УДК 681.3 / 621.74 / 339.97

В. С. Дорошенко, *д-р техн. наук, ст. наук. співроб.,*
e-mail: doro55v@gmail.com; ORCID 0000-0002-0070-5663
Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України (Київ, Україна)

ТОПОЛОГІЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ КОНСТРУКЦІЙ ВИЛИВКІВ ПРИ АДИТИВНОМУ ВИРОБНИЦТВІ З ЗАСТОСУВАННЯМ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА

Зростання складності продукції машинобудування змінює стратегію її виробництва. Оптимізація тисяч параметрів для створення конкурентоспроможних виробів сьогодні практично неможлива без використання технології цифрових двійників (ЦД), хоча сама технологія ЦД, зокрема в ливарно-металургійній галузі, все ще знаходяться на ранній стадії розвитку. Якщо для забезпечення надійності та безпеки машин і механізмів та їх металевих конструкцій необхідне значне збільшення числа випробувань, то їх швидше і дешевше робити в віртуальному просторі на стадії проектування, ніж на більш пізній стадії в металі. В огляді розглянуто деякі приклади застосування технології ЦД для проектування ливарних металевих заготовок, оптимізації їх конструкцій при виготовленні адитивним методом. Виконано огляд визначень: що таке ЦД, які технології розкривають це поняття, як застосування ЦД впливає на розвиток адитивного виробництва металовиробів. Для конструювання металопродукції відзначено такі поняття, як «біонічний дизайн» і «генеративний дизайн», що змінюють характер взаємодії людини з програмою, яка стає ефективним інструментом творчого процесу. Показано приклади комп'ютерного інжинірингу при топологічній оптимізації конструкцій металевих заготовок. Огляд ряду джерел інформації показує, що серед передових технологій ЦД є інтегратором практично всіх «наскрізних» цифрових технологій, виступає драйвером, дає передумови розвитку і дозволяє підприємствам і цілим галузям переходити на рівень сталого розвитку. Технологія ЦД має великі перспективи тому, що вона необхідна не лише для створення і експлуатації сучасного «розумного» продукту, але і для його регулярної підтримки, оновлення і постійної адаптації до нових вимог і умов з перенесенням накопичених даних і методів на створення нових машин, конструкцій і матеріалів.

Ключові слова: *металевий виливок, оптимізація конструкції, цифровий двійник, адитивне виробництво, 3D-друк, цифрова модель, топологічна оптимізація, біонічний дизайн.*

Актуальним завданням вітчизняної академічної науки, як зазначено Президією НАН України, має стати поглиблена співпраця з органами державної влади щодо технологічного розвитку національної економіки, модернізації її матеріальної та технічної бази, освоєння випуску нових видів продукції з більш високою часткою доданої вартості [1]. Одним із сучасних технологічних трендів є «цифровізація» процесів виробництва, особливості прояву якої на прикладах одержання литих металоконструкцій адитивними методами розглянуто в цій статті.

Термін «цифровий двійник» (ЦД, Digital Twin, DT) набув популярності останнім часом. Він використовується в численних публікаціях і виступах, базується на ряді технологій, що еволюціонують, зокрема, на об'єднанні інформаційних технологій з операційними процесами для створення ЦД, а також на розвитку концепцій «цифрового виробництва» і промислового «інтернету речей» (IP). Розширенню застосування ЦД в різних галузях у міру розвитку математичних моделей, що удосконалюються в описі фізичних процесів, а також у відображенні складних економічних і соціальних явищ, присвячена монографія [2], спираючись на яку, розглянемо методи ЦД для оптимізації литих металоконструкцій при адитивному

виробництві, в продовження теми статті [3] про застосування цих методів у ливарному виробництві.

Ряд можливостей, які відкривають ЦД в плані оптимізації властивостей проектованих конструкцій, не були реалізовані до недавнього часу. В першу чергу це пов'язано з тим, що далеко не всі оптимізовані конструкції можна було виготовити методами традиційних (субтрактивних) технологій, за якими цільна заготовка переводиться в задану форму шляхом видалення частини матеріалу, наприклад, за допомогою токарних, фрезерних чи багатоцільових верстатів. Можливості топологічної оптимізації існували і раніше, але, після того, як проект доходив до технологів, виявлялося, що за наявного парку обладнання оптимального виду конструкцію виготовити просто неможливо.

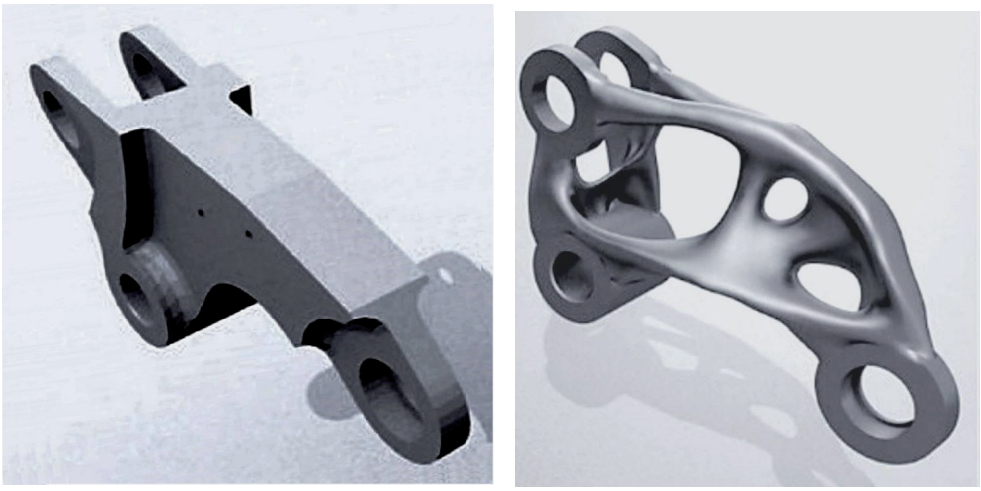
Традиційна конструкторська школа проектувала деталі і вузли з досвіду і знання технологічних можливостей обладнання для субтрактивних методів обробки, що і накладало обмеження на форму кінцевої конструкції. В принципі, для топологічної оптимізації можлива зміна традиційної геометрії на геометрію, спеціально адаптовану під певну технологію, включаючи ливарну і адитивний процес. Але саме адитивні технології роблять процес топологічної оптимізації найбільш ефективним. У міру поширення адитивних технологій ситуація змінилася – з'явилася можливість виробляти деталі практично будь-якої конструкції.

Історія розвитку адитивного виробництва налічує вже близько 40 років, проте можливість замінити відповідальні деталі в машинобудуванні на деталі, вироблені адитивними методами, з'явилася порівняно недавно. Перші 3D-принтери, засновані на технології лазерної стереолітографії (лазерне затвердіння рідких фотополімерів), з'явилися в кінці 80-х рр. минулого століття. Друк методом пошарового наплавлення мікрокрапель розплавленого термопластика вийшлов на ринок десятьма роками пізніше, приблизно в 1990 р. [2]. Ще трохи пізніше з'явилися методи 3D-друку металами, приклади яких показані в статтях [4, 5]. Технологія селективного лазерного сплаву (Selective Laser Melting, SLM) була вперше розроблена в 1995 р. в Інституті лазерних технологій ім. Фраунгофера (ILT) в Аахені (Німеччина). На сьогодні існує цілий ряд подібних технологій: селективне лазерне спікання (Selective Laser Sintering, SLS), пряме лазерне спікання металу (Direct Metal Laser Sintering, DMLS), селективне лазерне плавлення (Selective Laser Melting, SLM), пряме енергетичне осадження (Direct Energy Deposition, DED), лазерне осадження металу (Laser Metal Deposition, LMD), струминне зв'язування металу (Metal Binder Jetting, MBJ) [2], які спрощено можна порівняти з рухом вздовж поверхні нарощуваних шарів маленької плавильної ванни (різного методу нагрівання) з постійним додаванням до неї металевої шихти. Причому ця ванна виглядає як лунка рідини у верхньому нарощуваному шарі. Однак, для вирішення комплексу проблем з фізико-хімії, термодинаміки, металознавства, регулювання структуроутворення пошарово нарощеного металу тощо потрібен був час і нові рішення, про що зазначено нижче.

Сьогодні собівартість 3D-друку падає, а якість його зростає. У наші дні з'явилися приклади використання технології навіть у високо відповідальних конструкціях [2]. Можливість перепроектування з використанням топологічної оптимізації, в тому числі литих заготовок [4–7], дозволяє чисельно визначити оптимальний розподіл металу в тій чи іншій конструкції при заданих видах навантаження. Конструктор встановлює вимоги щодо необхідної жорсткості і міцності, мінімізації концентраторів напружень, що впливають на довговічність конструкції, і на підставі цих параметрів комп'ютер розраховує форму деталі, в якій враховуються всі ці фактори.

Сьогодні на ринку представлено цілий ряд програмних продуктів для проведення топологічної оптимізації [2]. Дану можливість надають CAD / CAE-пакети від Siemens, Dassault Systèmes і Autodesk. Серед недорогих рішень можна виділити продукт топологічної і топографічної оптимізації Inspire американської компанії SolidThinking, що входить в Altair Group. Програма дозволяє знаходити оптимальний дизайн різних конструкцій за показниками маси, жорсткості і міцності. Подібними системами за-

ймались виробники продуктів для параметричної оптимізації (Heeds, P7, IOSO, ANSYS Design Explorer), але поза PLM-платформ, в відриві від ЦД їх ефективність вельми обмежена. Також розроблено методи багатокритеріальної оптимізації, в рамках якої в число параметрів оптимізації, крім технічних, включаються також і вартісні показники. Такий підхід дозволяє розробникам отримати значний ряд продуктів, з яких вибирають потенційно конкурентоспроможні. Наприклад, можна паралельно виводити на ринок дорогий виріб, з високими технічними показниками, і дешевий – з більш скромними характеристиками. На рис. 1 показано деталі, спроектовані під різні технології виробництва: ліва спроектована для виготовлення стандартними методами металообробки, а форма правого виробу виготовлена методом топологічної оптимізації під адитивне виробництво [2, 8]. Права деталь при меншій вазі на 28 % має менші максимальні напруги і менші деформації під навантаженням.



а *б*

Рис. 1. Порівняння конструкції деталі, оптимізованої під традиційну металообробку (*а*) і адитивне виробництво (*б*) [8]

На рис. 2 показано результати перепроектування кронштейна рефлектора під адитивне виробництво на основі топологічної оптимізації (зліва – до, праворуч – після), виконаного з використанням «Інтегрованої системи комп'ютерного проектування та інжинірингу» (ІСКПІ, полегшений варіант системи CML-Bench) в інжиніринговім центрі CompMechLab, СПбПУ [9]. В результаті такого перепроектування конструкції на основі топологічної оптимізації вдалося знизити її масу на 43 %, порівнюючи з вихідним варіантом. Видно, що конструкція з оптимізованою формою нагадує конструкції живої природи, в яких природною еволюцією матеріал «оптимально» переміщений саме в ті зони, де він «працює» або «несе навантаження».

а *б*

Рис. 2. Порівняння конструкції рефлектора, оптимізованого під традиційну металообробку і адитивне виробництво, виконане ІЦ CompMechLab [9]

В оптимальних конструкціях (як і в об'єктах живої природи) практично немає плоских елементів і профілів постійної товщини. Крім того, топологічна оптимізація дає можливість створювати комірчасті, пористі і пінисті структури, які також поширені в живій природі, наприклад, зустрічаються в кістковій тканині. Низку подібних об'ємних каркасних та крупно-комірчастих литих металоконструкцій розроблено під керівництвом проф. О. Й. Шинського та описано в ряді публікацій ФТІМС НАНУ і у більше десяти патентах України. Та закономірність, що деталі, які створені методами оптимізації (за міцністю при мінімальній вазі), нагадують об'єкти живої природи, привела до формування термінів «біонічний дизайн» і «природоподобні конструкції».

Біонічний дизайн – це суміжне поняття по відношенню до поняття «генеративний дизайн» (Generative Design) – підхід до проектування (деталь, анімація, зображення тощо), за якого людина делегує частину процесів комп'ютерним платформам [2]. Технологія генеративного дизайну змінює характер взаємодії людини з програмою, яка стає ефективним інструментом творчого процесу. Деякі генеративні системи дозволяють користувачеві переформулювати, коригувати та уточнювати завдання за проміжними результатами, а також самонавчаються в процесі пошуку рішень. За трактуванням фахівців Центру НТІ СПбПУ і ГК CompMechLab, генеративний дизайн є частиною біонічного дизайну, як проектування і виробництва персоналізованої продукції із застосуванням комп'ютерного інжинірингу, оптимізації (багатопараметричної, топологічної, багатокритеріальної і ін.) та передових виробничих технологій, в першу чергу, адитивних, за яких отримують конструкції подібні спостережуваним в природі [2].

Розширене тлумачення терміну «генеративний дизайн» передбачає, що ЦД – це інструмент, який використовує методи генеративного дизайну в тому сенсі, що робота конструктора з технологією ЦД, все в більшій мірі спирається на інтелектуальні функції засобів розробки і можливості багатовимірної оптимізації конструкції під набір заданих цільових показників і ресурсних обмежень. Аналогічно конструкційному дизайну для адитивного виробництва наявна потреба створення програм з оптимізаційного дизайну металевої мікроструктури, здатних до еволюції чи самонавчання, програм свого роду багатофакторної металургії автоматичної мікроплавки і наплавки, зокрема в спеціальних газових чи рідких (покривних чи захисних) середовищах, або в таких же середовищах під низькими чи високими тиском чи температурою, в тому числі з можливістю пошарової термообробки металу та, навіть, ще і наступного деформування металовиробу.

Істотне зауваження полягає в тому, що застосування 3D-друку обмежується не лише можливостями створення конструкції певної якості, а й економічними міркуваннями. Якщо методами адитивної технології надрукувати ту саму деталь, що було спроектовано під неадитивні технології, то це рішення буде практично завжди дорожче, ніж традиційне, оскільки виробництво на основі традиційних верстатів з ЧПУ вже оптимізовано під мінімальну собівартість. Однак, чим більше конструктор візьме в проектування елементів для оптимізації, тим вища ймовірність того, що перехід на адитивну технологію буде економічно виправданим. Сумарно, якщо взяти кілька десятків елементів, які з'єднуються за допомогою традиційних технологій, включаючи болтові, зварні та інші з'єднання, то ту ж конструкцію за допомогою адитивних технологій можна зробити не з 100 деталей, а з 10, використовуючи на порядок менше компонентів, що саме по собі веде до істотної економії.

Сенс полягає не в тому, щоб наявну традиційну деталь виготовити за допомогою адитивних технологій, а в тому, аби перепроектувати конструкцію під адитивні технології. Тут вже виникає питання про зміну парадигми, про перехід на нові принципи конструювання. Конструктор з досвідом під час проектування тримає в голові обмеження щодо обладнання та матеріалів, якими він звик користуватися, автоматично вводячи обмеження на конструкцію. Але в разі адитивного виробництва багато обмежень знімаються, форма може бути практично будь-яка, і, як правило,

вона знаходиться за межею інтуїції, досвіду і знань конструктора. А в разі доволі об'ємних металоконструкцій, що виготовляються в ливарному цеху, в такі ж умови потрапляють ливарники і термісти.

Якщо раніше розрахунковим шляхом визначали залишкові напруги в конструкціях, що піддаються технологічним операціям (лиття, зварювання або термообробка), то сьогодні за допомогою 3D-друку металами можна вирішувати зворотну задачу – задавати сприятливий характер розподілу внутрішніх напружень в процесі друку. Більше того, керуючи параметрами процесу 3D-друку (наприклад, такими як швидкість охолодження металу), можна впливати на формування мікроструктури в процесі кристалізації металу, впливати на схильність до утворення мікродефектів, холодних і гарячих тріщин тощо.

Принципово нові можливості складаються на перетині технологій ЦД, 3D-друку і ІР. А саме – відкриваються можливості практично в реальному часі друкувати реальний об'єкт (фізичну частину двійника) по цифровій моделі (віртуальній частині двійника) і тут же, аналізуючи її властивості за допомогою датчиків, коригувати ці властивості [10]. На рис. 3 зображено всі елементи ЦД: математична модель формування фізичного об'єкта (модель процесу), статистична модель, заснована на машинному навчанні на базі даних, отриманих з датчиків від реального фізичного об'єкта, і сам фізичний об'єкт, що формується в процесі 3D-друку. А головне, що в процесі друку може створюватися не тільки бажана форма фізичного об'єкту (металоконструкції), але і його внутрішня структура з заданими експлуатаційними властивостями і полем внутрішніх напружень (рис. 4).

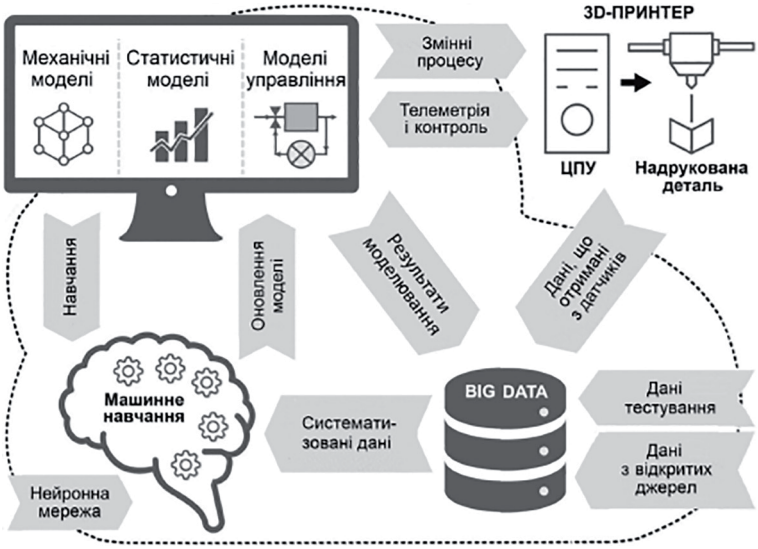


Рис. 3. Схема ЦД в управлінні процесом 3D-друку металами [2]

Підходи, що використовуються для створення ЦД процесу 3D-друку металами (рис. 3), засновані на моделюванні впливу рухомих джерел тепла (лазерний промінь, електронний промінь чи електрична дуга тощо). У розрахунках враховується аналіз температурних полів за допомогою методу скінченних елементів або інших методів згідно роботи [3], розрахунковим шляхом оцінюються мікроструктури, що формуються відповідно до різних швидкостей охолодження розплаву, чисельним шляхом аналізується напружено-деформований стан металоконструкції. В якості датчиків служать інфрачервоні відеокамери для дистанційного вимірювання температур, для оцінки наявності внутрішніх дефектів – засоби акустико-емісійного контролю тощо.

У міру розвитку адитивних технологій виникають все нові можливості математичного моделювання та програмування властивостей майбутніх фізичних конструкцій. Нещодавно з'явилися такі нові терміни, як 4D- і 5D-друк. Метод 4D-друку передба-

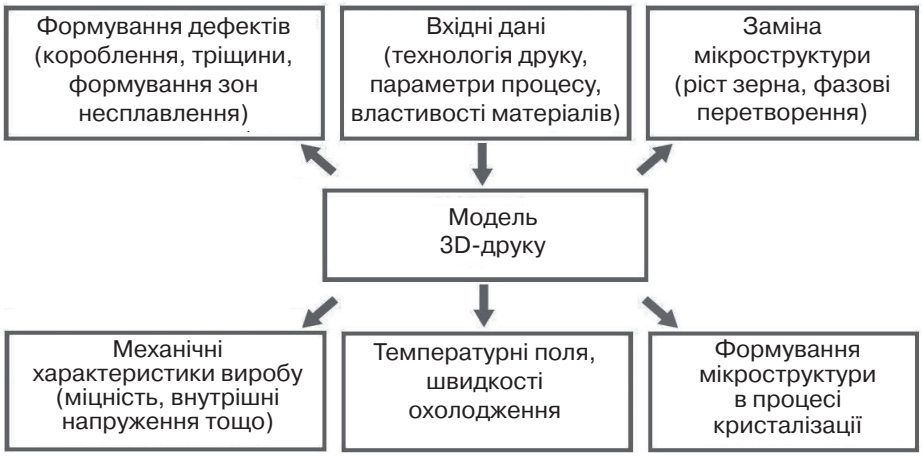


Рис. 4. Схема моделі 3D-друку металопродукції [2]

чає, що до трьох координат додається четверта – час, тобто надруковані тривимірні конструкції в майбутньому можуть спеціальним чином змінюватися під впливом тих чи інших зовнішніх факторів [2]. Певні матеріали можуть змінюватися під впливом води, тепла, світла, механічного впливу і можуть бути запрограмовані на задані дії. Типовим прикладом може бути «закладений» у структуру металу тріп-ефект, що реалізується появою мартенситу деформації саме у момент цієї деформації [11] і значно зміцнює ту зону металу, де накладена деформація.

Зокрема, дослідники з лабораторії Self-AssemblyLab Массачусетського технологічного інституту ведуть дослідження в області створення матеріалів з програмованими властивостями, які можуть знайти застосування в області медичних імплантатів. В технології 5D-друку (3D-друк на платформі, здатній гойдатися по двох осях), використовуючи ту ж CAD-модель, можна отримувати готову конструкцію набагато міцнішу, якщо змінити спосіб нанесення матеріалу таким чином, що шари, які наплавляються, з рівних перетворюються в звивисті [2]. Подібні технології відкривають нові можливості стосовно управління фізичною частиною ЦД.

Адитивні технології активно розвиваються в Росії, зокрема, в двигунобудуванні є компанії, які застосовують технологію тривимірного друку для виготовлення окремих деталей, починають впроваджувати технології 3D-друку в виробництво і підприємства атомної галузі. Адитивні технології, взявши «на озброєння» технологію ЦД, дозволяють створювати конструкції за індивідуальними вимогами в короткий термін. Технології розвиваються по спіралі (рис. 5), і на сьогоднішньому витку перед розробниками стоїть завдання створення високо кастомізованих (за індивідуальним замовленням) продуктів (конструкцій), щоб на новому рівні повернутися до можливостей, подібним ремісничому виробництву індивідуальної продукції для кожного із замовників для найповнішого задоволення останніх.

У початковий період ремісничого виробництва (рис. 5) кастомізація товарів була максимальною (1700 рік на кривій), потім розвиток йшов у напрямку збільшення масовості виробництва і створення продуктів «які підходять для всіх». Максимум кривої (виходячи з обсягу продуктів на їх варіант) припадає на масове конвеєрне виробництво автомобілів, час, коли народилася знаменита фраза Генрі Форда: «Колір авто може бути будь-яким, за умови, що він чорний». Починаючи з 60-х рр. минулого століття, зростає кастомізація – збільшується число моделей, попередньо налаштованих на переваги невеликих груп споживачів. У 2000 р. крива підходить до розвилки: спостерігається зростання складності масових товарів, з одного боку, і зростання кастомізації продукції, з іншого.

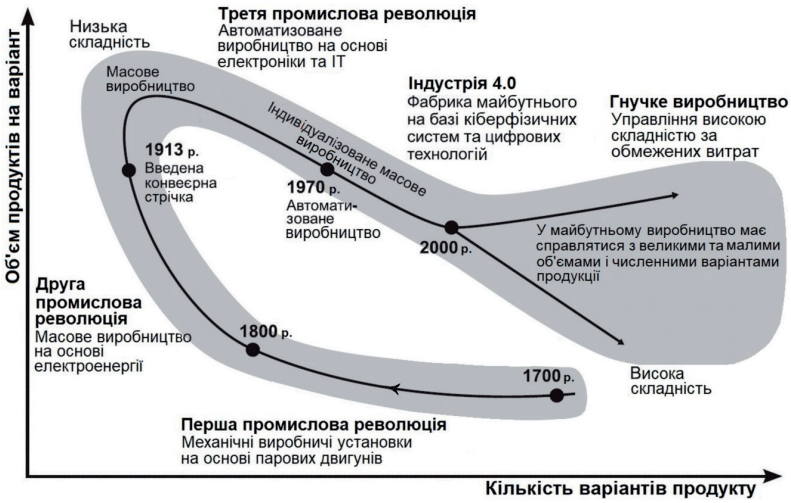


Рис. 5. Часовий (спіральний) цикл зміни масовості і варіативності продуктів (конструкцій), що виробляються [2]

Аналізуючи проблематику застосування ЦД для адитивного виробництва, зауважимо про важливість цього у наступному. Виготовлення складних металоконструкцій за допомогою 3D-друку за індивідуальним замовленням визнано вельми перспективним, потенційно перетворюючим інструментом виробництва продукції для охорони здоров'я, автомобільної та аерокосмічної промисловості. Однак, після тривалих, майже протягом чверті століття, досліджень і розробок вдалося надрукувати лише кілька комерційних металевих сплавів, і ринкова вартість всіх 3D-друкованих продуктів тепер становить незначну частину економіки виробництва [10].

Ця трудність пояснюється істотною різноманітністю структури і властивостей друкованих металовиробів, а також схильністю їх до дефектів. Вийшло, що адитивному виробництву від пластика до металу не просто перейти, щоб отримати якісний литий метал, принаймні, треба у металургів повчитись. Крім того, існуюча практика оцінки металовиробів велася шляхом тривалих проб і помилок з використанням дорогого друкарського обладнання та вихідних матеріалів. Хоча ні металевий матеріал, що обмежує нішу ринку 3D-друку, ні висока вартість продукції, ні тривалість визначення якості продукції не є критичними факторами. Створення ЦД для 3D-друкарської машини відкрило можливість зменшити кількість випробувань методом проб і помилок для отримання заданих характеристик продукту і скорочення часу, необхідного для кваліфікації деталі, щоб зробити адитивні металовироби більш рентабельними. Показано [10], що комплексний ЦД машини для 3D-друку, що складається з механістичних, контрольних та статистичних моделей 3D-друку, машинного навчання і великих даних, дозволяє зменшити обсяг випробувань методом проб і помилок, знизити кількість дефектів і скоротити час між проектуванням і виробництвом.

На завершення цього огляду, за даними монографії [2], наведемо ознаки, що вкладаються на сьогодні в поняття ЦД в сфері проектування промислових виробів. Перелік визначень ЦД наступний:

• ЦД – це цифрова копія конкретного фізичного об'єкта, що відображає структуру, продуктивність, технічний стан і характер робочої місії фізичного об'єкта, включаючи такі параметри, як, наприклад, пройдені кілометри, несправності, що виникли, а також історію технічного обслуговування і ремонту реального виробу (фізичного двійника);

• базується на мультифізичному (MultiPhysics) математичному моделюванні різних фізичних процесів, що визначають властивості і поведінку об'єкта;

• пов'язаний з конкретними умовами, в яких працює реальний об'єкт; тобто це модель, що накопичує інформацію про реальний виріб у міру його експлуатації за конкретних умов; у двох конструктивно однакових виробів ЦД будуть різними, якщо вони працюють в різних умовах;

• дозволяє розробникам спостерігати за роботою віртуального об'єкта, щоб краще зрозуміти, як оптимізувати роботу фізичного об'єкта;

• допомагає зрозуміти як фізичний двійник (реальний об'єкт) працює в реальному світі, і може дати прогноз: як ця робота буде виконуватися в разі своєчасного обслуговування в майбутньому;

• дозволяє збирати дані про фізичний об'єкт і, використовуючи інструменти предиктивної аналітики, робити прогнози щодо стану цього об'єкта, визначати, коли слід планувати профілактичне обслуговування;

• дозволяє усувати несправності віддаленого обладнання і виконувати дистанційне обслуговування;

•засновані на моделюванні фізичних процесів, ЦД, надають дані, які неможливо отримати безпосередньо на фізичному об'єкті, що може використовуватися як інструмент для усунення неполадок в існуючих виробах і оптимізувати продуктивність їхніх наступних поколінь.

Чим досконалішими є засоби математичного моделювання, чим більше комплексно вдається підійти до опису завдання, тим більш точну модель (як основу ЦД) вдається отримати, що ілюструє рис. 6 проф. А. І. Боровкова [2].

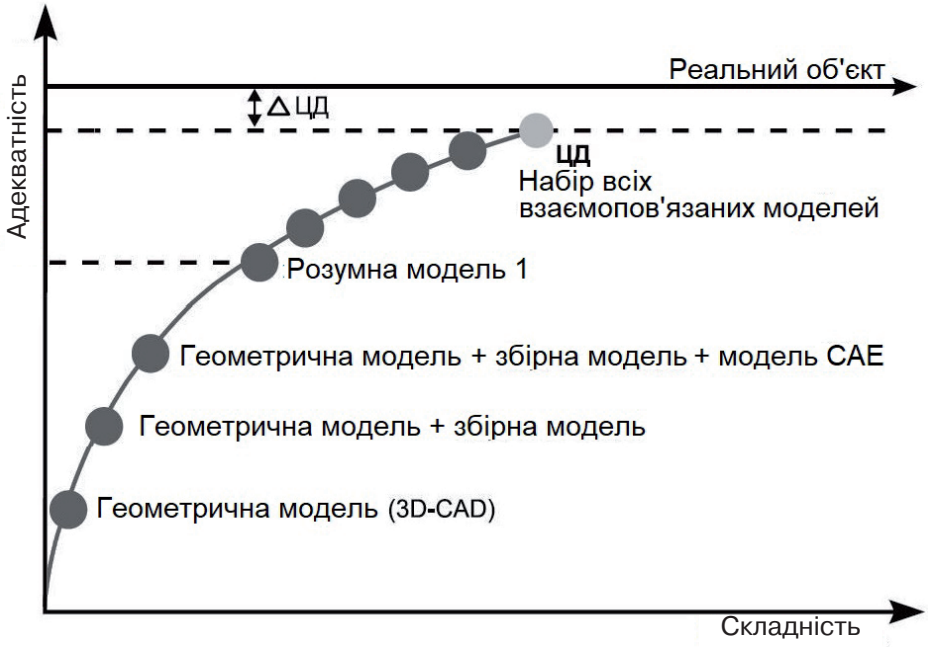


Рис. 6. Етапи формування цифрової моделі, що лежить в основі ЦД [2]

Такі моделі проходять в своєму розвитку наступні етапи: геометрична модель, геометрична плюс збірна, потім додається модель інженерного аналізу CAE, на певному етапі формуються так звані «розумні математичні моделі», що мають високий рівень адекватності до реального матеріалу, об'єкту, або процесу. «Розумні» моделі агрегують в собі всі знання, що застосовують при проектуванні, виробництві та експлуатації виробу, продукту чи конструкції, машини, установки, технічної чи кіберфізичної системи (включно з інформацією про експлуатаційні режими та технології виробництва і збирання). Такий шлях розвитку ЦД створив передумови вирішення описаних вище завдань (рис. 5), а саме – переходу від масового виробництва до масового замовленого виготовлення, при якому розширюється асортимент, але скорочуються обсяги партій виробів і цикл виробництва, що вже стає трендом в сфері розробки, розвитку та застосування передових виробничих технологій.

Список літератури

1. Із зали засідань Президії НАН України 13 вересня 2017 року. *Вісн. НАН України*, 2017, № 10. С. 3–9.
2. Прохоров А., Лысачев М. Научн. ред. Боровков А. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. Изд. первое, исправленное и дополненное. М.: ООО «АльянсПринт», 2020. 401 с.
3. Doroshenko V. S., Kravchenko V. P., Tokova O. V. Development of a Digital Twin of the Technoogical Process of Consumable Pattern *Casting Using Production Data*. Control Systems and Computers. 2020. № 3. pp. 40–49.
4. Дорошенко В.С. 3D технологии изготовления отливок как примеры адитивного производства. *Металл и литье Украины*. 2014. № 12. С. 4–9.
5. Дорошенко В.С. Адитивное производство – растущая отрасль мировой промышленности. *Металл и литье Украины*. 2016. №. 5. С. 35–44.
6. Дорошенко В.С. 3D-технологии для формовки и литья. Литье и металлургия. 2015. № 3. С. 30–39.
7. Дорошенко В.С. Примеры 3D-технологии в литейном производстве. Снижение металлоемкости отливок. *Литье и металлургия*. 2016. № 1. С. 34–39.
8. Чехович А. Топологическая оптимизация геометрии изделия как путь повышения прибыльности предприятия. URL: https://blog.iqb.ru/geometry-topology-optimization/
9. Перепроектирование кронштейна рефлектора на основе топологической оптимизации с применением ИСКПИ. URL: http://fea.ru/project/199
10. T. Mukherjee, T. DebRoy. A digital twin for rapid qualification of 3D printed metallic components. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352940718304931?via%3Dihub
11. Дорошенко В.С. О литье защитных и износостойких конструкций из изотермически закаленного высокопрочного чугуна. *Литейное производство*. 2020. №5. С. 28–31.

Надійшла 01.09.2020

References

1. From the meeting room of the Presidium of the NAS of Ukraine on September 13, 2017. *Visn. NAN Ukrayiny*, 2017, no 10, pp. 3–9. [in Ukrainian]
2. Prohorov A., Lysachev M. Nauchn. By red. Borovkov A. (2020) Digital twin. Analysis, trends, world experience. Ed. first, revised and supplemented. M.: OOO «AlyansPrint», 401 p. [in Russian]
3. Doroshenko V. S., Kravchenko V. P., Tokova O. V. (2020) Development of a Digital Twin of the Technological Process of Consumable Pattern Casting Using Production Data. *Control Systems and Computers*, 3, pp. 40–49 [in English]
4. Doroshenko V.S. (2014) 3D casting manufacturing technologies as examples of additive manufacturing. *Metall i lite Ukrainy*, 12, pp. 4–9. [in Russian]
5. Doroshenko V.S. (2016) Additive manufacturing is a growing industry worldwide. *Metall i lite Ukrainy.* 5, pp. 35–44. [in Russian]
6. Doroshenko V.S. (2015) 3D technology for molding and casting. *Lite i metallurgiya*, 3, pp. 30–39. [in Russian]
7. Doroshenko V.S. (2016) Examples of 3D technology in foundry. Reducing the metal consumption of castings. *Lite i metallurgiya,* 1, pp. 34–39. [in Russian]
8. Chehovich A. Topological optimization of product geometry as a way to increase the profitability of an enterprise. URL: https://blog.iqb.ru/geometry-topology-optimization/ [in Russian]
9. Redesign of the reflector bracket based on topological optimization using ISKPI. URL: http://fea.ru/project/199 [in Russian]
10. Mukherjee T., DebRoy T. A digital twin for rapid qualification of 3D printed metallic components. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352940718304931?via%3Dihub [in English]
11. Doroshenko V.S. (2020) About the casting of protective and wear-resistant structures fromisothermally hardened ductile iron. *Litejnoe proizvodstvo,* 5, pp. 28–31. [in Russian]

Received 01.09.2020

V. S. Doroshenko, *Dr.Sci. (Engin), Senior Resesrch Scientist,*
e-mail: doro55v@gmail.com; ORCID 0000-0002-0070-5663

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

TOPOLOGICAL OPTIMIZATION OF CASTINGS DESIGNS IN ADDITIVE PRODUCTION USING A DIGITAL TWIN

The growing complexity of mechanical engineering products is changing the strategy of its production. Optimization of thousands of parameters to create competitive products today is almost impossible without the use of digital twin (CD) technology, although the CD technology itself, particularly in the foundry and metallurgical industry, is still at an early stage of development. If to ensure the reliability and safety of machines and mechanisms and their metal structures requires a significant increase in the number of tests, they are faster and cheaper to do in cyberspace at the design stage than at a later stage in metal. The review considers some examples of application of CD technology for the design of cast metal billets, optimization of their designs in the manufacture of the additive method. A review of the definitions: what is diabetes, what technologies reveal this concept, how the use of diabetes affects the development of additive production of metal products. For the construction of metal products, such concepts as "bionic design" and "generative design" are noted, which change the nature of human interaction with the program, which becomes an effective tool of the creative process. Examples of computer engineering at topological optimization of designs of metal preparations are shown. A review of a number of sources of information shows that among the advanced technologies CD is an integrator of almost all "end-to-end" digital technologies, acts as a driver, provides the prerequisites for development and allows companies and entire industries to move to sustainable development. CD technology has great prospects because it is necessary not only for the creation and operation of a modern "smart" product, but also for its regular maintenance, updating and constant adaptation to new requirements and conditions with the transfer of accumulated data and methods to create new machines, structures and materials.

Keywords: *Metal casting, design optimization, digital twin, additive production, 3D printing, digital model, topological optimization, bionic design.*