
ПРОБЛЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ, МЕХАНІЗАЦІЇ ТА КОМП'ЮТЕРИЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ ЛИТТЯ

УДК 681.3/621.74

В. С. Дорошенко, д-р техн. наук, ст. наук. співроб.,
e-mail: doro55v@gmail.com,

В. П. Кравченко, канд. фіз-мат. наук, стар. наук. співроб.,
e-mail: sary942@ukr.net

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

ПЕРЕДУМОВИ СТВОРЕННЯ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЛИТТЯ ЗА МОДЕЛЯМИ, ЩО ГАЗИФІКУЮТЬСЯ, ЗА ДАНИМИ МОНІТОРИНГУ ЛИВАРНОГО ЦЕХУ

Сучасний розвиток цифрових технологій дозволив збільшити обчислювальні потужності і знизити вартість їх використання, що дало можливість об'єднувати інформаційні технології з операційними процесами для створення цифрових двійників технологічних процесів. ЦД ливарного процесу за моделями, що газифікуються (ЛГМ), розглядається як цифрова копія для оптимізації його ефективності. ЦД сприяють стрімкому розвитку сучасних компаній. За допомогою них спрощується підтримка технічних систем, зростає ефективність керування ризиками помилок і збоїв, що підвищує стабільність роботи. ЦД дозволяє за вхідними даними обладнання передбачити ключові параметри продукції виробництва. ЦД – це віртуальне відтворення робочого стану реального фізичного об'єкта, процесу, системи або цілої служби. Це може бути віртуальний двійник деталі, виробу, обладнання, технологічного процесу, виробничих ділянок, цехів чи навіть заводів. По суті, це набір математичних моделей, що описують стан об'єкта і всіх його елементів. У загальному випадку ЦД включає: геометричну модель об'єкта; набір розрахункових даних деталей, вузлів і об'єкта в цілому (математичні моделі, які описують всі, що відбуваються в об'єкті, фізичні процеси); інформацію про технологічні процеси виготовлення і збирання окремих елементів; деякі дані про випробування об'єкта, наприклад, показники датчиків, за якими можуть бути підтверджені розрахункові дані. Таким чином, ЦД дозволяє в віртуальному просторі змодельовати зміну стану і характеристик всього виробу при зміні характеристик будь-якого з його елементів чи технологічних операцій його виробництва. Розглянуто системи дистанційного моніторингу параметрів технологічного процесу для ЦД цеху лиття за ЛГМ-процесом, а також методи їх раціонального вирішення на теоретичній основі сучасної прикладної математики.

Ключові слова: ливарний процес, цифровий двійник, моніторинг, інформаційні технології, ЛГМ-процес, разові моделі.

Сучасний розвиток цифрових технологій дозволив значно збільшити обчислювальні потужності, включно з хмарними платформами дата-центрів, які створені чи будуються в більшості країн, і знизити вартість їх використання, що дало можливість

провідним компаніям об'єднувати інформаційні технології з операційними процесами для створення цифрових двійників (ЦД, Digital Twin) технологічних процесів. Поява ЦД стала логічним результатом розвитку концепцій «цифрового виробництва» і «промислового інтернету речей». Це поняття поширилось з 2003 р. після публікації статті професора Технологічного університету Флориди Майкла Грівза «Цифрові двійники: досконалення виробництва на основі віртуального прототипу заводу» [1]. з операційними процесами для створення цифрових двійників (ЦД, Digital Twin) технологічних процесів. Поява ЦД стала логічним результатом розвитку концепцій «цифрового виробництва» і «промислового інтернету речей». Це поняття поширилось з 2003 р після публікації статті професора Технологічного університету Флориди Майкла Грівза «Цифрові двійники: удосконалення у виробництва на основі віртуального прототипу заводу» [1].

Все ширше застосування інтелектуальних приладів та обладнання в ході цифрової трансформації, оснащення ними виробничих ліній вже дозволяють говорити не лише про інтернет речей, а й про інтернет технологій або промисловий інтернет. ЦД сприяють стрімкому розвитку сучасних компаній, з їх допомогою спрощується підтримка технічних систем, зростає ефективність, знижуються ризики помилок і збоїв, підвищується стабільність виробництва, прогнозованість напрямів його розвитку і гнучкість реагування на зміни попиту. Такі можливості дозволяють підприємствам максимально підвищити прибутковість від інвестицій, збільшити конкурентоспроможність, наростити і примножити клієнтську базу.

ЦД визначається [2] як цифрове представлення одного або групи виробів, механічного або технологічного процесу, що об'єднує в собі відомості про цифровий макет, має інформацію про випробування, тісно інтегровану з інженерними аналітичними і чисельними методами розрахунків (наближені до реальності математичні моделі на всіх стадіях розробки продукції), включає модельно-орієнтований підхід до проектування систем, має інформацію про умови експлуатації, передбачені на стадії проектування або встановлені від датчиків, специфікацію використаних матеріалів, управління і дані по обслуговуванню виробів або процесів, інформацію з PLM, SLM і інших систем, наприклад, записи про власників з CRM системи і т. д. Таким чином, завдяки зворотному зв'язку від конкретного фізичного виробу чи процесу, ЦД найбільш адекватно відображає його реальний стан, робочі характеристики, прогнозує ресурс використання, дозволяє видавати рекомендації для оптимальної роботи фізичного оригіналу. На думку експертів в найближчому майбутньому споживачі і власники продуктів зможуть користуватися технологіями ЦД в повсякденному житті, причому стане можливим використовувати ЦД і з метою поліпшення якості людського життя, а не тільки для оптимізації роботи якихось об'єктів або процесів.

В ливарно-металургійних процесах, притаманних заготівельному виробництву машинобудування, в процесі лиття заготовок важливу роль відіграє якість литої заготовки [3, 4]. Його стабільне підвищення без істотних матеріальних витрат є важливою складовою циклу виробництва, для чого все ширше у світовій практиці застосовують концепції ЦД і удосконалюють методики його використання.

В ФТІМС НАН України виконано цикл досліджень під керівництвом професора О. Й. Шинського зі створення методології дистанційного моніторингу ливарних процесів, розгортання та експлуатації багаторівневої інтегрованої комп'ютерної мережі оперативного моніторингу станів об'єктів обладнання, оснащення та оброблюваних матеріалів на прикладі процесу лиття за моделями, що газифікуються, (ЛГМ) [5–8] з оперативним контролем показників та параметрів поточного виробництва і їх підтримкою в оптимальних межах на всіх етапах до отримання готової продукції. Це створило підґрунтя для цифрового представлення ЦД ливарного процесу ЛГМ, що сполучає в собі відомості про цифровий макет процесу, отримує дані з поточного моніторингу, які тісно інтегровані з інженерними аналітичними і чисельними методами розрахунків, що реалізуються часто наближеними, але адекватними до реальності математичними моделями на всіх стадіях функціонування даного ливарного процесу з метою його оптимізації.

Створенню ЦД сприяло дослідження існуючих програмних засобів комп'ютерного моделювання процесів ливарного виробництва, практичне опробування для визначення їх переваг та недоліків, оцінка можливостей використання цих засобів на вітчизняному виробництві [9], а також формулювання вимог до комп'ютерних технологій як технічного завдання для розробки за вимогами вітчизняних ливарних підприємств і умовами роботи з вітчизняною базою стандартизованих марок металів чи сплавів та придатних для впровадження в виробництво. Серед концепцій розвитку застосування методології ЦД виробничих технологій, зокрема, ливарного виробництва, експерти вбачають цифровізацію функцій раніше притаманних людині: енергетичної, транспортної, функції технологічної зміни оброблюваного матеріалу, контрольної-вимірювальної і, нарешті, найважливішої і складної функції – логічної на основі використання сучасних комп'ютерних технологій [8].

З цих позицій глибину проникнення ЦД в технологічні процеси ливарних підприємств та вплив на їх автоматизацію, за результатом покрового відпрацювання на прикладі ЛГМ-процесу, можна розбити на три рівні. Рівень I – в реальному часі оператор на комп'ютері (інших мультимедійних засобах обміну інформацією між комп'ютером і зовнішнім середовищем) бачить та контролює чисельні значення параметрів роботи обладнання, окремих чи всіх етапів технологічного процесу, умови праці персоналу і параметри навколишнього середовища, облік енергоносіїв, інших споживаних ресурсів, а також вивезення або викид відходів і можливе перевищення показників забруднення середовища. Рівень II – інформаційна система ЦД порівнює зазначені значення поточних параметрів зі спеціально створеними імітаційними моделями виробничих процесів чи записаними в часі найбільш вдалим періодами функціонування виробничого цеху. Потім інформаційна система ЦД рекомендує коригування (адаптацію) умов виробництва для досягнення обраних оператором показників (якість продукції, собівартість, ресурсомісткість і т. п.), або сама в обмежених межах виконує дії, що коректують умови виробництва. Рівень III – інформаційна система ЦД не лише сприймає показники роботи від обладнання до цеху в цілому, порівнює з оптимальними і частково коригує їх, але має засоби їх регулювання і залежно від обставин, що змінюються, може сама аналізувати, приймати рішення, коригувати процес виробництва аж до повного виключення з нього людини, накопичувати базу даних управління виробництвом, а також забезпечувати власну надійність (можливість додавання чи виключення будь-якого пристрою з мережі, при виході з ладу одного з елементів, передавати або обробляти інформацію через сусідні елементи).

Побудову ЦД на виробничих чи дослідних ливарних об'єктах доцільно виконувати відповідно удосконаленню засобів цифровізації з можливістю подальшої модернізації ЦД в системах автоматичного управління з урахуванням сучасних тенденцій. Зокрема, відома Lean-технологія (бережливе виробництво) – логістична концепція управління, сфокусована на оптимізації технологічних і бізнес-процесів з максимальною орієнтацією на ринок і з урахуванням мотивації кожного працівника. Lean-технології спираються на систему організації виробництва за зразком автомобільного гіганта – компанії Тойота, яку високо оцінюють за рівнем бережливого виробництва [10].

Концепцію використання ЦД промислових об'єктів розглянемо на прикладі цеху ЛГМ, наглядна схема основних виробничих операцій якого представлена на рис. 1. Основними цілями проектування ЦД на першому етапі були оптимізація функціонування обладнання, ресурсозбереження та поліпшення умов праці, а також вирішення проблем якості та конкурентоспроможності випущених металевих виливків. При цьому завдання збору моніторингової інформації та контролю характеристик поточних процесів за критичних умов роботи датчиків через гарячі і насичені промисловими шкідливими умовами ливарного цеху вирішувались з використанням бездротових сенсорних мереж (БСС, англ. WSN – Wireless Sensor Network) та інших мультимедійно-комунікаційних можливостей [8]. Об'єднанням в бездротову сенсорну мережу датчиків утворювали територіально-розподілену систему збору, обробки і передачі інформації, основною сферою застосування якої є контроль і моніторинг параметрів

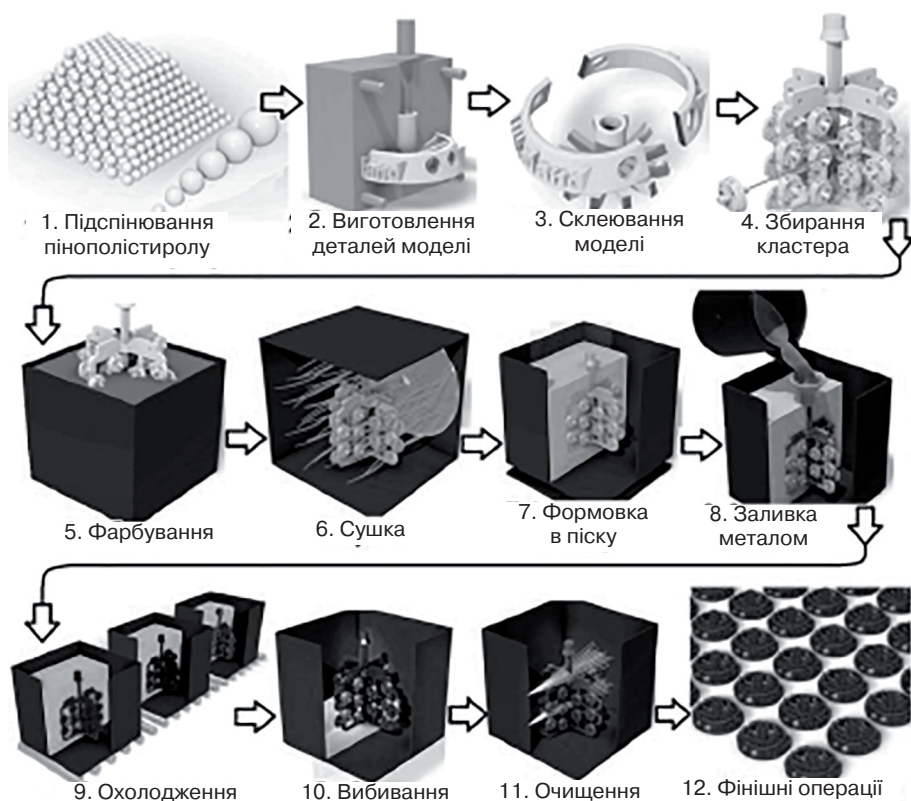


Рис. 1. Схема основних операцій при ЛГМ-процесі на прикладі виробництва виливка робочого колеса насоса

фізичних середовищ і об'єктів з метою управління ресурсами і процесами з боку оператора з використанням ЦД і поглибленням його програмних можливостей.

Гнучка архітектура, зниження витрат при монтажі виділяють бездротові мережі інтелектуальних датчиків серед інших бездротових і дротових інтерфейсів передачі даних, особливо коли мова йде про велику кількість з'єднаних між собою пристроїв для інформаційного забезпечення ЦД. Стабільне зниження вартості бездротових рішень, підвищення їх експлуатаційних параметрів допускають поступову заміну провідних рішень в системах збору телеметричних даних засобами дистанційної діагностики та обміну інформацією. Якщо вузол сенсорної мережі містить різні датчики для контролю зовнішнього середовища, мікрокомп'ютер і радіоприймач-передавач, то це дозволяє пристрою проводити вимірювання, самостійно проводити первинну обробку даних і підтримувати зв'язок із інформаційною системою ЦД.

Останнім часом також набуває тенденція замість розмаїтих датчиків і сенсорів (або разом з ними) використання контролерів з аудіо- та відеосистемами (наприклад, типу Microsoft Kinect), які за допомогою програмного забезпечення пов'язаного з ними комп'ютера (наприклад, програмних бібліотек Microsoft Kinect for Windows SDK) дозволяють розпізнавати не лише чіткі лінії, але і форму обличчя, руки, пропорції тулуба людини та практично будь-які обриси предметів і їх руху. Такі системи дозволяють розпізнавати і відстежувати людей, що знаходяться в полі зору відеокамер контролера, використовуючи відстеження частин скелета, визначати відстані від датчика до об'єкта використанням XYZ-глибини камери, яка отримує доступ до масиву кольорів та значень глибини; може сприймати звуки з вибірковою шумо- та ехо-поглинанням; знаходити місце розташування аудіо джерела, використовуючи вектор пошуку; розпізнавати мову, а також доповнювати реальне зображення від відеокамер інструктивною чи попереджувальною інформацією [11, 12]. Такі системи

здатні зчитувати нанесений штрих- чи QR-код і (або) розпізнавати обриси оснащення, обладнання, працівників, вимірювати параметри поточного технологічного процесу (зокрема, температуру металу за ступенем кольоровості з допомогою відеокамер, чутливих у спектрі інфрачервоного випромінювання, високої роздільної здатності з похибкою вимірювання до $\pm 1,5^\circ\text{C}$), порівнювати діючий в цеху технологічний процес з його оптимальним моделюванням, записаним на комп'ютері, чи (та) з показниками відпрацьованого і ідентифікованого процесу як «еталонний» тощо.

В ході підготовки технічного завдання на створення ЦД синхронно з системою моніторингу цеху ЛГМ на базі бездротової сенсорної мережі ливарний процес було окреслено у вигляді п'яти технологічних потоків: 1) виготовлення разових моделей; 2) оборот і регенерацію формувального піску; 3) плавка і заливка металу в форми; 4) вибивка виливків і фінішна їх обробка; 5) відкачування вакуумним насосом газів, їх очищення і знешкодження. На першому етапі проектування ЦД для цифрової обробки цих п'яти потоків, що становлять процес виробництва цеху ЛГМ в цілому, авторами статті разом з технологічною службою ливарного цеху обрано практично мінімальний перелік показників, вимір яких в реальному часі здатний створити числову інформаційну основу ЦД початкового рівня. Зазначені технологічні потоки і пов'язані з ними транспортні збігаються з традиційним поділом цеху ЛГМ на виробничі дільниці.

Показники, що підлягали обробці ЦД, за тематикою можна розбити за наступними напрямками: 1) технологічні і технічні, 2) контролю відповідності нормам охорони праці, екології виробництва і протипожежної безпеки, 3) економічні з урахуванням використаних ресурсів. До економічного аналізу відносяться такі дані, як випуск виливків за вартістю, вагою і номенклатурою за контрольні або звітні періоди часу, аналогічні показники за матеріалами, енергоносіями, трудовитратами і щодо забракованої продукції, що актуальні для адміністративно-економічного аналізу підприємства, а також показання лічильників (витратомірів), встановлених на кожній дільниці для великих цехів або заводу в цілому. Важливим аспектно-орієнтованим напрямком розвитку системи ЦД, з урахуванням перспективи поглиблення його функціональності, є забезпечення досліджень впливу газогідродинамічних та теплофізичних процесів, що протікають в ливарній формі під час заливки металу, затвердіння і охолодження виливка, на якість виливків як продукції, що випускається протягом тривалого періоду часу. Такі багатофакторні процеси відіграють ключову роль у формуванні службових властивостей виливка, їх характеристики відображають в системах «виливок–форма» або «метал–форма», а в разі ЛГМ – в системі «метал–газифікована модель–форма», уточнюючи її як систему з рухомим джерелом газоутворення.

Однак на пуско-налагоджувальному етапі ЦД формовально-заливальної лінії ливарного цеху проводили за окремими фізико-технологічними параметрами, зокрема, вакуумної системи цеху, відображення якої на моніторі оператора показано на рис. 2 [13]. Режим функціонування вакуумної системи для підтримки залишкового тиску (розрідження) газів у порах піску ливарної форми є одним з вирішальних параметрів, що визначають якість виливків та рівень задимлення робочої зони цеху для запобігання погіршення умов праці з урахуванням граничнодопустимої максимальної концентрації шкідливої речовини у повітрі робочої зони.

Для ливарного виробництва процеси взаємодії металу з формою ускладнюються тим, що вони є ієрархічними: провідний підпроцес – тепломасообмін є процесом, що породжує залежні фізичні і хімічні підпроцеси [14]. Останні, в свою чергу, визначають ті чи інші стани в різних елементах і дозволяють запропонувати новий підхід до мети управління, коли на перший план виходить завдання синхронізації в часі цих станів. При такому підході вирішення окремих оптимізаційних задач може взагалі не здійснюватися, що істотно знижує обсяг необхідних для управління розрахунків, а також кількість параметрів технологічного процесу, що підлягають обробці з боку ЦД.

Паралельно зі створенням систем ЦД для ЛГМ-процесу розробляється технічне завдання комплексного контролю програмними засобами процесів лиття за разовими моделями, що належать до сфери розробок інституту ФТІМС, які базуються на

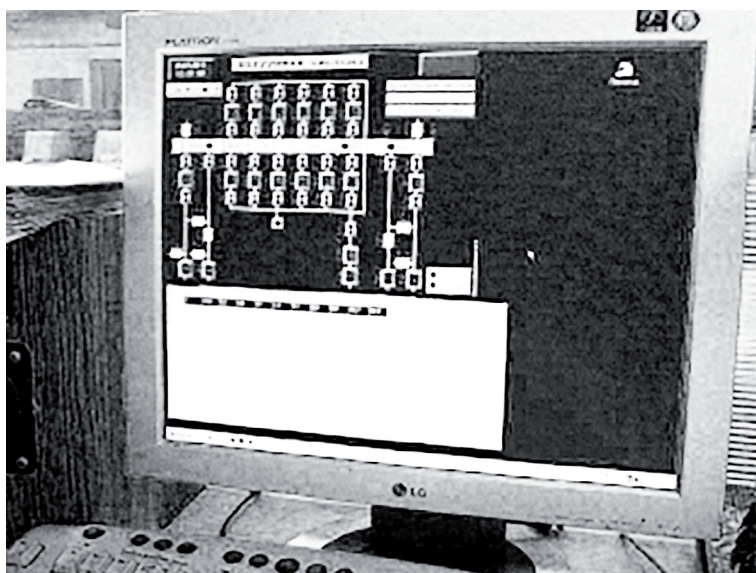


Рис. 2. Візуальне зображення вакуумної системи цеху на комп'ютері оператора

теплофізичних, гідродинамічних, регресивних математичних моделях та підлягають адаптації до систем автоматизованого управління технологічними процесами. Ці аналітичні моделі відображають умови як виробництва разових ливарних моделей (пінополістирольних, низькотемпературних, крижаних), ливарних піщаних форм (вакуумованих, заморожених), взаємодії рідкого та такого, що твердне, металу з формою і моделлю, так і структуроутворення та фізико-механічні властивості отриманих виливків за такими разовими моделями у відповідних ливарних формах. Раніше напрацьовані методики визначення, ідентифікації основних параметрів формоутворення і отримання виливків за разовими моделями, які отримали відображення в фізичних і математичних моделях, в даний час готуються до адаптації для комп'ютерних систем ЦД з метою прогнозування якості литих конструкцій.

Аналіз регресійних та індуктивних моделей стосовно ливарних процесів проведено в роботах [15–18]. Регресійний аналіз для систем прогнозування дозволяє визначити залежність між вихідною змінною і множиною зовнішніх факторів (регресорів). Коефіцієнти регресії можна знаходити методами найменших квадратів або максимальної правдоподібності. Лінійні регресійні моделі спрощують проектування систем моніторингу, порівнюючи з іншими моделями, а доступність для аналізу всіх обчислень дає прозорість моделювання; серед недоліків – низька адаптивність і відсутність здатності моделювання нелінійних процесів. Основний недолік нелінійних регресійних моделей – складність визначення виду функціональної залежності, а також трудомісткість визначення параметрів моделі.

Звертаючись до наближених до реальності математичних моделей на стадіях розробки ливарної технології чи моделювання тих чи інших фізичних процесів, відзначимо, що індуктивне моделювання в даний час асоціюється з дослідженням, описом і реалізацією причинно-слідчих процесів вивчення, розпізнавання образів і прогнозування процесів і явищ, та обробки знань на базі використання передісторії і закономірностей відповідної проблемної області, в нашому випадку в області теплообміну матеріалів ливарних процесів. Індуктивний підхід до моделювання та прогнозування, зокрема до даної задачі, заснований на побудові моделі переходу від окремих даних до їх узагальнення у вигляді відповідних моделей. Втіленням індуктивного підходу є метод групового урахування аргументів (МГУА) [19]. Отримані за

цим методом моделі оптимальної складності відтворюють невідому закономірність функціонування досліджуваного об'єкта (процесу), інформація про яких неявно міститься у вибірці експериментальних даних. Витоки ідеї індуктивного моделювання лежать в проблемі синтезу оптимального нелінійного пророкующего фільтра, яку вперше сформулював академік А. Н. Колмогоров. В подальшому в роботі [20] було запропоновано універсальний пророкующий фільтр з самонастроюванням в процесі функціонування, який реалізує алгоритм передбачення майбутнього значення стаціонарної функції часу, в нашому дослідженні функції температурного поля, по її передісторії шляхом знаходження оптимальних коефіцієнтів розширеного оператора передбачення.

Крім того, ряд задач ідентифікації, прогнозування, розпізнавання образів, оптимального управління пов'язані з проблемою передбачення на основі єдиного індуктивного принципу моделювання – вивчення причин і наслідків, від часткового до загального, з метою створення та накопичення необхідних баз знань. Розглянуті задачі можуть бути вирішені на основі індуктивного моделювання, тобто на рівні навчання детермінованої або ймовірнісної фізичної моделі, або на рівні адаптації досліджуваних зв'язків в досліджуваному тепловому процесі. З позиції теорії штучного інтелекту вказане узагальнення полягає в індуктивному процесі синтезу цілеспрямованої бази знань з використанням закономірностей, властивих області теплообміну, і моделей знань з обраного класу теплових процесів. Так, наприклад, для передбачення майбутнього значення стаціонарної функції температури теплового поля за допомогою оператора, індуктивно за допомогою МГУА, будується база знань у вигляді деякого полінома:

$$\begin{aligned} Z(t) = & \alpha_0 + \sum_{i=1}^s \alpha_i X_i(t) + \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^s \alpha_{ij} X_i(t) X_j(t) + \\ & + \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^s \sum_{k=1}^s \alpha_{ijk} X_i(t) X_j(t) X_k(t) + \dots, \end{aligned}$$

який описує загальний функціональний вираз передісторії тимчасової функції, як модель подання знань про передбачення в тепловому процесі. Це рівняння моделі називається опорною функцією і такі моделі вже стали традиційними і класичними, вони ефективні для розв'язання добре структурованих і формалізованих проблем. Моніторинг та індуктивне моделювання термодинамічних процесів, що відбуваються в виливках при охолодженні і кристалізації, передбачає визначення температурного поля і його динаміку.

Динаміка зміни такого поля, фіксування областей та ліній максимуму і мінімуму температури, й побудова цифрового двійника дозволять вибрати найбільш адекватні теоретичні моделі для прогнозу процесу лиття та управління певними параметрами, щоб досягти тих чи інших властивостей виливка. За даними, які прийшли на комп'ютер, виробляються основні обчислення і побудова цифрового двійника, і де можна відобразити параметри процесу лиття як по кожному виливку окремо, так і основні параметри одночасно за кількома виливками. Надалі за заздалегідь обраними фізико-математичними моделями і комп'ютерними програмами може розраховуватися імовірнісний прогноз процесу лиття по кожному виливку зі збереженням одержаних даних у відповідній базі даних.

Використовуючи рівняння опорної функції, будують різні варіанти моделей для деяких або всіх аргументів. Наприклад, будуються поліноми з однією змінною, поліноми зі всілякими парами змінних, поліноми зі всілякими трійками змінних і т. д. Для кожної моделі визначаються її лінійні коефіцієнти $\alpha_{i,j,K} \dots$ методом регресійного

аналізу. Серед всіх моделей вибираються кілька (від 2 до 10) найкращих. При цьому якість моделей визначається, наприклад, середньоквадратичним відхиленням чи іншим критерієм. Якщо серед обраних є модель, якість якої достатня для використання отриманих прогнозних значень, то процес перебору моделей припиняється. Інакше відібрані моделі використовуються як аргументи $X_1(t), \dots, X_n(t)$ для опорних функцій наступного етапу ітерації. Тобто, вже знайдені моделі беруть участь у формуванні більш складних моделей.

Сьогодні створюють ЦД не лише технологічного процесу, а як віртуальної моделі системи цілком (наприклад, заводу, фабрики чи інфраструктури району чи галузі). Вони збирають величезні обсяги операційних даних, вироблених пристроями та продуктами в системі, отримують уявлення і створюють нові бізнес-можливості для оптимізації всіх процесів. ЦД системи знайшли найбільше застосування в таких галузях господарської діяльності як енергетика, особливо атомна, нафтова, газова та хімічна промисловість, металургія, промисловість будівельних матеріалів тощо. Істотне підвищення інтересу з боку реального ливарно-металургійного виробництва до таких систем для підприємств стимулює і супроводжує вихід цих систем на новий виток свого розвитку на теоретичній основі сучасної прикладної математики.

Таким чином, поява в останні роки все більш потужних, зручних і дешевих інструментів обробки [21] і зберігання великих даних дозволила збільшити число варіантів використання їх можливостей для створення ЦД, зокрема ливарних процесів. Цифрова трансформація дозволяє не лише повністю обробити зібрану інформацію за допомогою передової аналітики, але і прийняти обґрунтовані рішення для оптимізації технологій в різних галузях виробництва. Аналогічним чином, цифрові технології моделювання надають виробникам можливість використовувати ЦД для своїх продукцій і процесів. Нові проекти можна тестувати в віртуальному світі, економлячи час, гроші і ресурси, а науковцям актуалізувати і вирішувати проблеми теорії і практики ливарних процесів, практично незважаючи на складність і об'єм отриманих дослідниками результатів й алгоритмів цифрового їх узагальнення. ЦД дозволить виробництвам швидше вирішувати технологічні, економічні та маркетингові проблеми, виявляючи їх із значно вищим ступенем точності, проектувати і випускати більш якісну конкурентоздатну, в тому числі, ливарну продукцію.

Список літератури

1. Michael W. Grieves Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication – LLC, 2014. 7 р.
2. Голубев С. С. Управление промышленными технологиями. Монография. М.: ФГУП «ВНИИ «Центр». 2019. 283 с.
3. Гусев М. П., Анисимов К. Н., Зарубин С. В. и др. Концепт цифрового двойника процесса непрерывного литья слитков. XV междунар. конгр. сталеплавильщиков и производителей металла – ISCON 2018: сб. трудов. (Тула, 15-19.10.2018). Москва-Тула, 2019. ООО "РПК ПринтАП". С. 452–456.
4. Шинський О. Й., Шалевська І. А., Калюжний П. Б. та ін. Принципи побудови та ідентифікації багаторівневої системи контролю параметрів технологічного циклу одержання виливків. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2018. Т. 5. №1. С 25–32.
5. Шалевская И. А., Дорошенко В. С. Экологический мониторинг выбросов при литье по газифицируемым моделям. *Екологія підприємства*. 2016. № 3. С. 38–45.
6. Дорошенко В. С., Кравченко В. П., Шевчук Б. М. Дистанційний моніторинг параметрів технологічних процесів ливарного цеху. *Strategy of Quality and Education*. VII Int. Conf. (Varna, Bulgaria, 3-10.06.2011). Acta Universitatis pontica Euxinus. Sp. iss. Varna, 2011. Vol. 1. P. 526–528.
7. Дорошенко В. С., Кравченко В. П., Бердыев К. Х. Системы онлайн-мониторинга технологических процессов и оборудования литейных цехов. *Acta Universitatis pontica Euxinus, special number*. VIII International Conference "Strategy of Quality and Education": (8-15.06.2012 Varna, Bulgaria) – Proceedings, v.1. P. 51–53.

8. Дорошенко В. С. Создание системы мониторинга в цехе литья по газифицируемым моделям. *Литье Украины*. 2014. №11. С. 10–14.
9. Токова О. В. Огляд методів та засобів комп'ютерного моделювання процесів ливарного виробництва. *Індуктивне моделювання складних систем*. 2017. Вип. 9. С. 204–213.
10. Оно Тайити. Производственная система "Тойоты". Уходя от массового производства. М.: Институт комплексных стратегических исследований, 2005. 192 с.
11. Долгов С. "Глаз терминатора". Между виртуальностью и реальностью. *Наука и жизнь*. 2012. № 3. С. 64–66.
12. Дорошенко В. С. Перспективы применения метода дополненной реальности в литейном производстве. Нові матеріали і технології в машинобудуванні - 2017: матеріали IX Міжнар. науково-технічної конф., Київ, 30-31.05.2017 / Заг. ред. Р. В. Лютий, І. М. Гурія. К.: НТУУ «КПІ», 2017. С. 64.
13. Дорошенко В. С., Бердыев К. Х. Системы онлайн-мониторинга состояния литейного оборудования с указанием возможных мест возникновения проблем / Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра: матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції, Київ, 18 квітня 2012 р. К.: НТУУ «КПІ», 2012. С. 149–151.
14. Управление литейными системами и процессами: монография / О. И. Пономаренко, Т. В. Лысенко, А. Л. Становский, О. И. Шинский; Нац. техн. ун-т "Харьк. политехн. ин-т". – Х.: Підручник НТУ "ХПІ", 2012. 368 с.
15. Дорошенко В. С., Кравченко О. В. Регрессионные и индуктивные модели для мониторинга литейно-металлургических процессов / Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра: матеріали XI Міжнар. науково-практичної конф., Київ, 23.04.2013. К.: НТУУ «КПІ», 2013. С. 172–182.
16. Doroshenko V., Kravchenko O., Mul O. Regression and induction methods of analysis in systems of foundry metallurgical processes monitoring / Boundary Field Problems and Computer Simulation. 2013. Vol. 52. Riga: RTU. P. 37–42.
17. Кравченко Е. В., Дорошенко В. С. Интервальный метод контроля достоверности телеметрической информации при мониторинге процесса охлаждения отливки в песчаной форме / Перспективные технологии, материалы и оборудование в лит. пр-ве: материалы IV Международ. научно-технич. конф., 30.09-4.10.2013 / Общ. ред. А. Н. Фесенко. Краматорск: ДГМА, 2013. С. 90–92.
18. Дорошенко В. С., Кравченко Е. В. Регрессионные модели для описания литейных процессов / Литье-2013: Материалы IX Международ. научно-практич. конф. Запорожье: Запорож. ТПП, 2013. Т. 1. С. 65–66.
19. Ивахненко А. Г. Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем. Киев: «Наук. думка», 1982. 296 с.
20. Gabor D., Wilby W. R., Woodcock R. A. A universal nonlinear filter, predictor and simulator which optimizes itself by a learning process. *Proc. Inst. Electr. Engrs.*, vol. 108., part B, № 40, 1961. pp. 85–98.
21. Корольов В. Ю., Ходзінський О. М. Розв'язування задач комбінаторної оптимізації на квантових комп'ютерах. *Cybernetics and Computer Technologies*. 2020, no. 2. P. 5–12.

Надійшла 27.08.2020

References

1. Michael W. (2014) *Grieves Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication* – LLC, 7 p. [in English]
2. Golubev S. S. (2019) *Management of industrial technologies / Monografiya* – М.: FGUP «VNIITsentr», 283 p. [in Russian]
3. Gusev M. P., Anisimov K. N., Zarubin S. V. i dr. Concept of the digital twin of the continuous casting process. XV mezhdunar. kongr. staleplavilshchikov i proizvoditeley metalla – ISCON 2018: sb. trudov. (Tula, 15-19.10.2018). Moskva-Tula, 2019. ООО "RPK PrintAP". Pp. 452–456 [in Russian]
4. Shinskiy O. Y., Shalevska I. A., Kalyuzhnyi P. B. and other (2018) The principles of prompting the identification of the baggage system and the control of the parameters in the technological cycle of production. *Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovyih tehnologiy*, vol. 5. 1, pp. 25–32 [in Ukrainian]

5. Shalevskaya I. A., Doroshenko V. S. (2016) Ecological monitoring of emissions during molding according to gasified models. *Ekologiya pidpriemstva*, 3, pp. 38–45 [in Russian]
6. Doroshenko V. S., Kravchenko V. P., Shevchuk B. M. (2011) Remote monitoring of parameters in technological processes in the liver shop. *Strategy of Quality and Education. VII Int. Conf. (Varna, Bulgaria, 3-10.06.2011). Acta Universitatis pontica Euxinus. Sp. iss. Varna, vol. 1, pp. 526–528* [in Ukrainian].
7. Doroshenko V. S., Kravchenko V. P., Berdyiev K. H. Online monitoring systems for technological processes and foundry equipment. *Acta Universitatis pontica Euxinus, special number. VIII International Conference "Strategy of Quality and Education": (8–15.06.2012 Varna, Bulgaria) – Proceedings, v. 1, pp. 51–53* [in Russian]
8. Doroshenko V. S. (2014) Creation of a monitoring system in the casting shop using gasified models. *Lite Ukrainyi*, 11, pp. 10–14 [in Russian].
9. Tokova O. V. (2017) Insight into the methods and techniques of the computer model of the processes of live virobniing. *Induktivne modelyuvannya skladnih sistem. Vip. 9, pp. 204–213* [in Ukrainian].
10. Ono Tayiti. Toyota production system. Moving away from mass production. M.: Institut kompleksnyih strategicheskikh issledovaniy, 2005, 192 p. [in Russian].
11. Dolgov S. (2012) "The Eye of the Terminator." *Between Virtuality and Reality. Nauka i zhizn. 3, pp. 64–66* [in Russian].
12. Doroshenko V. S. Prospects for the application of the augmented reality method in foundry. *Novi materialy i tehnologiyi v mashinobuduvanni. 2017: materialy IX Mizhnar. naukovo-tehnichnoyi konf., Kiyiv, 30-31.05.2017 / Zag. red. R. V. Lyutiy, I. M. Guriya. K.: NTUU «KPI», 2017, p. 64.* [in Russian].
13. Doroshenko V. S., Berdyiev K. H. (2012) Systems of online monitoring of the state of foundry equipment with an indication of possible places of occurrence of problems [Spetsialna metalurgiya: vchora, сьогодні, завтра: materialy X Mizhnarodnoyi naukovo-praktichnoyi konferentsiyi, Kiyiv, 18 kvitnya 2012] K.: NTUU «KPI», pp. 149–151. [in Russian].
14. Management of foundry systems and processes: monograph / O. I. Ponomarenko, T. V. Lyisenko, A. L. Stanovskiy, O. I. Shinskiy; Nats. tehn. un-t "Hark. politehn. in-t". – H.: Pidruchnik NTU "HPI", 2012. 368 p. [in Russian].
15. Doroshenko V. S., Kravchenko O. V. (2013) Regression and inductive models for monitoring casting and metallurgical processes [Spetsialna metalurgiya: vchora, сьогодні, завтра: materialy XI Mizhnar. naukovo-praktichnoyi konf., Kiyiv, 23.04.2013]. K.: NTUU «KPI», pp. 172–182. [in Russian].
16. Doroshenko V., Kravchenko O., Mul O. (2013) Regression and induction methods of analysis in systems of foundry metallurgical processes monitoring / *Boundary Field Problems and Computer Simulation. Vol. 52. Riga: RTU. Pp. 37–42.* [in English].
17. Kravchenko E. V., Doroshenko V. S. Interval method for monitoring the reliability of telemetric information when monitoring the cooling process of a sand mold [Perspektivnyie tehnologii, materialy i oborudovanie v lit. pr-ve: materialy IV Mezhdunarod. nauchno-tehnich. konf., 30.09-4.10.2013] *Obsch. red. A. N. Fesenko. Kramatorsk: DGMA, 2013, pp. 90–92.* [in Russian].
18. Doroshenko V. S., Kravchenko E. V. Regression models for the description of casting processes / *Lite-2013: Materialy IX Mezhdunarod. nauchno-praktich. konf.– Zaporozhe: Zaporozh. TPP, 2013, vol. 1, pp. 65–66.* [in Russian].
19. Ivahnenko A. G. (1982) An inductive method for self-organization of models of complex systems. Kiev: «Nauk. dumka», 296 p. [in Russian].
20. Gabor D., Wilby W. R., Woodcock R. A. A universal nonlinear filter, predictor and simulator which optimizes itself by a learning process. *Proc. Inst. Electr. Engrs., vol. 108., part B, .40, 1961. Pp .85–98.* [in English]
21. Korolov V. Yu., Hodzlnskiy O. M. (2020) Development of combinatorial optimization problems on quantum computers. *Cybernetics and Computer Technologies*, no. 2. pp. 5–12. [in Ukrainian].

Received 27.08.2020

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

V. P. Kravchenko, *PhD (Engin.), Senior Research Scientist*, e-mail: sary942@ukr.net
Physico-Technological Institute of Metals and Alloys of NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

PREREQUISITES FOR CREATING A DIGITAL TWIN OF THE TECHNOLOGICAL LFC-PROCESS, ACCORDING TO THE MONITORING OF THE FOUNDRY

The modern development of digital technologies has made it possible to increase computing power and reduce the cost of their use, which made it possible to combine information technology with operational processes to create digital twins (DT) of technological processes. The DT of a Lost Foam casting (LFC) process is viewed as a digital copy to optimize its efficiency. DT contribute to the rapid development of modern companies. With the help of them, the support of technical systems is simplified, the efficiency of error and failure risk management is increased, and the stability of work is increased. The DT allows for the input data of the equipment to provide for the key parameters of the production products. DT is a virtual reproduction of the working state of a real physical object, process, system, or an entire service. It can be a virtual double of a part, product, equipment, technological process, production sites, workshops, or even factories. In fact, it is a set of mathematical models describing the state of an object and all its elements. In general, the DT includes: a geometric model of the object; a set of calculated data for parts, assemblies and the object as a whole (mathematical models that describe all physical processes occurring in the object); as well as information on technological processes of manufacturing and assembly of individual elements; some data about the tests of the object, for example, the readings of the sensors, by which the calculated data can be confirmed. Thus, the DT allows in virtual space to simulate the change in the state and characteristics of the entire product when the characteristics of any of its elements or technological operations of its production change. The systems of remote monitoring of the technological process parameters for the central hall of the casting shop according to the LFC process are considered, as well as methods for their rational solution on the theoretical basis of modern applied mathematics.

Keywords: foundry process, digital twin, monitoring, information technology, LFC process, one-time patterns.