

3D-ЛИТТЯ МЕТАЛОВИРОБІВ — АДИТИВНІ ПРОЦЕСИ МАЙБУТНЬОГО

В огляді описано металеві виливки, виготовлені за допомогою 3D технологій. Способи 3D обробки матеріалів належать до адитивного методу виробництва, що характеризується ресурсозбереженням.

Каркасно-комірчасті виливки можуть наслідувати структури природи з оптимальним поєднанням матеріаломісткості, міцності і привабливого зовнішнього вигляду.

3D-технології розширюють наявний спектр металопродукції.

Серед нових ливарних процесів в Інституті ФТІМС НАН України запатентовано 3D-технології формування піщаних виробів шляхом деформування зі сипких матеріалів, а також отримання піщаних оболонкових форм за розовими моделями.



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

Застосування у промисловості 3D-друку пов'язують з третьою промисловою революцією, яка відзначатиметься широким освоєнням адитивного виробництва [1], останній термін згадується як синонім 3D друку. Застосування 3D принтерів, перш за все, дозволить знизити техногенне навантаження на навколишнє середовище, економити до 90% вихідного матеріалу на відміну від сучасного “субтрактивного виробництва” [2], яке передбачає розрізування матеріалів на частини, підбір відповідних елементів та їхні з'єднання, на чому базується теперішнє традиційне виробництво. Якщо сьогодні принцип виробництва деталей полягає переважно у видаленні з заготовки “зайвого” матеріалу, то адитивне виробництво (“add” — “додавати”) використовує інший принцип створення об'єктів — пошаровий. 3D-принтери вирощують об'єкт з нуля, додаючи до нього дрібні порції матеріалу, формувальні шари, тому цей процес і зветься адитивним.

Третя промислова революція, яка вже розпочалась, спричинить у майбутньому світове падіння попиту на чорні метали, залишаючи лише конкурентні ресурсозберігаючі й екологічно безпечні виробництва [2]. Основи нової індустріальної парадигми, яка містить адитивне виробництво, будуть сформовані впродовж наступних 20 років у рамках сучасної індустріальної моделі [2]. З розповсюдженням нової технології 3D, друк індивідуалізованих промислових продуктів на місці їхнього використання скоротить витрати логістики і споживання енергії [1]. Одним із лідерів таких новацій є американський виробник автомобілів Tesla, керівника якого вже називають новим **Генрі Фордом** світового автопрому. Нещодавно NASA надрукувало з металу методом лазерного спікання ракетний інжектор, причому тепер він складається з 2 деталей, а не з 164 (!), як раніше. Вже друкують зброю з металу (така деталь показана нижче), будинки.

Інформація про виставку EuroMold 2014

Сьогодні все частіше розсилка новин із виставок, ливарних і машинобудівних журналів і сайтів містить інформацію про 3D-технології для ливарних процесів. Зокрема, в Франкфурті наприкінці листопада 2014 р. пройшла промислова виставка EuroMold 2014 — одна з найвизначніших у світі щорічних подій, які представляють сучасні виробничі технології: як традиційні, так і адитивні — 3D-друк [3]. На виставці були представлені обладнання й інструменти для виливання і штампування деталей, металообробки; CAD/CAM/CAE/PDM-рішення; пристрої для швидкого прототипування й адитивного виробництва. З кожним роком павільйон 3D-друку на виставці наближається за розмірами до основного павільйону “MoldMaking/Tooling”, об'єднуючи запити представників автомобільної, машинобудівної, електронної, медичної, аерокосмічної та інших галузей промисловості, що є показником затребуваності й швидкого розвитку адитивних технологій.

Найбільше зацікавив стенд “3D Systems” (США). Ця компанія була заснована в 1986 р. **Чарльзом У. Галлом** (Charles W. Hull) для промислового просування свого винаходу — метода й апарата для стереолітографії (Stereolithography, SLA — адитивне виробництво моделей, прототипів і готових виробів з рідких фотополімерів). Сьогодні вона є одним з світових лідерів серед розробників і постачальників

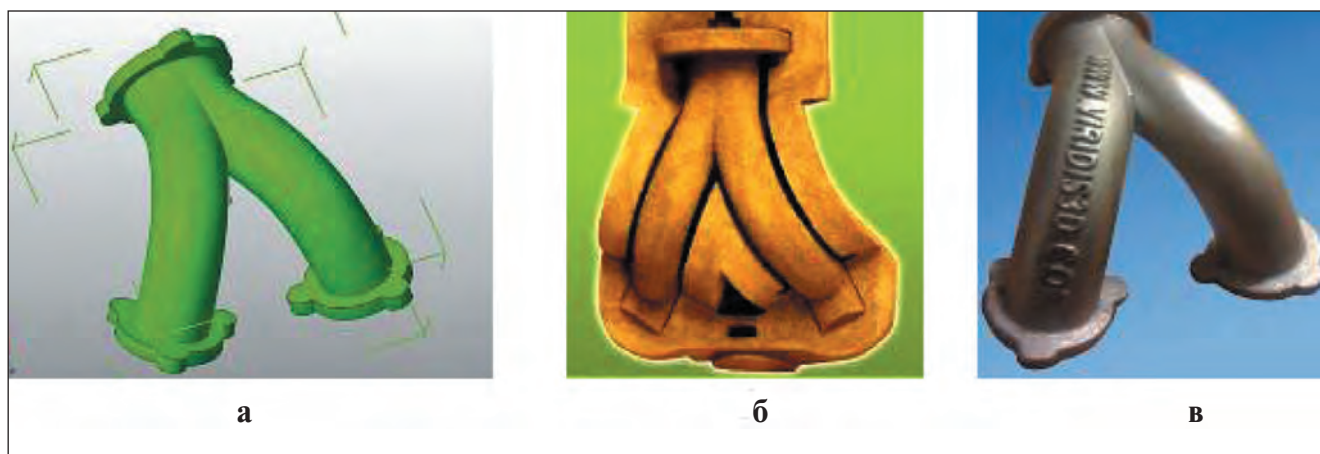


Рис. 1. Технологічний маршрут від файлу деталі на моніторі комп'ютера (а), до віддрукованої на принтері піщаної форми (б) і готового виливка (в) [6]

технології адитивного виробництва. На EuroMold 2014 компанія привезла понад десяток приладів, які створюють вироби з полімерів металів. Наприклад, ProX 400 — для роботи з металами і сплавами (включаючи сталь, алюміній, титан, кобальт-хромовий сплав), який дозволяє виробляти великі деталі: розміри литва досягають 500—500—500 мм.

Ще один лідер на ринку 3D-принтерів, компанія EOS привезла на EuroMold промислову установку EOS M400 для широкого спектра металів і сплавів (область побудови 400—400—400 мм). Принтер працює на основі технології DMLS (Direct Metal Laser Sintering, пряме лазерне спікання металів), розробленої EOS. Продукт спільного проекту EOS і компанії Cooksongold (провідний світовий постачальник дорогоцінних металів для ювелірних виробів і годинників) представлений DMLS-принтером Precious M080. Cooksongold розробила порошки з золота 750 проби, які застосовуються в Precious M080 для створення складних, деталізованих ювелірних виробів, деякі з них будуть показані нижче на рис. 6.

Учасники EuroMold намагалися максимально наочно показати, як адитивні технології застосовуються в автомобільному виробництві, авіакосмічній, оборонній промисловості, виробництві товарів широкого вжитку, медицині, архітектурі. Компанія Stratasys представила на виставці одну з найбільших у світі виробничих систем 3D-друку, Objet 1000, з використанням декількох матеріалів для швидкого створення моделей промислового розміру і прототипів у масштабі 1:1 (область побудови 1000—800—500 мм). Поруч розташовувався StreetScooter — електромобіль, екстер'єр й інтер'єр якого цілковито надруковані на цьому 3D-принтері.

Одна з найбільш швидкозростаючих компаній на ринку адитивних технологій — компанія Arcam AB (Швеція), рішення якої орієнтовані на аерокосмічний і медичний сектори, продемонструвала установки Arcam, які працюють за технологіями EBM (Electron beam melting, електронно-променева плавка) для виготовлення високоточних виробів із титану. На стенді Arcam було показано, як 3D-принтери дозволяють вирішувати такі проблеми як зменшення ваги конструктивних елементів ракети чи створення індивідуальних (для конкретної людини) ортопедичних протезів.

Хоча найпопулярнішим матеріалом для друку сьогодні залишаються поліаміди, на EuroMold 2014 відзначалося значне збільшення кількості принтерів для металів. Окрім згаданих, вони були представлені також такими компаніями як Renishaw, SolidConcepts, Realizer, SLM, Additive Industries, Concept Laser Arburg. Ще один тренд — намагання повністю автоматизувати 3D-принтери, тобто звести до

мінімуму процеси за участю людини (нове завантаження, очистка моделей і т.п.) — необхідність, спричинена запитами замовників на створення систем для серійного виробництва.

Огляд інформації про 3D процеси в ливарному виробництві

У вітчизняних цехах ці технології знайшли застосування у литті за газофікованими моделями (ЛГМ, Lost Foam Casting) при виготовленні пінопластових моделей на 3D-фрезерах за комп'ютерними програмами [4], включно з моделюванням комірчастих виливків із використанням об'ємних збірних структур з повторюваними уніфікованими елементами, пінопластові моделі яких можна виготовити на пластавтоматах або на 3D-фрезерах [5].

Низка іноземних фірм пропонує 3D-друк піщаних форм і стрижнів без будь-якого формоутворюючого оснащення безпосередньо з принтера. З цифрового файлу металевих деталей, наприклад, отриманого електронною поштою, упродовж семи годин можна виготовити виливок [6]. 3D-принтери можуть створити зокрема моделі, схожі на моделі, виготовлені з воску, швидше, ніж більшість інших процесів, наприклад, модель ротора протягом декількох годин. Окрім того, на цьому ж принтері можна виготовити ливарні піщані форми шляхом заміни матеріалів і програм. Матеріали форми мало чим відрізняються від традиційних піщаних сумішей. На рис. 1 показані етапи технологічного процесу: від зображення деталі на моніторі комп'ютера (а), друкованої на принтері піщаної форми (б) до готового виливка (в) [6].

На рис. 2 показано процес виготовлення піщаної форми. До "картриджу" з написом-назвою компанії подається піщана суміш, пошарово наноситься на підкладку на рухомому конвеєрі по всій горизонтальній площині форми і здійснюється вибіркове затвердіння за допомогою пристрою на "картриджі" [6], залишки сипучої суміші обсипаються з затверділої форми.

Процеси 3D-друку металовиробів створені завдяки інтеграції знань зі світу комп'ютерів, механіки і матеріалознавства. Розробка більшості з них почалась у середині 1990-х років. Хоча вони розвивались різними інститутами, проте їхні елементарні принципи практично однакові [7] й показані на рис. 3. При русі сопла (2) у напрямі (1) пучок проміння лазера (3) плавить частинки порошку (5) в зоні (6), як результат отримують осаджений шар (4) на підкладці (7). Оскільки деталі отримують з рідкого металу шляхом

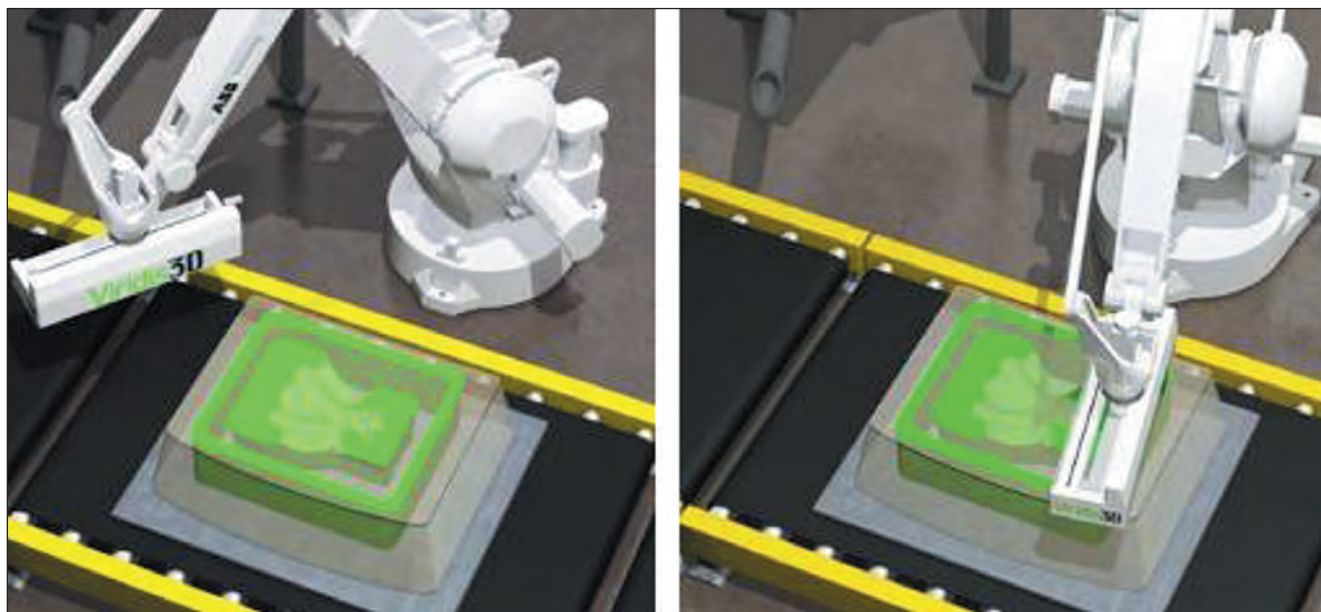


Рис. 2. Дві позиції маніпулятора в процесі друкування піщаної форми [6]

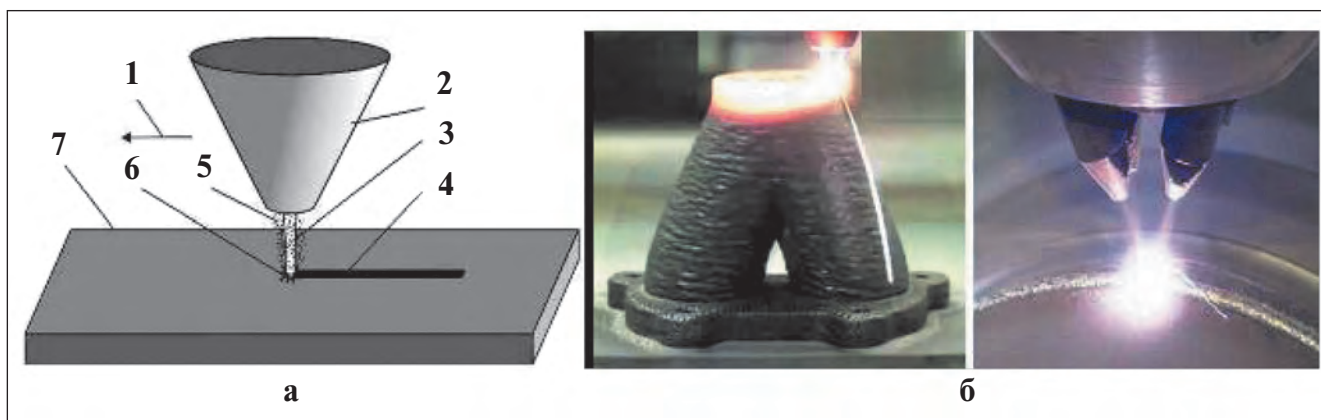


Рис. 3. Спосіб 3D-друку металовиробів: а) принципова схема [5]; 1 — напрям руху; 2 — сопло осаджувача; 3 — пучок променів лазера; 4 — осаджений шар; 5 — частинки порошку; 6 — зона розплаву; 7 — підкладка; б) — приклади виконання

розплавлення його і пошарового нанесення на підкладку, де він твердне, то деталь має усі ознаки виливка. При цьому метал плавлять не в печі, а на підкладці (рідше в потоці теплоносія) з його подальшим затвердінням і охолодженням, як правило, в захисному газовому середовищі за наявності більшості явищ і операцій, які властиві ливарно-металургійним процесам.

Отримані таким чином деталі в статичних умовах мають механічні властивості не гірші, ніж ковальсько-пресові заготовки. Але через тривалий час виготовлення можуть мати нерівномірну макроструктуру, що може стати причиною появи утомних тріщин.

На сьогодні вартість установок для 3D-друку металовиробів, які працюють за комп'ютерними програмами з моделюванням фазового переходу металу, зі створенням захисної атмосфери, режимів пересування, контролю розмірів заготовки і т. п. функціями, становить мільйони доларів США, і поки що їх використання для вітчизняного машинобудування проблематичне.

Однак, у цьому огляді пропонується розглянути зовнішній вигляд конструкцій отриманих виливків, галерея яких постійно поповнюється з відкритих джерел Інтернету, новинних розсилок технічних журналів і виставок. З позиції теперішніх традиційних ливарних процесів більшість таких металовиливків є шедеврами ливарної майстерності. Ливарники і конструктори, маючи інформацію про такі

нові конструкції, оптимізовані комп'ютером і виготовлені за його допомогою, будуть знати, з чим їм доведеться конкурувати. Багато конструкцій 3D-виливків, які отримані без формотворної оснастки, ухилив, надливів і з мінімальними припусками, оптимізовані комп'ютерними програмами для пошуку конфігурації з мінімальною масою, енергією (чи в цілому вартістю) при виконанні вимог службового призначення.

Так, на рис. 4 наведено приклади різних деталей типу кронштейнів, більшість з яких монтують в рухомих конструкціях. Причому перші чотири деталі верхнього ряду представляють варіанти однієї деталі, дві з яких зі вставками, які усуваються і які використовуються як підкладки для нанесення стельових стінок цих деталей, далі на трьох деталях (по діагоналі) видно, як традиційна монолітна конструкція перетворюється у витончені каркасно-комірчасті версії.

У багатьох випадках поєднання граничних можливостей процесу лиття й оптимізації конструкцій виливків з урахуванням ресурсозбереження приводить до того, що ці конструкції подібні до тих, які спостерігаються у живій і неживій природі, включно з моделями будови структур органічних і неорганічних речовин. Очевидно, запропоновані комп'ютером "рішення" багато в чому наближаються до створених природою конструкцій, які вирізняються високою енергоефективністю [5], включно з такими харак-



Рис. 4. Варіанти 3D друку різноманітних кронштейнів



Рис. 5. Приклади лопатних деталей



Рис.6. Каркасно-комірчасті металовироби



Рис. 7. 3D металовироби різнопланового призначення

терними властивостями, як повторюваність у різних напрямках однакових елементів, комірчастість і можливість комбінування (фрактальність).

Присутня значна кількість прикладів 3D-друку деталей лопатей, показаних на рис. 5, які часто вимагають високої точності при виготовленні складної гравюри лопаті. Формоутворююча металева оснастка для традиційних способів лиття часто за вартістю перевищує разовий 3D-друк таких виливків.

Застосування в технічних пристроях принципів організації, властивостей, функцій і структур живої природи вивчається біонікою. Однак, в основу конструювання, тобто створення прототипу уявного чи можливого об'єкта, можуть бути покладені не тільки образ живої і неживої природи, але й вигадані, ідеальні (наприклад, математичні) моделі, які в загальному випадку не обов'язково мають виявлену відповідність будь-чому в фізичному світі [8].

Продовжують перелік прикладів конструкцій 3D виливних каркасно-комірчастих виробів деталі на рис. 6, частина з яких має декоративне призначення. Оптимізація їхньої будови призвела до того, що вони багато в чому схожі на *“технічні рішення”*, запозичені в природи, оскільки природою *“вже вирішені питання”* підкорення простору конструкціями з високою ефективністю і ресурсозбереженням, а органічні комірчасті чи *“фрактального”* вигляду конструкції відібрані тривалою еволюцією. Тепер конструктор виконує *“еволюцію виробу”* прямо на своєму комп'ютері.

Стираються грані між науковим і технічним рівнем пізнання у відображенні ідей, ймовірно, ще батька кібернетики *Н. Вінера* в його книзі *“Кібернетика, чи управління і зв'язок у тварині і машині”* (1948). Сьогодні комп'ютерне моделювання допомагає не тільки відобразити наші уявлення про будову навколишнього світу, але й запозичити у нього деякі деталі для власних рукотворних конструкцій. Коли ми говоримо про будову речовини, то маємо на увазі, що основу наших знань з хімії, фізики, матеріалознавства, та більшості галузей наук про Землю складають, перш за все, знання про структуру речовини, яка багато в чому визначає її властивості. Тому вчені ставлять завдання навчитися відкривати нові матеріали шляхом розрахунку їхньої структури на комп'ютері [9], а конструктори — у той самий спосіб проектувати металопродукції, зокрема, для машинобудування [8].

Стійка кристалічна структура характеризується найнижчою енергією. Вчені це завдання розв'язують шляхом дослідження усіх можливих взаємних положень атомів, розраховуючи енергію для кожного з них і, таким чином, визначаючи найнижчу енергію й оптимальну структуру. Це завдання не має прямого розв'язку, але його можна розв'язати, не застосовуючи повне перебирання, а спрямовуючи розрахунок за допомогою самонавчання до *“глобального мінімуму”* енергії. Таким чином, розроблений підхід, ґрунтується на ідеях еволюції, який є багатовимірною мінімізацією для пошуку будь-яких термодинамічно стійких станів [9]. Створення методів аналізу цих даних призвело кристалографів до сфери багатовимірної геометрії.

Якщо створені програми проектування структур нових матеріалів з атомів, то, копіюючи атомні решітки, як показано в [5], можна отримати їхні великорозмірні аналоги у вигляді решітчастих просторових виливків 3D-методами як удосконалення способів лиття комірчастих металовиробів. Розширюючи асортимент конструкцій таких виливків, ливарники розвивають новий напрям лиття стільникових, об'ємно-комірчастих, скелетно-решітчастих металовиробів, котрі мають потенціал для застосування, як просторові конструкції з полегшеними несучими, армувальними, ізолюючими, огорожувальними, демпферними наванта-

женнями, які здатні поглинати, або пропускати через свої стільники потік речовини чи енергії.

Прикладів 3D-вливовок настільки багато у вільному доступі на Інтернет-сайтах, що навести їх в одній статті неможливо. Для доповнення огляду на рис. 7 показані приклади, які не увійшли до попередніх груп: зліва-направо, художні виливки, деталі стрілецької зброї і низка корпусних деталей. В іноземній технічній літературі також описані виливки сопел спеціального призначення, теплообмінників, показана велика кількість ювелірних виливків, зразків біжутерії, декоративно-художніх виробів, деталей протезів, включно з щелепно-зубними, та інших.

Розглянуті конструкції поглиблюють наше розуміння можливостей лиття. Низка зразків на виставках наведена у вигляді переведення отримуваних в піщаних формах серійних виливків на 3D-лиття при *“перетворенні”* традиційних монолітних конструкцій на витончені каркасно-комірчасті як наочні приклади металозбереження і поліпшення зовнішнього вигляду. Відзначається екологічний аспект і високий рівень охорони (культури) праці такого виробництва виливка в автоматичному режимі в закритому об'ємі камери 3D-принтера. Відсутність ливарних форм і стрижнів позбавляє виробничий процес виділення шкідливих речовин, характерних для ливарних цехів.

Багато з прикладів на рис. 6 виглядають досить фантастично для сучасного виробництва, хоча вітчизняними вченими вже описана і запатентована низка комірчато-каркасних виливків і оригінальні способи їх лиття й моделювання [5, 8]. Комірчасті виливки можуть наслідувати структури природи, створюватися уявою людини, комп'ютерним проектуванням за математичними формулами, візуальними зображеннями чи кресленнями на моніторі комп'ютера, за встановленими програмними вимогами або задаватися іншими умовами, наприклад, методом *“доповненої реальності”* (*augmented reality*). Останній термін у вітчизняній патентній літературі визначений у роботі [10]. Закладаючи в комп'ютер програми, наприклад, аналогів відомих конструкцій із світу природи (як бібліотеку аналітичних моделей, галерею зображень і т.п.), можна розвивати технічні системи за її законами. Ці закони можна пізнати й використати для усвідомлених — без численних *“пустих”* проб — рішень конструкторських завдань, таких як конструювання виливків, перетворивши створення нових технічних конструкцій у точну науку.

Коли ми бачимо в фантастичних фільмах роботів-трансформерів чи андроїдів, космічні кораблі чи станції, машини і зброю, по-перше, поглядом інженера можна помітити, як багато в цих конструкціях виливків. А по-друге, відзначаємо, що вже сьогодні виробництво багатьох таких виливків можливе сучасними ливарними процесами та 3D-технологіями, які значно розширюють наявний спектр металопродукції, яка виробляється.

Відзначимо також, серед нових ливарних процесів у Фізико-технологічному інституті металів і сплавів НАН України запатентовані технології 3D-деформування виробів із сипких матеріалів [11, 12], а також спосіб 3D-формовки піщаних виробів при отриманні багат шарових оболонкових ливарних форм, включно з формовкою за разовими моделями [11]. Ці роботи проводяться під науковим керівництвом проф. *О.Й. Шинського* за відомою темою *“Розробка наукових і технологічних основ зі створення ливарних конструкцій із залізобетонних і кольорових сплавів, оптимальних процесів їхнього отримання і автоматизованих методів проектування”*.

Такі роботи пов'язані з тим, що комп'ютерні програми відомих іноземних компаній: MagmaSoft (Німеччина), Pro Cast (США, Франція), Полігон (Росія), SolidCast

(США) та ін., якими можуть користуватися вітчизняні ливарники, створені для оцінки гідродинамічних і теплообмінних процесів у ливарній формі без оптимізації литих конструкцій і сприймають вилівок уже як готовий попередньо створений конструктором продукт. До того ж, ці програми не адаптовані до ливарних процесів точних (так званих, спеціальних) методів лиття, створених у ФТІМС, таких як ЛГМ, лиття за розчинними, випалювальними, а також льодовими моделями, при цьому з подаванням розплавленого металу під надлишковим тиском чи з його гравітаційною заливкою, включно зі специфікою нероздільних форм.

Відсутня у цих програмних продуктах і можливість оцінки ливарних процесів при застосуванні низькотемпературних, оболонкових форм і отримання виливків у формах, насичених армувальною фазою з металевих і неметалевих матеріалів, які наближають виливки до виробів з композитних матеріалів.

Методи розрахунку і конструювання вилитих деталей у країнах СНД та Україні і нормативна база для їхньої реалізації (ГОСТ 26645-85 “Виливки з металів і сплавів. Допуски розмірів, маси і припуски на механічну обробку”, РТМ12-60 “Елементи конструкції литих деталей”, ОСТ 3-1284-72 “Виливки. Конструктивні елементи” та ін.) побудовані на емпіричних рівняннях з урахуванням процесів формотворення, створених ще в 60–70 рр. минулого століття, і не дозволяють реалізовувати складні конструкції з високою точністю у розмірах. ДСТ 26645, ДСТ Р 53464-2009 для вилитих деталей з габаритами 500–1500 мм при литті в піщані форми встановлює допуски значної величини, що призводить до збільшення товщини стінок виливків та їхньої маси на 50–80%, а також допуски у межах 9–11 квалітету цих ДСТ і гальмують ефективне використання надмісних сплавів (сталей, чавунів, алюмінію), оскільки зменшення товщини виливків пропорційне підвищенню міцності металу.

У будь-якому разі, при отриманні литих деталей з габаритами 500–1500 мм у піщаних формах з номінальною товщиною стінки виливка 8–20 мм при використанні сплавів з міцністю у двічі вищою, ніж для раніше застосованих сплавів, наявні допуски не стимулюють зменшення товщини стінки пропорційно міцності. Тому сучасні литі конструкції в Україні та країнах СНД перевищують за металоємністю розраховані конструкції у 1,5–2 рази, а в Західній Європі — у 1,3–1,5 рази, що спричиняє перевитрату енергоносіїв, шихтових матеріалів, трудомісткості при їх виробництві в 1,5–2,3 рази [14].

Головною ідеєю реалізації згаданої науково-технічної теми є створення основ автоматизованого конструювання литих деталей малої металоємності за рахунок поєднання технологій отримання точних литих виробів з використанням надмісних матеріалів і комп'ютерних інформаційних технологій, розроблених у ФТІМС. Це дозволить підвищити точність розмірів литих конструкцій до рівня 5–7 квалітетів (допуск 1,6–4 мм) проти традиційної при литті в піщані форми 9–11 квалітетів (6,4–12 мм) за ДСТ Р 53464-2009 (26645-85), а це, відповідно, знижує масу литих виробів у 1,5–1,8 рази.

Головною ідеєю реалізації згаданої науково-технічної теми є створення основ автоматизованого конструювання литих деталей малої металоємності за рахунок поєднання технологій отримання точних литих виробів з використанням надмісних матеріалів і комп'ютерних інформаційних технологій, розроблених у ФТІМС. Це дозволить підвищити точність розмірів литих конструкцій до рівня 5–7 квалітетів (допуск 1,6–4 мм) проти традиційної при литті в піщані форми 9–11 квалітетів (6,4–12 мм) за ДСТ Р 53464-2009 (26645-85), а це, відповідно, знижує масу литих виробів у 1,5–1,8 рази.

Висновки

Огляд процесу формовки і 3D конструкцій металевих виливків — прикладів обробки матеріалів за допомогою 3D-технологій ілюструє розвиток адитивного методу виробництва. Прогнози пов'язують такі технології з третьою промисловою революцією, яка веде до ресурсозберігаючого екологічного виробництва, технологічний крок якої часом випереджає етапи осмислення науково-практичних і науково-дослідницьких рішень. Описані можливості 3D-процесів розширюють спектр металоконструкцій, а наведені каркасно-комірчасті виливки часто наслідують структури природи з оптимальним поєднанням матеріаломісткості, міцності і привабливості зовнішнього вигляду. Технології одночасно використовують наукові методи й багаж знань як основу технологічного розвитку, та інструментарій комп'ютерного моделювання як специфічний метод наукового пізнання, стираючи грань між науковим і технічним рівнем пізнання шляхом технологізації науки. ■

Стаття-переможець конкурсу науково-популярних статей ДФФД України 2015 р.

Література

1. Рифкин Дж. Третья промышленная революция: Как горизонтальные взаимодействия меняют энергетику, экономику и мир в целом. — М.: Альпина нон-фикшн, 2014. — 410 с.
2. Данилишин Б.М. Третья промышленная революция и Украина // Новое время, 25.10.2014. — [Электрон. ресурс]. <http://nvua.net/opinion/danylyshyn/17573.html>.
3. Виставка Euro Mold 2014 у Франкфурті — демонстрація досягнень в області технологій адитивного виробництва. 08.12.2014 [Електрон. ресурс]. — <http://www.mold-ex3d.ru/events/6009>.
4. Шинский И.О., Дорошенко В.С. 3D технологии при литье по газифицируемым моделям // Металл и литье Украины. — 2009. — № 4–5. — С. 30–33.
5. Дорошенко В.С. Способы получения каркасных и ячеистых литых материалов и деталей по газифицируемым моделям // Литейное производство. — 2008. — № 9. — С. 28–32.
6. Shambley W. Prepare Your Technology Strategy for 3D Printing, Robotics, and the Cloud // Foundry Management & Technology. — [Електрон. ресурс]. <http://foundrymag.com/simulationit/prepare-your-technology-strategy-3d-printing-robotics-and-cloud>.
7. Fan Zhiqiang, Liou Frank, Numerical Modeling of the Additive Manufacturing (AM) Processes of Titanium Alloy //

In: “Titanium Alloys, Towards Achieving Enhanced Properties for Diversified Applications”, Ed. A.K.M. Nurul Amin. — Rijeka, Croatia, InTech, 2012. — Р. 3–28.

8. Дорошенко В.С. Математическое проектирование каркасно-ячеистых отливок // Литейное производство. — 2013. — № 2. — С. 9–12.

9. Oganov A.R., Lyakhov A.O., Valle M. How evolutionary crystal structure prediction works — and why // Acc. Chem. Res. — 2011. — 44. — Р. 227–237.

10. Патент Украины № 83902, МПК G06F 3/00. Способ распространения информации с применением технологий дополненной реальности / Дорошенко А.В., Дорошенко В.С. — Оубл. 2013, Бюл. 19.

11. Дорошенко В.С. Трехмерная формовка из сыпучих материалов // Литейное производство. — 2013. — № 4. — С. 8–11.

12. Патент Украины № 77595, МПК B22C 9/02. Способ изготовления изделий из сыпучего наполнителя / Шинский О.И., Дорошенко В.С. — Оубл. 2013, Бюл. 4.

13. Заявка Украины № u201410278, МПК B22C 9/02. Способ формования / Дорошенко В.С., Шинский В.О. От 19.09.2014.

14. Шинский О.И. Снижение металлоемкости литейной продукции — основа развития отрасли // Оборудование и инструмент для профессионалов. — 2011. — № 1. — С. 78–79.