

О.В. ТОКОВА, мол.наук. співробітник
Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних технологій та систем
НАН та МОН України, просп. Глушкова, 40, Київ 03187, Україна,
ten327@ukr.net

ЗАДАЧА ПОБУДОВИ КОМП'ЮТЕРНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕРМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ЛИВАРНОГО ВИРОБНИЦТВА

Проведено огляд існуючих підходів, методів та засобів моделювання термічних процесів в галузі ливарного виробництва. Виділено задачі, що виникають при моделюванні термічних процесів формування та охолодження виливка. Розроблено структурні схеми модулів комп'ютерної технології підтримки рішень ливарника у процесі лиття. Окремі модулі технології застосовано для розв'язання реальних задач моделювання залежності температури охолодження виливка від його режимів та розпізнавання кривих охолодження.

Ключевые слова: ливарне виробництво, лиття, лиття, інформаційні технології, комп'ютерне моделювання, індуктивне моделювання.

Вступ

Лиття є найпоширенішим і найпростішим способом отримання готових деталей з металів та сплавів. Це процес в якому беруть участь різні перетворення, йому притаманний ризик виникнення дефектів у виливках. В залежності від складових виливка та режимів його охолодження можна отримати продукт різної якості та структури.

Якість виливка залежить від багатьох факторів. Наприклад, при нагріванні та змішуванні різних металів властивості сплаву змінюються. При правильному підборі пропорцій домішок можна отримати сплав певної якості. Для цього ливарнику потрібно знати, які хімічні перетворення відбуваються при змішуванні різних компонент сплаву, а також він повинен володіти інформацією про режими охолодження заданого сплаву, адже різні домішки реагують порізно на певні режими охолодження, внаслідок чого ливарники можуть отримати виливок різної міцності та якості.

На ливарному виробництві проводять експерименти та виконують експрес-аналізи, які до-

помагають встановити характеристики майбутнього виробу: міцність, пористість тощо. Так, наприклад, у Фізико-технічному інституті металів та сплавів (ФТІМС) НАН України у процесі застигання виливка експерти впливають на майбутній виріб різними режимами охолодження: продувка, додавання певної кількості води, вібрація та інше, використовуючи при цьому свою експериментальну установку, яку розробили спеціально для дрібносерійного виробництва. Таке виробництво призначене для виготовлення різної продукції малими партіями різноманітного асортименту, що найчастіше вимагає різного набору і послідовності технологічних операцій. Цей тип процесу найбільше відповідає виробництву невеликих партій продукції, які можна виготовити за допомогою декількох етапів [1].

Дрібносерійне виробництво використовується також на науково-дослідних установках, де розробляються та апробуються нові підходи до підвищення якості виливків, наприклад як у ФТІМС, вчені якого використовують власну експериментальну установку.

Використання інформаційних технологій на українських ливарних підприємствах — це внесення коректив у структуру виробничого процесу та корекція існуючих застарілих програмних комплексів, які в даний час використовуються у виробництві металопродукції.

Орієнтуючись на кращі іноземні інформаційні технології, виявляючи їх переваги та недоліки, принципи та методи, за допомогою яких вони діють, стає можливим створити власну технологію, виділивши основні етапи роботи з розплавом та його подальшу обробку. Моделювання процесу лиття дозволить прогнозувати якість та розміри ливарних виробів перед виробництвом, що суттєво зменшить процес переробки продуктів, допоможе визначити можливість утворення дефектів і усунути їх, визначити хімічний склад і механічні властивості виливка.

Тому *метою* даної статті є розробка вимог до технології підтримки рішень ливарника і визначення задач, які вона повинна розв'язувати, а також який результат та в якому вигляді повинна видавати.

Провідна роль термічних процесів при виготовленні виливка

Ливарне виробництво — це технологічний процес виготовлення виливків, що полягає в заповненні ливарної форми розплавленим матеріалом, металом чи сплавом та в подальшій обробці отриманих після затвердіння виливків.

Виливком називається заготовка виробу або готовий виріб, отриманий при заливанні рідкого матеріалу в ливарну форму, в якій він твердіє.

Основними методами оцінки якості виливка в ливарному виробництві є термічний та хімічний аналіз, проведення випробувань для визначення швидкості та режимів охолодження виливка. Серед цих методів термічний аналіз є найбільш відомим методом, що використовується дуже давно, і в той же час найбільш розробленим як в теоретичному, так і в експериментальному плані.

Термічний аналіз — це сукупність методів визначення температур, за яких відбуваються процеси, що супроводжуються або виділенням

тепла (наприклад, кристалізація з рідини) або його поглинанням (наприклад, плавлення, термічна дисоціація) [2]. В статті розглядатимуться тільки термічні процеси охолодження виливка, які відбуваються після розплавлення сировини при застиганні його в формі під впливом різних режимів охолодження.

Зростаючий інтерес багатьох галузей промисловості до чавуну передбачає необхідність проведення досліджень з оптимізації хімічного складу і технології виготовлення з метою отримання матеріалу, який характеризується найбільш придатними механічними властивостями. Використання сучасних методів дослідження сплавів у реальному часі дозволяє досягти контролю над процесом кристалізації та зробити можливим поліпшення якості сплавів.

Візуальний метод термічного аналізу процесу кристалізації з рідини полягає у спостереженні та вимірюванні температури першої появи неоднорідності (наприклад, випадання кристалів у досліджуваному середовищі при її охолодженні). Більш загальним є метод побудови кривих *час—температура*. За відсутності перетворень крива охолодження йде плавно; перетворення відображаються появою на кривій зламів або горизонтальних ділянок (зупинок).

Найбільш точний диференційний метод термічного аналізу [2], за яким охолодження досліджуваного об'єкта ведуть разом і в одних й тих же умовах з речовиною-еталоном, яка в умовах досліду не має перетворень. У цьому випадку на одному і тому ж графіку записують і криву *час—температура*, і криву *час—різниця температур* об'єкта й еталона. Ця різниця є при будь-якому перетворенні досліджуваного об'єкта, що відбувається з виділенням тепла. Про характер перетворень судять за виглядом кривої охолодження, а за диференціальною кривою визначають температуру перетворення. Для запису кривих охолодження використовують самописні прилади — електронні (автоматичні) потенціометри, оптичні пірометри.

За допомогою термічного аналізу розв'язується завдання отримання кількісних характеристик (наприклад, фазовий склад, теплота реакції) [2] при охолодженні досліджуваних об'єктів.

Термічний аналіз широко застосовується при вивченні сплавів металів та інших сплавів.

На основі теоретичного аналізу систем фазової рівноваги та практичних вимірювань у промислових умовах можна визначити залежність між температурою фази зародження, температурою солідуса, швидкістю охолодження та хімічним складом сплаву та його властивостями [3]. Особливістю цього методу є короткий час, в який можна отримати дані для оцінки матеріалу тесту. Аналіз теплового виходу може забезпечити корисну кількісну та якісну інформацію, яку важко або неможливо отримати іншими методами. Перевагою цього методу є здатність оцінювати не тільки хімічний склад сплаву але й процес вимірювання багатьох деталей кінетики кристалізації. Отримання інформації в такий короткий час (2—5 хвилин) дозволяє швидко прийняти рішення про поліпшення якості сплаву.

В [4] термічний аналіз і мікроструктура зварного алюмінію 6061 використовуються при різних умовах охолодження. Робочий блок для повільного охолодження розроблений шляхом розміщення графітового тигля в камері кавернозної ізоляції. Розроблено нормальний стан швидкості охолодження, що дозволяє застигати розплаву при кімнатній температурі. Прискорений стан швидкості охолодження досягався шляхом застосування примусового потоку повітря через графітовий тигель.

Ливарне устаткування для дрібносерійного виробництва та задача його комп'ютеризації

Сьогодні виготовлення виливків проводиться багатьма способами, але в умовах одиничного, дрібносерійного і навіть серійного виробництва переважну кількість (до 85%) їх отримують методом заливки в разові форми з піщано-глинистими сумішми. Перевагами дрібносерійного виробництва є: швидкість, наочність та вибір різних матеріалів або прототипів.

В [5] розроблено нову концепцію реконструкції ливарних цехів невеликої потужності — продуктивністю від 500 до 3000 т виливків на рік на базі двох прогресивних процесів

лиття: за газифікованими моделями (ЛГМ) і з вакуум-плівковим формуванням (ВПФ). Ці процеси дозволяють значно розширити можливість ливарного цеху, забезпечивши високу якість виливків. Відомо, що найкращі показники універсальності, що забезпечують високу якість виливків, мають автоматичні формувальні лінії (АФЛ), де піщано-глиниста суміш ущільнюється повітряним потоком (імпульсом) з подальшим гідравлічним пресуванням багаторунжерною голівкою. На сучасних АФЛ отримують виливки будь-яких серій — одночасно одиниці одних, сотні й тисячі інших виливків різноманітних конфігурацій і розмірів. Проте такі лінії мають дуже високу вартість.

У ФТІМС у відділі фізико-хімії процесів лиття фахівцями розроблений комплекс експериментального устаткування, наведений на рис. 1 [6—8]. Там розроблена методика проведення експериментів, що полягає у проведенні термічного аналізу твердіння і охолодження виливка в контейнерній вакуумованій піщаній формі, в якій методом ЛГМ охолоджували циліндричний чавунний виливок, моделюючи ливарний технологічний процес.

Досліджувався процес охолодження чавунного виливка при різних режимах охолодження. Метою таких досліджень є досягнення певної якості готового чавунного продукту, який був би міцним і відповідав би заданим властивостям. Проведено вимірювання температури охолодження зазначеного виливка при різних характеристиках дисперсного наповнювача форми і застосовуючи різні режими впливу на нього.

На рис. 2 схематично зображено контейнерну форму в розрізі з незаповненою робочою порожниною при виготовленні форми з піщано-глиняної суміші [6].

На рис. 2 позначено: 1 — мановакууметри; 2 — заливальна воронка; 3 — випар виливкязразка; 4 — синтетична плівка (або металева герметична кришка); 5 — сітка трубки-подачі або відсмоктування повітря; 6 — манометр надлишкового тиску; 7 — регулюючі вентилі; 8 — сипучий наповнювач; 9 — сітчасте днище для вертикального відсмоктування повітря; 10 — вогнетривка підставка.

У цій формі проводили вимірювання температури охолодження виливка, змінюючи характеристики дисперсного наповнювача форми і застосовуючи різні режими впливу на нього. Розплав чавуну СЧ20 заливається у заливну воронку 2 (рис. 1) та охолоджується під дією різних режимів. Застосовуються такі режими охолодження виливка:

- у сипучий наповнювач (8) додається різна кількість води, наприклад 200 г;
- може відбуватися продувка або відсмоктування повітря (5);
- може використовуватися продувка піску через регулюючі ventилі (7).

Впливаючи на швидкість охолодження виливка можна добитися різних властивостей готового продукту. Нижче буде наведено моделі залежності температури охолодження сталевого виливка від часу тривання процесу із застосуванням різних режимів ливарної установки.

Основним напрямком удосконалення будь-якого виробництва є модернізація відомих і створення нових технологічних процесів з метою зменшення споживання матеріалів, зниження енерго- і трудових витрат, поліпшення умов праці, усунення або зменшення шкідливого впливу на навколишнє середовище. Все це в кінцевому підсумку підвищує ефективність виробництва та випуску продукції [9].

Огляд існуючих програмних продуктів у галузі моделювання термічних процесів охолодження виливка

Сьогодні розроблено багато програмних продуктів, що автоматизують процес лиття, допомагають фахівцям у роботі майже на всіх етапах виробництва. Але, нажаль, ці програмні продукти орієнтовані на виробництво великого масштабу, їх використовують на таких великих заводах як Криворіжсталь та ін.

В [10] проведено огляд існуючих програмних продуктів, що використовуються у ливарному виробництві, їх особливості та функціональні можливості. Цей огляд показав, що розроблено ряд програмних продуктів для вирішення осно-



Рис.1 Комплекс експериментального устаткування

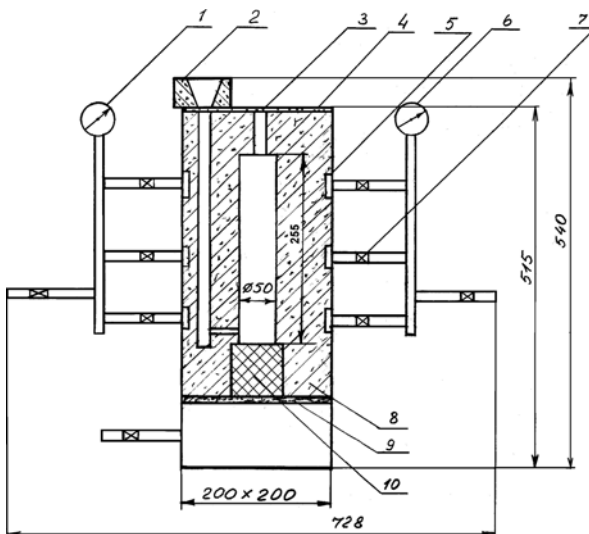


Рис.2. Контейнерна форма в розрізі

вних проблем, які виникають в процесі виробництва виливків, але вони не можуть бути використані на багатьох підприємствах України. Тому існує потреба розроблення зручного у використанні та доступного програмного продукту для розв'язання задач аналізу даних та моделювання.

В [11] проведено порівняльний аналіз найбільш поширених комп'ютерних систем для моделювання фізичних процесів, що супроводжують ливарні технології. У програмах використовують різні обчислювальні методи та математичні алгоритми, фізичні моделі, які задовольняють певним потребам замовника. Лише порівнянням результатів промислових та експериментальних дослідів можна оцінити точність та якість програмного продукту.

В [12] проведено огляд методів моделювання та моделей термічних процесів у ливарному виробництві. Показано, що математичне моделювання має широке застосування для розв'язання задачі моделювання термічних процесів.

Здійснено математичне моделювання теплових процесів, пов'язаних зі зняттям перегріву розплаву, твердінням та наступним охолодженням порожнинного циліндричного виливка, що виготовляється методом відцентрового лиття в масивний металевий кокіль [13].

В [14] для обробки даних та прогнозування властивостей сплаву за заданим хімічним складом використовується нейронна мережа, що дозволяє оптимізувати склад сплаву за властивостями. Для ливарного виробництва найкращим алгоритмом настроювання нейромережі є алгоритм зворотного поширення помилки. Для побудови нейронно-мережевої моделі сплаву, яка включатиме хімічний склад, задані властивості, вартісну оцінку отримання металу, необхідна база експериментальних даних, на основі якої будується модель. Далі можна побудувати графіки впливу хімічних властивостей на різноманітні фізико-механічні властивості, можлива також оптимізація сплаву з урахуванням заданих властивостей.

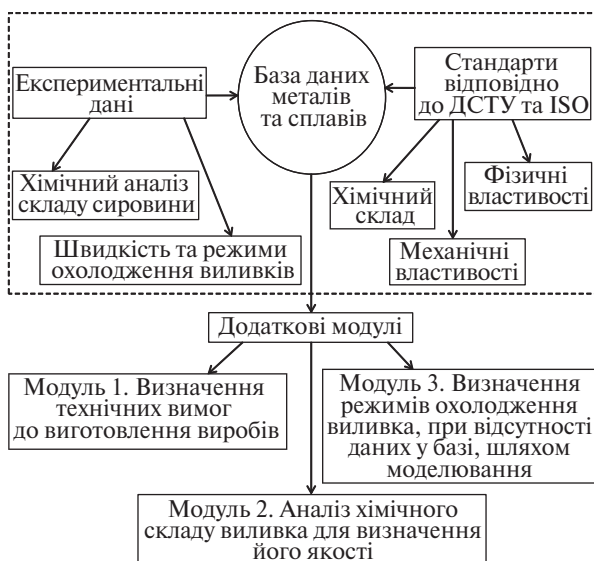


Рис. 3. Загальна схема програмного комплексу з додатковими модулями

Вимоги до комп'ютерної технології моделювання термічних процесів

Для того щоб автоматизувати деякі етапи процесу лиття, допомогти фахівцям спростити цей процес та замінити проведення вартісних експериментів їх моделюванням для оцінки впливу різних факторів на виливок в процесі вистигання, запропоновано розробити технологію, орієнтовану на підтримку рішень ливарника в процесі охолодження виливка.

Передбачається, що технологія, яка розробляється, буде розв'язувати такі задачі:

- вибір з бази даних (БД) технічних вимог та рекомендацій щодо проектування технології виготовлення виливків відповідно до ДСТУ та ISO;
- проведення хімічного аналізу сировини для оцінювання можливості отримання виливка належної якості;
- визначення режимів охолодження виливка за відсутності у БД експериментальним шляхом.

Планується розробити програмний продукт, який буде складатися з модулів, що будуть розв'язувати ці задачі.

Модулі планується розробити за допомогою мови *VBA MS Excel*. Такий програмний комплекс можна буде легко встановити на будь-якому комп'ютері, де встановлений *Windows* та *MS Office*. Враховуючи, що дані моніторингу за процесом знаходяться у базі *Excel* або легко туди імпортуються, такий продукт буде зручним у використанні і не буде потребувати спеціального навчання для його використання.

Планується розроблення програмного комплексу, в основі якого будуть БД металів та сплавів зі стандартними вимогами до механічних, фізичних та хімічних властивостей металів і сплавів України (відповідно до ДСТУ та ISO) та БД з експериментальними даними про хімічний склад та криві охолодження різних сплавів та БД з різними режимами охолодження для різних виливків та методів лиття. Схематично програмний комплекс зображено на рис. 3.

Комплекс буде доповнено додатковими модулями такими як: модуль 1 — проведення експериментів з визначення хімічного складу ком-

понент сировини для визначення якості виливка з можливістю занесення отриманих даних до відповідної бази, модуль 2 — визначення галузі застосування цільового виробу та модуль 3 — проведення експериментів з визначення кращих умов і режимів охолодження виливка, дані про який відсутні у базі.

Функція Модуля 1 (рис. 4) — проектування технології виготовлення продукції відповідного призначення за технічними вимогами замовника.

Тут наводиться інформація про продукцію (конструкторські креслення з назвою заготовки) та технологію його виготовлення з можливістю доповнювати БД новими даними. Можна визначити галузь використання литих деталей з подальшим переходом у підгалузі, де можна самостійно обрати певний продукт та отримати інформацію про його технічні вимоги відповідно до ДСТУ: визначення сировини, вибір методу лиття, відомості про хімічний склад продукту, вимоги до їх фізичних та механічних властивостей, надання рекомендацій щодо швидкості та режимів охолодження, відповідно до існуючих стандартів (ДСТУ та ISO). Після налаштування всіх необхідних параметрів і критеріїв, фахівець може перейти до режиму проектування технології виготовлення продукції відповідного призначення за технічними вимогами замовника.

Головна функція Модуля 2 (рис. 5), який буде інтегрований з БД металів та сплавів, полягатиме у визначенні невідомих компонент сировини за хімічним складом, який одержується за допомогою спектрального експрес-аналізу.

Отримані дані порівнюються з наявними у базі даних та обирається найбільш схожа за складом сировина. При потребі, склад досліджуваного розплаву можна коригувати, додаючи до нього необхідні компоненти у належних пропорціях, орієнтуючись на відомі властивості виливків при заданому складі сировини. Функції Модуля 2 ливарник може використовувати і для простого визначення хімічного складу шихти без подальшого його використання на момент проведення експерименту. В такому випадку він може зберегти отримані результати в БД. Далі такий зразок маркірується і відноситься на склад.

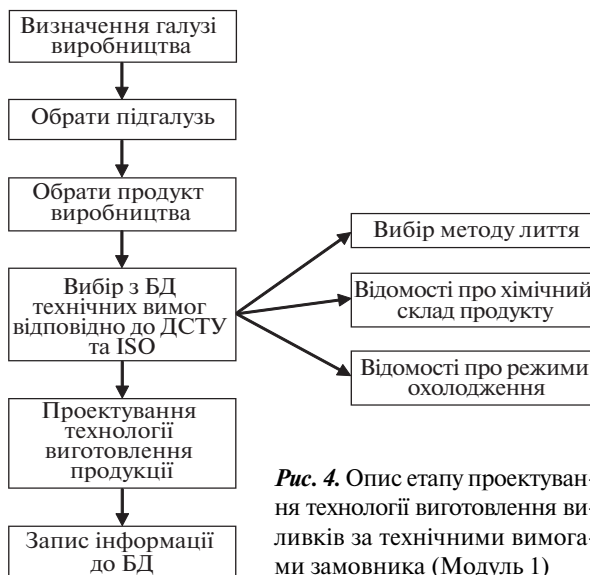


Рис. 4. Опис етапу проектування технології виготовлення виливків за технічними вимогами замовника (Модуль 1)

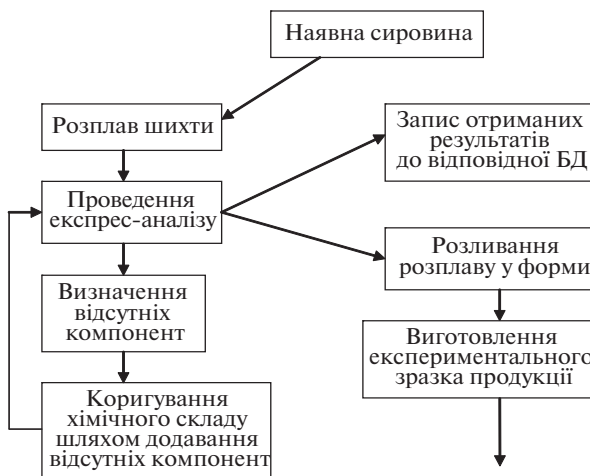


Рис. 5. Опис завдань супроводу ливарника щодо прийняття рішень з оцінки хімічного складу невідомого сплаву та визначення його якості (Модуль 2)

Спектрометри призначені для проведення кількісного експрес-аналізу хімічного складу сталей. Спектральний експрес-аналіз досліджує світло, яке виділяється або поглинається розплавом. Наявність характеристичних ліній у вимірюваному спектрі дозволить робити висновки про наявність або відсутність тих чи інших хімічних елементів у пробі. За величиною інтенсивності (яскравості) ліній вимірюваних елементів можна зробити висновки про концентрацію цих елементів. Завдяки градуюванню, побудованому



Рис. 6. Модуль 3 — рекомендації щодо вибору доцільного режиму охолодження

зі стандартних зразків з відомими концентраціями елементів, стає можливим проведення точного кількісного аналізу навіть тих зразків, елементний склад яких заздалегідь невідомий.

Модуль видаватиме рекомендації щодо еквівалентних матеріалів та їх властивостей. Це дозволить не проводити додаткові експерименти та уникати утворення бракованих виробів.

Модуль 3 призначений для аналізу та вибору режимів охолодження виливка для впливу на якість майбутнього виробу.

Механічні та фізичні властивості металів та сплавів, тобто якість готових виробів, визначаються не лише хімічним складом, а й швидкістю охолодження розплаву, яка впливає на структуру майбутнього виливка. Даний модуль визначатиме найкращі режими охолодження виливка шляхом побудови кривих охолодження розплаву та порівняння їх з еталонними, що містяться в БД. Це дозволить прогнозувати технологічні та експлуатаційні властивості сплавів. Якщо відомості про режими та швидкість охолодження відсутні, фахівець зможе провести потрібні дослідження, проаналізувати отримані дані та побудувати нові криві охолодження. Знаючи технічні вимоги до продукту, фахівець може обрати найкращий режим охолодження.

Стрімкий розвиток різних галузей виробництва на яких використовуються продукти лит-

ва вимагає від технологів розроблення сплавів підвищеної якості. Важливими критеріями залишається надійність сплавів, його зносостійкість, міцність, витримка більших механічних та теплових навантажень, збільшення ресурсу виробу, зменшення вартості сировини, а в подальшому самого виробу. Тому модифікація відомих сплавів є важливим елементом у підвищенні рівня експлуатаційних властивостей.

Приклади розв’язання окремих задач моделювання термічних процесів

Моделювання температури охолодження виливка за комбінаторним алгоритмом МГУА. У ФТІМС НАН України проведено низку експериментів з вимірювання зміни температури охолодження в часі для різних зразків металів та сплавів. Дані для проведення досліджень були надані фахівцями з цього інституту. У [15] за допомогою технології, що розробляється, розв’язано задачу пошуку моделі залежності температури охолодження циліндричного виливка з чавуну СЧ 20 в піщаній формі від параметрів режиму його охолодження для подальшої оптимізації цього режиму.

Виливок з чавуну СЧ 20 розплавили та охолоджували. Через кожні 2400 секунд (40 хвилин) від початку охолодження виливка вимірювали його температуру (при різних умовах охолодження). Дані заносились до MS Excel та будувались графіки охолодження. За цією моделлю можна буде визначити проміжну температуру, яка вимірюється через певний проміжок часу (в нашому випадку через кожні 40 хв.) в процесі кристалізації і охолодження виливка, при заданих режимах охолодження, знаючи початкову температуру виливка.

Проміжна температура потрібна для відстеження залежності структури застигаючого розплаву від швидкості охолодження в конкретний момент часу. Контролюючи процес охолодження протягом всього часу, можна прискорювати, або навпаки, сповільнювати процес перетворення у виливок.

Побудувавши оптимальну модель залежності проміжної температури охолодження (виміря-

ної через 40 хвилин від початку процесу) від параметрів ливарної установки, можна підбирати різні режими охолодження для різних значень початкової температури або, навпаки, прогнозувати якість виливка за заданими режимами охолодження. Відомості про температуру виливка у різний час охолодження дають змогу коригувати і підбирати режими охолодження для отримання якісного кінцевого продукту. При безперервному охолодженні час розпаду і температура перетворення аустеніту залежатиме від швидкості охолодження. Чим вище швидкість охолодження, тим раніше і за нижчих температур почнеться розпад аустеніту. Перетворення відбуватиметься і в часі, і в інтервалі температур.

У ФТІМС НАН України в *MS Excel* створено базу даних різних способів охолодження з різними швидкостями охолодження для різних виливків і способів лиття. Різні способи охолодження залежать від кількості холодагентів, що подаються в піщану форму, способів та інтенсивності створюваного конвективного тепловідведення. На основі цих даних побудовано моделі на основі комбінаторного алгоритму МГУА [16–17], що відображають залежність проміжної температури процесу охолодження виливка від параметрів, які на нього впливають, що дає змогу оптимізації режиму охолодження виливка для забезпечення заданої якості.

Дані містили такі змінні: y — проміжна температура, x_1 — початкова температура, x_2 — час, x_3 — наявність вібрації, x_4 — наявність вакуумування, x_5 — продувка через верхній кран, x_6 — продувка через середній кран, x_7 — продувка через нижній кран.

На основі цих даних складено вибірку, яка містила оцифровані значення різних режимів охолодження виливка для експериментів, які мали задовільний кінцевий результат, визначений експертами. Відібрано 15 експериментів з задовільним кінцевим результатом серед 50. Значення окремих змінних визначено так: за наявності вібрації та вакуумування записано час їх проведення, а при застосуванні продувки значення «1» означає її наявність, «0» — її відсутність.

Для побудови моделей застосовано комбінаторний алгоритм МГУА. В [15] розглянуто

чотири варіанти побудови моделей: без масштабування даних та з його застосуванням.

Серед лінійних моделей кращою виявилась лінійна модель:

$$Y = 0,4425 + 1,0256x_1 - 0,5135x_2 + 0,0139x_3 - 0,0233x_4 + 0,0448x_7.$$

В [16] за точністю порівняно лінійні та нелінійні моделі, та показано, що кращою виявилась нелінійна модель:

$$Y = 0,914 - 0,557x_2 - 0,009x_3 - 0,003x_4 + 0,034x_7 + 0,605x_1^2.$$

Результати моделювання для лінійної та нелінійної моделей представлені в графічній формі на рис. 7.

Два останні значення за кожною моделлю отримано на екземаційних даних, які не використовувались при побудові моделі.

Аналіз отриманих моделей показав, що змінна x_1 входить до обох моделей — зрозуміло, що проміжна температура залежить від початкової. Різниця між структурами лінійних і нелінійних моделей полягає насамперед у тому, що нелінійна модель, на відміну від лінійної, містить додатковий член — x_4 (наявність вакуумування), що дозволяє врахувати всі параметри режиму охолодження литва в єдиній моделі. Моделі схожі за точністю і змінними, які увійшли в модель, але нелінійна краща для управління процесом охолодження, оскільки в неї увійшов квадрат початкової температури охолодження x_1^2 , що при керуванні цим процесом дозволяє швидше досягти кінцевого результату.

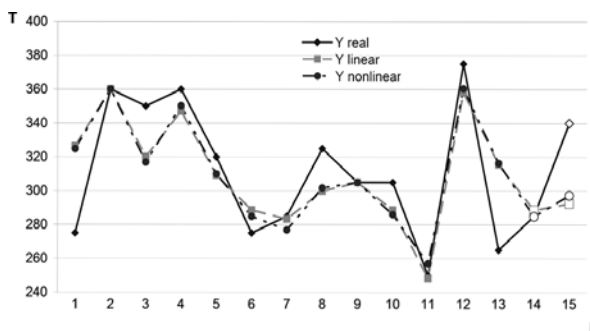


Рис. 7. Порівняльні графіки точності лінійної та нелінійної моделей

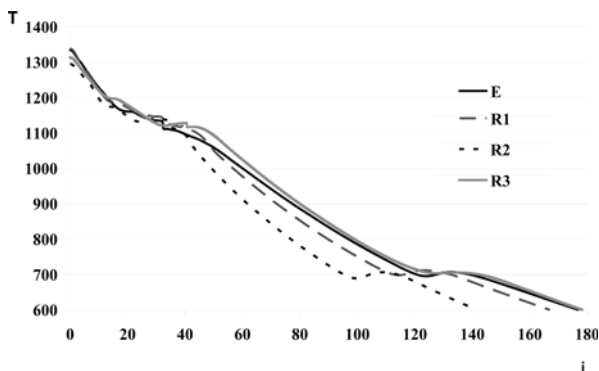


Рис. 8. Реальні графіки кривих охолодження: експериментальна (E) та три референтні криві (R1–R3)

Цю модель можна використовувати для вибору найкращого режиму охолодження: при зміні різних параметрів можна обчислити проміжну температуру так, щоб вона потрапляла в заданий інтервал для зазначеного металу або сплаву.

Після побудови такого типу оптимальних моделей з використанням МГУА для залежності температури охолодження (або інших характеристик) від параметрів роботи ливарної установки, можна вибрати різні режими охолодження для заданої проміжної або кінцевої температури виливання або, навпаки, прогнозувати якість литва для заданого режиму охолодження.

Порівняння кривих охолодження для розпізнавання якості литва. В [17] досліджено задачу визначення якості литого виробу шляхом оцінки близькості експериментальної кривої його охолодження до однієї з референтних кривих (рис. 8). Референтною кривою називають таку криву зміни температури охолодження вилівка в часі, для якого відомі та внесені у БД фізичні та механічні властивості.

Удосконалено так званий універсальний метод термічного експрес-аналізу рідких спла-

Таблиця 1. Результати розрахунків

Референтні криві охолодження	DM	DA	DC
R1	19,17	15,27	5,47
R2	45,85	46,80	4,84
R3	12,98	10,44	1,34

вів [18], який ґрунтується на визначенні геометричної подібності експериментальної та еталонних кривих охолодження, що містяться в електронній базі даних, з автоматичною ідентифікацією ідентичної еталонної кривої.

Порівнювались три варіанти розрахунку близькості між кривими:

- шляхом обчислення середньоарифметичної суми модулів різниці температур кривих а та b для експериментальних даних, що представляють криві у всіх точках вимірювання:

$$DM_{ab} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |T_{ai} - T_{bi}|. \quad (1)$$

- коли кожна з експериментальних кривих а та b апроксимується поліномом другого степеня $\hat{y} = f(T) = c_0 + c_1T + c_2T^2$ та обчислюється середньоарифметична сума модулів різниці значень розрахованої температури \hat{y} у всіх точках вимірювання:

$$DA_{ab} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\hat{y}_{ai} - \hat{y}_{bi}|. \quad (2)$$

- новий запропонований метод, який ґрунтується на обчисленні коефіцієнтів апроксимації кривих охолодження поліномами другого степеня та знаходженні міри відстані між ними шляхом обчислення суми модулів різниці цих коефіцієнтів:

$$DC = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l |c_{iE} - c_{iR}|. \quad (3)$$

Застосовуючи три варіанти розрахунку відстані між кривими, отримано результати віднесення кривої, яка описує процес охолодження вилівка невідомого складу до однієї з трьох наявних у БД референтних кривих, що описують процес охолодження вилівоків, склад яких відомий, для порівняння за мінімумом відстані. Ці результати наведено у табл. 1. Відстань між кривою E, що досліджується, та трьома референтними кривими (R1–R3) у всіх точках вимірювання отримано за трьома варіантами: DM за першим варіантом, DA — за другим, DC — за третім.

З табл. 1 видно, що всі три показники дають однаковий результат розпізнавання: експериментальна крива E визначається як найближча до еталонної кривої R3. Дослідження, проведене в [17] показало, що новий метод на основі

коефіцієнтів робить рішення більш надійним, крім того, він значно зменшує час розрахунків.

Висновки

Сформульований у статті підхід до побудови комп'ютерної технології моделювання термічних процесів дозволить розробити програмну систему, яка допоможе фахівцю-ливарнику отримати необхідну інформацію для розв'язання таких завдань: можливість вироблення цільового сплаву з наявних сировинних компонент, вибір оптимального режиму

охладження, передбачення структури продукту лиття, його пористість і теплопровідність у залежності відрізних режимів охолодження.

Планується, що запланована технологія буде орієнтовна на дрібносерійне виробництво, складатиметься з бази даних, наповненої інформацією про хімічні та фізико-механічні властивості металів, швидкість і параметри охолодження виливка, про показники експериментів, які вже проводились на виробництві, а також міститиме блоки побудови моделей термічних процесів охолодження виливків та аналізу отриманих результатів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Характеристика виробничих систем. Вплив типу виробництва на організаційну структуру управління. https://pidruchniki.com/11141122/menedzhment/harakteristika_virobnichih_sistem_vpliv_tipu_virobnitstva_organizatsiynu_strukturu_upravlinnya.
2. Электронный справочник: Термический анализ. <http://www.chemport.ru/thermalanalysis.shtml>.
3. Діаграми стану подвійних сплавів. <https://helpiks.org/2-107087.html>.
4. *Benjunior B., Ahmad A.H., Rashidi Maarof Mohd, Reza M.S.* Effect of Different Cooling Rates Condition on Thermal Profile and Microstructure of Aluminium 6061. *Procedia Engineering*. Volume 184, 2017, pp. 298–305.
5. О новой концепции мелкосерийного литейного производства https://studbooks.net/1855982/tovarovedenie/povoyu_kontseptsii_melkoseriyного_liteynogo_proizvodstva.
6. *Дорошенко В.С.* Теоретичні і технологічні основи отримання піщаних форм із сухого дисперсного наповнювача для виробництва легковагих литих конструкцій, дис. д-ра техн. наук: 05.16.04. Київ, 2018. 404 с.
7. *Дорошенко В.С., Кравченко В.П.* Лабораторные исследования теплообмена отливки с песком литейной формы при применении хладагента и вынужденной конвекции. *Современная лаборатория*, № 1, 2010. С. 18–24.
8. *Дорошенко В.С., Шинский О.И., Кравченко В.П.* Интенсификация теплообмена отливки с дисперсным наполнителем литейной формы при применении хладагента и вынужденной конвекции. *Процессы литья*, № 5, 2009. С. 74–82.
9. *Сушко Т.И., Хоанг В.Х., Попов С.В., Пашнева Т.В.* Компьютерное моделирование как аспект ресурсосберегающих технологий при выборе оптимального способа литья. *Научный альманах*, N 5–3(31), 2017.
10. *Кравченко О.В., Савченко Є.А.* Розробка інформаційної технології моніторингу процесів ливарного виробництва. Індуктивне моделювання складних систем. Збірник наукових праць. К.: МННЦ ІТС, вип. 7. 2015. С. 140–146.
11. *Токова О.В., Савченко Є.А.* Підхід до розроблення системи інформаційної підтримки рішень у ливарному виробництві. Індуктивне моделювання складних систем. Зб. наук. праць. К.: МННЦ ІТС, вип. 8. 2016. С. 194–202.
12. *Токова О.В.* Огляд методів та засобів комп'ютерного моделювання процесів ливарного виробництва. Індуктивне моделювання складних систем. Зб. наук. праць. К.: МННЦ ІТС, вип. 9. 2017. С. 204–213.
13. *Андрєєв В.І., Дихта Л.М., Клименко Л.П.* Математичне моделювання процесів твердіння та охолодження порожнинного циліндричного виливка при відцентровому литті в масивний кокіль. *Комп'ютерні технології. Наукові праці*, Том 35, вип. 22, С. 59–69.
14. *Долгополов Л.Б., Тухватулин Г.Х.* Использование нейросетевой обработки данных в литейном производстве. *Литейные процессы* № 14, 2015, С. 99–105.
15. *Савченко Є.А., Кравченко О.В.* Застосування індуктивного підходу для моделювання процесу охолодження виливка за експериментальними даними. Індуктивне моделювання складних систем. К.: МННЦ ІТС, вип. 6. 2014. С. 126–136.
16. *Степашко В.С.* Комбинаторный алгоритм МГУА с оптимальной схемой перебора моделей. *Автоматика*. 1981. №3. С. 31–36.
17. *Ивахненко А.Г., Савченко Е.А., Ивахненко Г.А., Надирадзе А.Б., Рогов А.О.* Обнаружение закономерностей взаимодействия ионов с поверхностью материалов по комбинаторному алгоритму МГУА. *Проблемы управления и информатики*, № 2, 2003, С. 80–89.
18. *Tokova, O., Savchenko, Ye.* Inductive Modelling as a Basis of Informational Support of Decisions in Casting Production. *Proceedings of the XII IEEE International Conference CSIT-2017 & International Workshop on Inductive Modeling*, Sept. 5–8, 2017, Ukraine, Lviv: Publisher “Vezha&Co”, 2017, pp. 507–510.

19. Savchenko Ye., Stepashko V., Tokova O. A new method of comparing cooling curves to recognize the casting quality. Proceedings of the IEEE 13th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies, CSIT 2018. Sept. 11–14, 2018, Ukraine, Lviv: Publisher “Vezha&Co”, 2018, pp. 457–460.
20. Захарченко Э.В., Жуков Л.Ф., Сиренко Е.А., Богдан А.В., Гончаров А.Л., Кравченко Е.В. Усовершенствование универсального метода термического экспресс-анализа жидких чугунов, основанного на распознавании формы кривых охлаждения. Процессы литья. 2015. № 2. С. 3–9.

Поступила 04.12.2018

REFERENCE

1. Characteristics of production systems. A typical organization of the governing bodies is ahead. [online] Available at: <https://idruchniki.com/11141122/menedzhment/characteristics_virobnichih_sistem_vpliv_tipu_virobnitstva_organizatsiyu_strukturu_upravlinnya> [Accessed 16 Oct. 2018]. (In Ukrainian).
2. Electronic Directory: Thermal Analysis. [online] Available at: <http://www.chemport.ru/thermalanalysis.shtml>> [Accessed 16 Oct. 2018]. (In Russian).
3. Diagrams of the state of double alloys. [online] Available at: <https://helpiks.org/2-107087.html>> [Accessed 16 Oct. 2018]. (In Ukrainian).
4. Benjunior B., Ahmad A.H., Rashidi Maarof Mohd, Reza M.S. Effect of Different Cooling Rates Condition on Thermal Profile and Microstructure of Aluminium 6061. Procedia Engineering. Volume 184, 2017, pp. 298–305.
5. On the new concept of small-scale foundry [online] Available at: https://studbooks.net/1855982/tovarovedenie/novoy_kontseptsii_melkoseriyynogo_liteynogo_proizvodstva> [Accessed 16 Oct. 2018].
6. Doroshenko, V.S., 2018. Theoretical and technological bases for obtaining sandy forms from a dry dispersed filler for the production of lightweight cast structures, diss. Dr. Tech. Sciences: 05.16.04. Kyiv, 404 p. (In Ukrainian).
7. Doroshenko, V.S., Kravchenko, V.P., 2010. “Laboratory studies of heat transfer casting with sand casting in the application of refrigerant and forced convection”. Modern Laboratory, 1, pp. 18–24. (In Russian).
8. Doroshenko, V.S., Shinsky, O.I., Kravchenko, V.P., 2009. “Intensification of casting heat exchange with a dispersed filler of a mold when using a refrigerant and forced convection”. Casting processes, 5, pp. 74–82. (In Russian).
9. Sushko, T.I., Hoang, V.Kh., Popov, S.V., Pashneva, T.V., 2017. “Computer simulation as an aspect of resource-saving technologies when choosing the optimal method of casting”. Scientific Almanac, 5–3 (31), pp. 125–129.
10. Kravchenko, O.V., Savchenko, E.A., 2015. “Information technology of inductive modeling of casting process monitoring”. Inductive modeling of complex systems. Collected research papers, Issue 7. Kyiv: IRTC ITS NASU, pp. 140–146. (In Ukrainian).
11. Tokova, O.V., Savchenko, Ye.A., 2016. “Approach to the development of information support solutions for foundry production”. Inductive modeling of complex systems. Collected research papers, Issue 8. Kyiv: IRTC ITS NASU, pp. 194–202. (In Ukrainian).
12. Tokova, O.V., 2017. “An overview of methods and tools for computer simulation of foundry processes”. Inductive modeling of complex systems. Collected research papers, Issue 9. Kyiv: IRTC ITS NASU, pp. 204–213. (In Ukrainian).
13. Andreev, V.I., Dichta, L.M., Klimenko, L.P., 2015. “Mathematical modeling of solidification and cooling processes of cavity cylindrical casting at centrifugal casting in massive furnace”. Computer Technology. Scientific works, 35 (22), pp. 59–69. (In Ukrainian).
14. Dolgopulov, L.B., Tukhvatulyn, I.Kh., 2015. “The use of neural network data processing in the foundry”. Foundry processes number 14, pp. 99–105.
15. Savchenko, Ye.A., Kravchenko, O.V., 2014. “Application of the inductive approach for simulation of the cooling process of casting according to experimental data”. Inductive modeling of complex systems. Collected research papers, Issue 6. Kyiv: IRTC ITS NASU, pp. 126–136. (In Ukrainian).
16. Stepashko, V.S., 1981. “Combinatorial Algorithm of the Group Method of Data Handling with Optimal Model Scanning Scheme”, Soviet Automatic Control, 14 (3), pp. 24–28. (In Russian).
17. Ivakhnenko, A.G., Savchenko, Ye.A., Ivakhnenko, G.A., Nadiradze, AB, Rogov, A.O., 2003. “Determination of Regularities of Ions and Surface Interaction by Combinatorial GMDH Algorithm”. Problems of Management and Informatics, 2, pp. 80–89. (In Russian).
18. Tokova, O., Savchenko, Ye., 2017. “Inductive Modelling as a Basis of Informational Support of Decisions in Casting Production”. Proceedings of the XII IEEE International Conference CSIT-2017 & International Workshop on Inductive Modeling, Sept. 5–8, 2017, Ukraine, Lviv: Publisher “Vezha&Co”, pp. 507–510.
19. Savchenko Ye., Stepashko V., Tokova O., 2018. “A new method of comparing cooling curves to recognize the casting quality”. Proceedings of the IEEE 13th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies, CSIT 2018. Sept. 11–14, 2018, Ukraine, Lviv: Publisher “Vezha&Co”, 2018, pp. 457–460.
20. Zakharchenko, E.V., Zhukov, L.F., Sirenko, E.A., Bogdan, A.V., Goncharov, A.L., Kravchenko E.V., 2015. “Improvement of the universal method of thermal express analysis of liquid cast iron based on the recognition of the shape of the cooling curves”. Protsessy lit'ya, 2015, n 2 (110), pp. 3–9. (In Russian).

Received 04.12.2018

Tokova O. V., junior research scientist, Department for Technologies of Inductive Modelling, International Research and Training Center for Information Technologies and Systems of the NAS and MES of Ukraine, Glushkov ave., 40, Kyiv, 03187, Ukraine, E-mail: len327@ukr.net

THE TASK OF BUILDING A COMPUTER TECHNOLOGY FOR MODELING THERMAL PROCESSES OF FOUNDRY

Introduction. Improving the quality of castings is the main task of the foundry, as it provides a massive demand for cast products. The quality of the casting depends on many factors. For example, when heating and mixing different metals, the properties of the alloy change. With proper selection of the proportions of impurities, you can get an alloy of a certain quality. The caster needs to know what chemical transformations occur when mixing different components of the alloy, and he must have information about the cooling modes of a given alloy, because different impurities react differently to certain cooling modes, as a result of which casters can get castings of different strength and quality.

Purpose. Develop requirements for technology support solutions to the caster and determine the tasks that it should solve, as well as in what form it should produce a result.

Methods. Using the method of group accounting of arguments, models were constructed for the dependence of the cooling temperature of a casting on its cooling modes.

Results. The individual modules of computer technology for modeling the thermal processes of foundry production are considered. These modules allow you to solve individual problems that arise in the process of forming and cooling the casting. It is planned that the modules will be interconnected, which will allow the foundry technologist to conduct various experiments effectively.

Separate modules are applied in practice to solve the problem of finding the dependence of the cooling temperature of a casting on its cooling time, as well as recognizing the proximity of the cooling curves of castings.

Findings. Computer technology for modeling thermal processes in the field of foundry will be focused on small-scale production, which will simplify the process of producing castings and reduce the appearance of defects in foundry products during the technological process, make them more competitive.

Key words: foundry production, casting, casting, information technology, computer modeling, inductive modeling.

Токовая Е. В., младший научный сотрудник, Отдел технологий индуктивного моделирования, Международный научно-учебный центр информационных технологий и систем НАН и МОН Украины, пр. Глушкова, 40, Киев, 03187, Украина, E-mail: len327@ukr.net

ЗАДАЧА ПОСТРОЕНИЯ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕРМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Введение. Повышение качества отливок является главной задачей литейного производства, поскольку обеспечивает массовый спрос на продукты литья. Качество отливки зависит от многих факторов. Например, при нагревании и смешивании различных металлов свойства сплава изменяются. При правильном подборе пропорций примесей можно получить сплав определенного качества. Литейщику нужно знать, какие химические превращения происходят при смешивании различных компонент сплава, а также он должен обладать информацией о режимах охлаждения заданного сплава, ведь различные примеси реагируют по-разному на определенные режимы охлаждения, вследствие чего литейщики могут получить отливку различной прочности и качества.

Цель. Разработать требования к технологии поддержки решений литейщика и определить задачи, которые она должна решать, а также в каком виде она должна выдавать результат.

Методы. С помощью метода группового учета аргументов построены модели зависимости температуры охлаждения отливки от режимов его охлаждения.

Результаты. Рассмотрены отдельные модули компьютерной технологии моделирования термических процессов литейного производства. Данные модули позволяют решать отдельные задачи, которые возникают в процессе формирования и охлаждения отливки. Планируется, что модули будут взаимосвязаны между собой, что позволит технологу-литейщику эффективно проводить различные эксперименты.

Отдельные модули применены на практике для решения задачи поиска зависимости температуры охлаждения отливки от времени его охлаждения, а также распознавания близости кривых охлаждения отливок.

Выводы. Компьютерная технология моделирования термических процессов в области литейного производства будет ориентирована на мелкосерийное производство, что упростит процесс получения отливок и позволит уменьшить появление дефектов в литейных изделиях во время технологического процесса, сделает их более конкурентоспособными.

Ключевые слова: литейное производство, литье, литье, информационные технологии, компьютерное моделирование, индуктивное моделирование.