як холодильника для прискорення кристалізації виливків гілки 2 доцільно розташувати перпендикулярно поверхням 3 стінок форми чи виливниці (показано її контури), тобто назустріч найбільш вірогідному напрямку тепловідводу і зростання кристалів виливка. Аналогічно ростуть дендрити перпендикулярно поверхні стінки виливниці після заливання в неї металевого розплаву. Також пропонується враховувати конструктивні особливості і розташування гілок для несучих металоконструкцій чи для армування бетонних виробів, облаштувань заземлення тощо, які прийнятні для будівництва.

Виготовлення деревовидної конструкції способом ЛГМ полягає в заливанні розплавленого металу крізь воронку 4. Елементи моделі з ППС – гілки і трубчасті ділянки стовбура можна збирати (склеювати) на направляючому штирі (пунктиром показані лінії стику). Останнім часом при демонструванні можливостей 3D-друку з металу в відкритих джерелах Інтернету наводять приклад виготовлення деревовидних конструкцій, одну з яких показано на рис. 4, б. Характерно, що виливання таких конструкцій отримують тонкими гілками донизу, а при друкуванні вони спрямовані вверх.

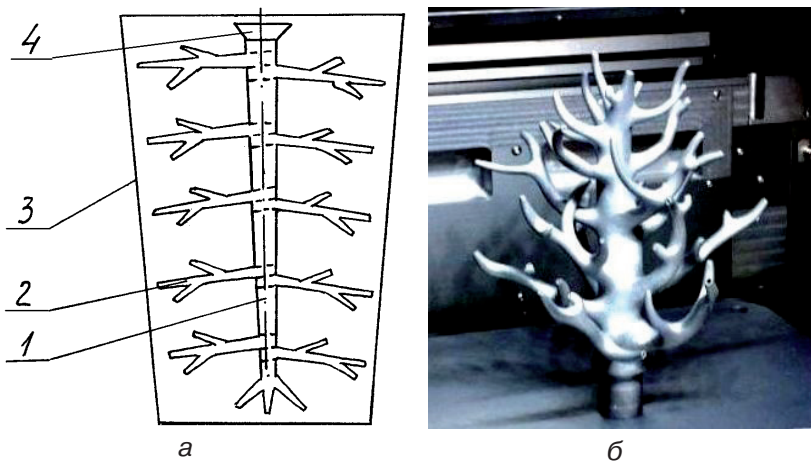


Рис. 4. Лита металева деревовидна конструкція (а): 1 – стовбур; 2 – гілки; 3 – контури стінок ливарної контейнерної форми; 4 – залишок воронки; а також приклад подібної конструкції, виконаної з металу 3D-друком (б)

При проектуванні деревовидних литих металоконструкцій враховували закономірності будови дерев, що простежуються в живій природі [10]. Найважливішою вимогою до таких побудов є міцність, в цьому плані конструкція дерева «відшліфована» еволюційним відбором і є бездоганною. Як вказано в монографії Бенуа Мандельброта [9], Леонардо да Вінчі емпіричним шляхом визначив таке співвідношення товщин ствола і усіх гілок дерева на будь-якій висоті, що діаметри ствола і гілок d до галузнення і діаметри d_1 , d_2 після розгалуження задовольняють співвідношенню: $d^\Delta = d_1^\Delta + d_2^\Delta$, де діаметричний показник $\Delta = 2$. У цій же книзі вказано, що це підтверджено на практиці, крім того, показник «дерева» кровоносних артерій ссавців близький до $\Delta = 2,7$, а для «дерева» бронхів $\Delta = 3$. З огляду гідродинаміки система каналів при $\Delta = 3$ має мінімальний опір, це значення найкраще, що досягається як цілеспрямованим конструюванням, так і селективною еволюцією. Звідси, якщо важливі властивості міцності конструкції, то показник $\Delta = 2$, якщо важлива умова заповнення розплавленим металом ливарної форми, то близьким до 3, що також враховують в ливарній гідравліці при конструюванні розгалужених систем ливників, трубопроводів транспортування рідини чи каналізації.

Також дослідним шляхом встановлено [9], що вага гілки пропорційна її діаметру, піднесеному до ступеня $M = 2,5$, а також може залежати від значення Δ у вигляді $M = 2 + \Delta/3$. Значення величин $M = 2,5$ та M при розрахунку за останнім виразом при підстановці $\Delta = 2$ відрізнятимуться менше, ніж на 6,7 %, що допустимо для технічних розрахунків. Можна користуватися обома значеннями для оцінки ваги гілки з модельного матеріалу або металу з поправками на їх щільність відносно щільності дерева), при $2 < \Delta \leq 3$ підставляти конкретне значення Δ у вираз для M .

Крім того, можна застосовувати литу металоконструкцію внутрішнього холодильника у вигляді дендроїда при литті масивних виливків або зливків, яка може бути з однакового або різного металу з тим, що заливається у форму. При твердінні металу таких зливків зростаючі кристали від стінки виливниці конкурують з дендритами, що йдуть їм назустріч від гілок холодильника, що дає подрібнення зерна зливка рівномірно по усьому об'єму.

Лита деревовидна несуча конструкція чи для армування (наприклад, бетону) для опору, спрямованому проти навантаження перпендикулярно осі ствола, рекомендується із стволом поперечного перерізу у формі еліпса при відношенні діаметрів еліпса по напрямку навантаження і уперек її як 1,26 до 1,0. Це відповідає

вимірам стволів дерев, на які переважаючий вітер дув перпендикулярно в однорідній лісовій смузі [10].

Такі просторові литі металоконструкції, аналоги яких узяті з ботаніки, не складні для конструювання. Для лиття методом ЛГМ в ливарних цехах модель можна змонтувати по елементах, що повторюються. Просторові деревовидні виливки наближаються за виглядом до комірчастих, які часто називають «матеріалами майбутнього» [11–13].

Створення технічних пристроїв, в яких ідея і основні елементи запозичуються з живої природи, відноситься до сфери досліджень підрозділу біоніки – біоміметики (bios – життя, і mimesis – наслідування). Біоніку іноді називають «синтезом біології і техніки». У конструкціях живої природи нерідко використовуються спіральні елементи [6, 9, 12] з наявністю таких закономірностей, як повторюваність і фрактальність форм природи. Відоме використання вказаних властивостей в архітектурних будовах, в яких одним з конструктивних стилеутворюючих елементів служить спіральна конструкція моделі ДНК, що запропонована Уотсоном-Кріком і відноситься до «морфологічних стандартів структур різних систем природи» [8, 11]. У ряді рукотворних прикладів запозичення цієї конструкції у будівництві є автомобільний музей Mercedes-Benz у Штутгарті, Німеччина (проект UN Studio van Berkel & Bos). У ньому експонати розташовані на двох спірально-видних пандусах, що імітують ланцюг ДНК: вони в'ються, перетинаючи один одного, крізь вісім рівнів будівлі. Архітектори називають цю будівлю «ДНК у бетоні» [11].

Каркасне будівництво показало, що спіральний каркас сітчастої оболонки будівлі значно легший традиційного з прямих направляючих, його важко зламати, бо він подібний до просторової пружини і відповідає на деформуючі навантаження оборотним відновленням форми, що важливо для будов чи споруд, що функціонують у сейсмічно нестабільних чи екстремальних умовах, а також служать для захисту військових чи цивільних об'єктів. Закономірності формоутворення ДНК як конструктивного стилеутворюючого елементу, що відібраний еволюцією і несе різноманітність форм і функцій органічних істот, запропоновано копіювати в литому металі для отримання просторових каркасних конструкцій, арматури для композиційних матеріалів, армованих виливків тощо [12]. При конструюванні ливарної моделі повний виток подвійної спіралі з кроком λ розглядали як осередок, а комірчасті матеріали збирали з елементів, що повторюються, при виготовленні моделі з ППС (рис. 5).

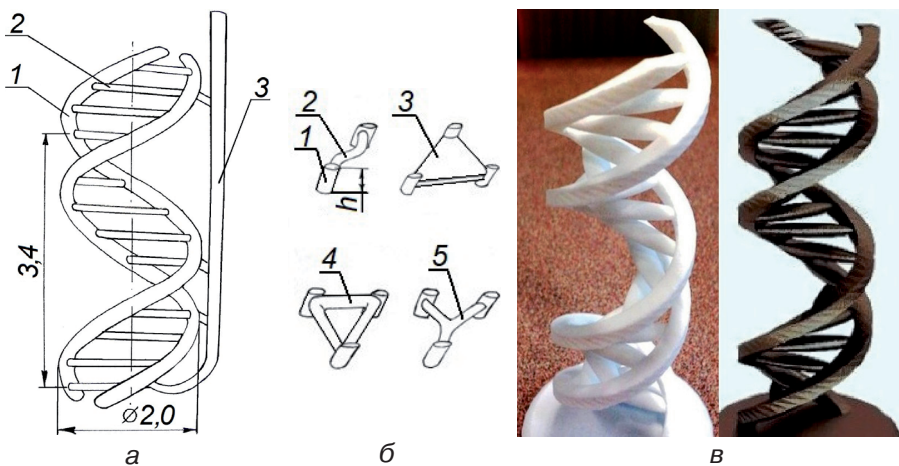


Рис 5. Модель з ППС, ескіз конструкції (а): 1 – основи виті; 2 – переклади; 3 – ливникова система; варіанти виконання перекладин (б): 1 – стовпчики; 2 – переклади; 3 – трикутна пластина; 4 – перегородки багатокутника; 5 – потрійні розпірки; приклади моделі ДНК і виливка без ливникової системи (в)

Появу інформації про виявлення трьохспіральної ДНК врахували у варіантах конструкції моделі. Модель з пропорціями макету молекули ДНК [11, 12] (рис. 5, а) виконана у формі гвинтових сходів з двома остовами 1, які в'ються разом і закручені вправо у вигляді подвійної спіралі, і однаковими перекладами (перегородками) 2, розташованими перпендикулярно осі подвійної спіралі. Подвійна спіраль моделі має діаметр $d = 2$, крок витка $\lambda = 3,4$. Співвідношення цих величин: $l = 1,7d$. Число однакових перекладин на повний виток – 10, кожна повернена відносно попередньої на 36° і знаходиться від неї на відстані $0,1l$. Форму спіралі утримує або фіксує модель ливникової системи 3, прикріплена за допомогою пайки або клею до остовів цієї подвійної спіралі.

На рис. 5, б показано чотири приклади складових («поліпшених») елементів, що повторюються, які можна використовувати для складання (наросування) моделі, а рис. 5, в – загальний вигляд моделі і металевого виливка. Такі елементи мають стовпчики 1 висотою h , як частину осі подвійної спіралі. Із таких стовпчиків 1 (рис. 5, б) складають остов, вони закручені на кут $\alpha = 360^\circ \cdot h/l$. Перекладини 2 можуть бути S-подібної форми, як найбільш сприятливої для релаксації усадкових напружень виливка чи протидії зовнішнім напруженням, а також у виді три- або багатокутних пластин 3, перегородок 4 по периметру багатокутника або з трипроменевих розпірок 5 тощо. Останні три елементи служать для монтажу триспіральної моделі.

Деталі, що повторюються, для конкретної моделі можуть бути одного виду або між деталями 1 (рис. 5, б) можуть прокладатися прокладки, що чергують з елементами з перекладами. Елементи можуть бути зібрані склеюванням, пайкою устик, мати з'єднання «штир-паз» або інші, при цьому можуть застосовуватися шаблони, що частково охоплюють зовні стик стовпчиків 1 (рис. 5, б). Елементи можуть набирати нанизуванням на гнучких осях (нитка, дрiт, шпагат та ін.), як несучих оправках по отворах в таких стовпчиках. Потім їх закручують в лiподвійну (потрійну) спіраль, форму якої утримує або фіксує в зібраній моделі при транспортних і формувальних операціях модель ливникової системи, що жорстко прикріплена до цієї спіралі. Для зручності складання збірної моделі на гнучкій осі також рекомендовано варіант, коли елементи мають бічні прорізи, і в ці прорізи вставлена стрічка з синтетичної плівки, нитка або дрiт в якості гнучкої осі, що несе або направляє. Якщо стовпчики 1 (рис. 5, б) нанизують на гнучкий каркас у вигляді спіральної чи зигзагоподібної пружини, або на об'ємний жорсткий заздалегідь зігнутий каркас, то каркас служить внутрішньою арматурою, що утримує форму моделі у зборі і також служить холодильником для виливка.

Запропоновано варіанти зміни для виливків створеного природою "стандартного" прообразу конструкції ДНК, при цьому перекладини можуть бути у вигляді багатопроменевих розпірок, багатокутних пластин або перегородок по периметру багатокутника. Перегородки спіралей можна розташовувати під довільним кутом до осі спіралі і з довільним відношенням l/d . Число спіральних остовів може відповідати кількості променів розпірок або кутів багатокутників при довільній кількості перекладин на повний виток. Також елементи моделі можуть виготовлятися з різних матеріалів для разових ливарних моделей, а їх конструкції складатися з елементів з розмірами від декількох до сотень міліметрів. Отримані виливки будуть у вигляді металевих модулів, з яких можна монтувати каркасні конструкції для будівництва.

Досить нескладна конструкція елементів разових моделей дозволяє отримувати їх на напівавтоматах, що спростить проектування і виготовлення каркасних комірчастих матеріалів і деталей, які зазвичай називають матеріалами майбутнього. Закладена в конструкції моделі можливість закручування в спіраль або складання в спіраль спрощує лиття нових полегшених, механічно і естетично досконалих спіралевидних конструкцій. Такі ливарні моделі, за конструкцією подібні до єдиної для усіх клітинних організмів базової матриці-прототипу, узятій з біофізики наносвіту у вигляді конструкції ДНК в якості прикладу технологічного застосування науки.

Висновки

Описані науково-технічні рішення з копіюванням конструкцій природнього походження, як приклади біонічного підходу до проектування та виготовлення литих легковагих металоконструкцій для будівництва споруд переважно модульного типу, розширюють як можливості лиття і номенклатуру литих каркасно-комірчастих конструкцій, так і потенціал використання ресурсоефективних металоконструкцій у будівництві та для інших технічних чи декоративних потреб. Комірчасті просторові металеві матеріали, отримані методом ЛГМ, розширяють існуючий спектр властивостей порівняно з компактними матеріалами та мають перспективи знайти немалий попит в швидкокомнатному будівництві. А виливання за збірними моделями з елементів спростять конструювання та дозволять налагодити випуск каркасних легковагих виробів, які нерідко відносять до «матеріалів майбутнього». Також і ЛГМ-процес за його потенціалом ще не втратив репутацію технології майбутнього, особливо корисної для таких 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. Описаний технологічний напрям 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.
- 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 Landage M. G., Kumbhar S. Lost Foam Casting technology – Review Paper. *International Journal of Innovations in Engineering Research and Technology*. 2019. P. 1–6
- 4 Centre Pompidou Construction. URL: <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 Патент 83447 Україна, МПК B22C7/00, B22C 9/00. Ливарна одноразова модель / О. Й. Шинський, В. С. Дорошенко. Опубл. 10.07.2008, Бюл. № 13
- 7 Вернадский В. И. Размышления натуралиста. Пространство и время в неживой и живой природе. М.: Наука, 1975. 220 с.
- 8 Doroshenko V. S. New Possibilities of Developing of the Lost Foam Casting Process / *Revista de Turnatorie*. 2011. Part I. № 3–4. P. 14–16. Part II. № 5–6. P. 20–22.
- 9 Mandelbrot B. B. The fractal geometry of nature. New York: Freeman and Co., 1983. 540 p.
- 10 Патент 90494 Україна, МПК B22D 7/00, B22D 23/00, B22D 25/00. Просторовий металевий виливок / О. Й. Шинський, В. С. Дорошенко. Опубл. 2010, Бюл. № 9.
- 11 Дорошенко В. С. Проблемы конструирования пространственных каркасных отливок и моделей для литья по газифицируемым моделям. *Металл и литье Украины*. 2010. № 8. С. 24–28.
- 12 Патент 81011 Україна, МПК B22C 7/02, B22C 9/04. Ливарна одноразова модель / О. Й. Шинський, В. С. Дорошенко. Опубл. 25.06.2013, Бюл. 12.

- 13 Дорошенко В. С. Воспроизведение структур природы как метод получения ресурсосберегающих металлоконструкций. *Вісник Донбаської держ. машинобудівної академії*. 2014. №1 (32). С. 43–49.

Надійшла 26.08.2022

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.
- 2 Doroshenko V. S., Yanchenko O. B. (2022) Prerequisites for production of connectors-nodes of building metal structures by casting method according to one-off models. *Suchasni tehnologiyi, materiali i konstrukciyi v budivnictvi*. Tom 32. № 1. P. 14–20. [in Ukrainian].
- 3 Landage M. G., Kumbhar S. (2019) Lost Foam Casting technology – Review Paper. *International Journal of Innovations in Engineering Research and Technology*, pp. 1–6.
- 4 Centre Pompidou Construction. URL: <http://hotcore.info/kareff-07079.html>
- 5 Design of metal structures. Ch. 1. / S. M. Tihonov, V. N. Alehin, Z. V. Belyaeva et al. M.: Izdatelstvo «Pero», 2020. 468 c. [in Russian].
- 6 Patent of Ukraine no. 83447. IPC: B22C7/00, B22C 9/00. Foundry disposable model / O. Y. Shinskij, V. S. Doroshenko. Publ. 10.07.2008, Bull. no. 13. [in Ukrainian].
- 7 Vernadsky V. I. (1975) Reflections of a naturalist. Space and time in inanimate and living nature. M.: Nauka. 220 p. [in Russian].
- 8 Doroshenko V. S. (2011) New Possibilities of Developing of the Lost Foam Casting Process / *Revista de Turnatorie. Part I*. № 3–4. P. 14–16. Part II. № 5–6. P. 20–22.
- 9 Mandelbrot B. B. (1983). The fractal geometry of nature. New York: Freeman and Co., 540 p.
- 10 Patent of Ukraine no. 90494. IPC: B22D 7/00, B22D 23/00, B22D 25/00. Spatial metal casting / O. Y. Shinskij, V. S. Doroshenko. Publ. 2010, Bull. no. 9. [in Ukrainian].
- 11 Doroshenko V. S. (2010). Problems of designing spatial frame castings and patterns for Lost Foam Casting. *Metall i lite Ukrainy*. No. 8, pp. 24–28. [in Russian].
- 12 Patent of Ukraine no. 81011. IPC: B22C 7/02, B22C 9/04. Foundry disposable model / O. Y. Shinskij, V. S. Doroshenko. Publ. 25.06.2013, Bull. no. 12. [in Ukrainian].
- 13 Doroshenko V. S. (2014). Reproduction of nature structures as a method for obtaining resource-saving metal structures. *Visnik Donbaskoyi derzh. mashinobudivnoyi akademiyi*. No. 1 (32), pp. 43–49. [in Russian].

Received 26.08.2022

O. Y. Shinsky, Dr. Sci. (Endin), Head of the Department ; e-mail: aluprt@ukr.net;
ORCID 0000-0001-6200-0709

P. B. Kaliuzhnyi, PhD (Engin.), Senior Scientist;
e-mail: kpb.ptima@gmail.com; ORCID 0000-0002-1111-4826

V. S. Doroshenko, Dr. Sci. (Endin), Leading researcher; e-mail: doro55v@gmail.com;
ORCID 0000-0002-0070-5663

Physico-technological Institute of Metals and Alloys of the NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

BIONIC APPROACH TO THE MANUFACTURE OF CAST LIGHTWEIGHT METAL STRUCTURES FOR THE CONSTRUCTION OF MODULAR STRUCTURES

Prefab modular building metal structures have several advantages, especially for reuse, compared to building structures made of concrete and wood. Analysis of the structure of the cost of such metal structures and their installation proved that the most effective way to reduce their cost is to reduce metal consumption. Unlike welded or 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. Casting of lightweight metal structures can help increase the potential for new and rapid construction. For this, the most suitable method is the Lost Foam Casting (LFC) process in vacuum molds made of loose sand. No other casting method can compete with LFC in the production of frame-bearing structures of complex geometry. Examples of the optimization of metal structures by imitating the structures of nature, in particular biological and DNA structures, as a bionic approach to the design of man-made metal products are considered. Framework and cellular spatial materials obtained by the LFC method expand the existing range of properties compared to compact materials. And the described cast materials based on analogues from the macro- and micro-world of nature and on prefab models will simplify the design and production of frame lightweight products, which are classified as "materials of the future". Ukraine receives 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 building structures. The technological direction of borrowing the structural properties of natural materials is studied not only for copying them, but also for obtaining new materials and structures with optimization for specific mechanisms or buildings, promoting the use of metal structures as an effective solution in the construction industry during the reconstruction of the country.

Keywords: building metal structures, modular structures, modeling, structures of nature, castings,