**Токова Олена Володимирівна, молодший науковий співробітник відділу інформаційних технологій індуктивного моделювання Міжнародного науково-навчального центру інформаційних технологій та систем НАН та МОН України. Назва дисертації: &laquo;Комп&rsquo;ютерна технологія розв&rsquo;язання задач індуктивного моделювання процесів охолодження металевих ливарних виробів&raquo;. Шифр та назва спеціальності: 05.13.06 - інформаційні технології. Спецрада - Д 26.171.01 Міжнародного науково-навчального центру інформаційних технологій та систем**

Національна академія Міністерство освіти

наук України і науки України

МІЖНАРОДНИЙ НАУКОВО-НАВЧАЛЬНИЙ ЦЕНТР  
ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА СИСТЕМ

Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису

**Токова Олена Володимирівна**

УДК 681.513.8: 004.8

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**КОМП’ЮТЕРНА ТЕХНОЛОГІЯ РОЗВ’ЯЗАННЯ ЗАДАЧ ІНДУКТИВНОГО  
МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ОХОЛОДЖЕННЯ МЕТАЛЕВИХ**

**ЛИВАРНИХ ВИРОБІВ**05.13.06 - інформаційні технології

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук  
Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

О. В. Токова

Науковий керівник: Степашко Володимир Семенович,

доктор технічних наук, професор

Київ 2021

**ЗМІСТ**

Перелік умовних позначень 19

[Вступ 20](#bookmark13)

[Розділ 1 Задача підвищення якості ливарних виробів на основі моделювання процесів ливарного виробництва 26](#bookmark15)

1. [Основні характеристики процесу виготовлення ливарних виробів 26](#bookmark16)

[1.1.1. Ливарне устаткування для дрібносерійного виробництва 27](#bookmark17)

1. Задача моніторингу процесу ливарного виробництва з метою

контролю якості виробу 30

[1.1.3. Провідна роль термічних процесів при виготовленні виливка 30](#bookmark19)

1. Огляд технологій моделювання для задач моніторингу ливарного

[виробництва 31](#bookmark44)

1. Огляд сучасного програмного забезпечення в галузі моделювання

термічних процесів охолодження виливка 32

1. Огляд аналітичних методів моделювання термічного процесу

[охолодження виливка 36](#bookmark23)

1. Технології лиття та засоби його супроводження, що застосовуються

в Фізико-технологічному інституті металів та сплавів 39

1. Задачі моделювання термічних процесів за експериментальними

даними 40

1. Основні характеристики експериментальних даних ливарного

процесу 41

1. [Методи фільтрації шуму в експериментальних даних 42](#bookmark33)
2. Методи визначення якості виливка на основі порівняння кривих

охолодження 43

1. Індуктивний підхід до розв’язання задач моделювання термічних

[процесів за експериментальними даними 45](#bookmark30)

1. [Постановка задачі моделювання на основі МГУА 46](#bookmark36)
2. Комбінаторний алгоритм МГУА
3. [Оцінка точності отриманих моделей 50](#bookmark39)

[1.5 Мета і задачі дисертації 51](#bookmark40)

[Висновки до розділу 52](#bookmark41)

Розділ 2 Розроблення методів розв’язання задач оброблення даних та моделювання процесів ливарного виробництва на основі індуктивного підходу 54

1. [Послідовність задач процесу охолодження виливка 55](#bookmark46)
2. [Розроблення технології, що розв’язує поставлені задачі 57](#bookmark47)
3. [Фільтрація шуму в даних термічних процесів 59](#bookmark48)
4. Метод визначення якості невідомого сплаву шляхом розрахунку

кількісної міри відстані між апроксимованими функціями 62

1. [Опис методу 62](#bookmark51)
2. Дослідження завадостійкості методу знаходження близькості між

функціями за характеристичними точками 64

* 1. Моделювання термічних процесів за комбінаторним алгоритмом МГУА 67
     1. Завдання структурно-параметричного моделювання, що

розв’язується за допомогою МГУА 68

* + 1. Метод моделювання залежності фізико-механічних властивостей

виливка від хімічного складу сировини 69

* + 1. Метод моделювання залежності контрольної температури

охолодження виливка від режимів роботи ливарної установки 70

* + 1. Чисельне тестування алгоритму МГУА в задачі побудови

[нелінійних моделей 72](#bookmark61)

[Висновки до розділу 2 76](#bookmark62)

Розділ 3 Побудова технології розв’язання задач індуктивного моделювання термічних процесів ливарного виробництва 78

1. Вимоги до комп’ютерної технології моделювання термічних процесів 79
2. [Архітектура комплексу програмних засобів 80](#bookmark65)
3. Реалізація бази експериментальних даних як основи комплексу

моделювання



1. Визначення вимог до експериментальної бази даних ливарних

процесів 84

1. [Модулі розробленої технології 86](#bookmark68)
2. Модуль 1: фільтрація зашумлених функцій охолодження виливків

[для задачі оцінювання якості виливка 86](#bookmark70)

1. Модуль 2: визначення якості невідомого сплаву шляхом розрахунку

близькості кривої його охолодження з еталонними кривими 87

1. Модуль 3: моделювання залежності фізико-механічних

властивостей виливка від хімічного складу сировини із застосуванням комбінаторного алгоритму 88

1. Модуль 4: моделювання залежності контрольної температури

охолодження виливка від режимів роботи ливарної установки 90

1. [Опис інтерфейсу користувача комплексу 91](#bookmark73)
2. [Сценарії роботи з модулем «Експериментальні дані» 97](#bookmark74)
3. [Інструкція користувача 97](#bookmark75)

[Висновки до розділу 3 98](#bookmark76)

Розділ 4 Розв’язання прикладних задач моделювання термічних процесів охолодження литва 100

1. Знаходження відстані між поліноміальними функціями за новим

методом її вимірювання 100

1. Порівняльні результати вимірювання відстані між функціями, які

[описують процес охолодження 102](#bookmark82)

1. Аналіз впливу складових сировини на механічні властивості виливка з

використання МГУА 104

1. [Моделювання процесу охолодження виливка чавуну 110](#bookmark84)

[Висновки до розділу 4 117](#bookmark87)

[Висновки 119](#bookmark88)

[Список використаних джерел 121](#bookmark89)

Додаток А Відомості про використання результатів досліджень



Додаток Б Акт дослідно-промислової перевірки технологічного способу термічного аналізу металу Додаток В Опис до патенту на корисну модель

Додаток Г Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації







|  |  |
| --- | --- |
|  | **ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ** |
| ВЧ | Високоміцний чавун |
| ДСТУ | Державні стандарти України |
| ЛГМ | Лиття за газифікованими моделями |
| МГУА | метод групового урахування аргументів |
| МНК | метод найменших квадратів |
| ПЗ | Програмний засіб |
| СУБД | Система управління базами даних |
| ФТІМС | Фізико-технічний інститут металів та сплавів НАН України |
| ***A*** | навчальна підвибірка (послідовність) даних спостережень |
| ***B*** | тестова (перевірочна) підвибірка даних |
| *C* | екзаменаційна підвибірка даних |
| *W* ***=*** *A* U *B* | об'єднання підвибірок ***A*** та ***B*** , або робоча вибірка |
| ***F*** | свобода вибору (число кращих моделей, відібраних на деякому етапі алгоритму самоорганізації) |
| *MAPE* | Mean Absolute Percentage Error |
| *RMSE* | Root Mean Square Error |
| *R2* | Коефіцієнт детермінації |
| ***nA,nB,nW , nC*** | довжини відповідних частин вибірки A, B, *W* та *С* |
| ***n****W* ***= n****A* ***+ n****B* | довжина робочої частини вибірки |
| ***n = n****W* ***+ n****C* | загальна довжина вибірки (таблиці) спостережень модельованого процесу (число точок вибірки) |
| *s* | складність моделі (число оцінюваних коефіцієнтів) |
| /V  *O****a*** | оцінка параметру моделі на вибірці ***A*** |

**ВСТУП**

**Актуальність теми**. Лиття є найпоширенішим способом отримання готових деталей з металів та сплавів. Це процес, в якому беруть участь різні перетворення, і в залежності від складових виливка та режимів його охолодження можна отримати продукт різної якості та структури.

Термічні процеси є найважливішими при взаємодії рідкого металу або сплаву з ливарною формою. В роботі розглядаються тільки термічні процеси охолодження виливка, які відбуваються під час застигання розплаву в формі під впливом різних режимів охолодження.

В роботі виконано огляд сучасних методів та програмних засобів, які застосовуються в галузі моделювання процесів охолодження виливка і орієнтовані на велике серійне виробництво. Вагомий внесок в розвиток цієї галузі зробили такі вітчизняні та закордонні науковці: Ю. В. Власенко, В. С. Дорошенко, Е. В. Захарченко, Е. З. Райнін, Е. Х. Тухін, Е. А. Шелковий, Л. С. Файнзільберг, X. Xу,U. Li, К. Wang, S. Stan, M. Chisamera, I. Riposan, M. Barstow. Проте існує потреба в розробці технології підтримки рішень ливарника, яка буде орієнтована на дрібносерійне ливарне виробництво та пристосована до ливарних установок, які існують на вітчизняних підприємствах та налаштована під їх потреби. Прикладом такого виробництва є ливарне устаткування Фізико-технологічного інституту металів та сплавів НАН України (далі ФТІМС).

Задача моделювання є невід’ємною складовою частиною розв’язання задач керування та прийняття рішень. Моделювання термічних процесів охолодження виливків дає можливість досліджувати їх та впливати на них.

Для побудови моделей, які описують процеси охолодження литва, застосовують методи структурно-параметричної ідентифікації. Одним з найбільш ефективних підходів до розв’язання цього класу задач є застосування індуктивного моделювання, зокрема алгоритмів методу групового урахування аргументів (МГУА), автором якого є академік О. Г. Івахненко. Застосування алгоритмів МГУА для нової галузі моделювання термічних процесів охолодження виливка є розширенням практики застосування індуктивного підходу.

Тому актуальною є науково-прикладна задача розробки комп’ютерної технології підтримки рішень ливарника, яка завдяки моделюванню процесів охолодження дозволятиме підбирати хімічний склад сировини та режими охолодження виливка, не проводячи вартісних експериментів.

**Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконана у відповідності з планом наукових програм відділу Інформаційних технологій індуктивного моделювання Міжнародного науково-навчального центру інформаційних технологій і систем НАН і МОН України. Матеріали дисертації отримані в рамках досліджень за такими темами відділу:

«Розроблення та дослідження інтелектуальних технологій індуктивного моделювання для задач підтримки рішень у складних системах» (№ держреєстрації 0111U010375, 2012-2016 рр.);

«Розробити інструментальні засоби індуктивного моделювання для ефективного розв’язання задач обчислювального інтелекту» (№ держреєстрації 0117U002111, 2017-2021 рр.).

**Мета і задачі досліджень.** Метою роботи є підвищення ефективності моделювання термічних процесів охолодження виливка шляхом розроблення комп’ютерної технології підтримки рішень ливарника в процесі виготовлення виливків.

Для досягнення вказаної мети в роботі розв’язуються такі **задачі**: виконати аналіз методів та засобів моделювання процесів охолодження ливарних виробів на дослідних установках; розробити методи розв’язання задач фільтрації шуму, визначення хімічного складу виливка, моделювання фізико-механічних властивостей виливка, визначення режимів охолодження виливка з використанням індуктивного підходу; розробити комп’ютерну технологію підтримки рішень ливарника в процесі виготовлення виливків з використанням розроблених методів; продемонструвати ефективність розробленої комп’ютерної технології на реальних прикладних задачах моделювання термічних процесів ливарного виробництва.

**Об’єктом дослідження** є термічні процеси охолодження ливарних виробів.

**Предметом дослідження** є методи та засоби моделювання процесів охолодження виливків.

**Методи дослідження**. Методи математичного моделювання, метод групового урахування аргументів, аналіз функцій, математична статистика, комп’ютерне тестування.

**Наукова новизна одержаних результатів**

*вперше розроблено* концепцію та архітектуру комп’ютерної технології підтримки рішень ливарника в процесі виготовлення виливків; *вперше розроблено* метод індуктивної побудови моделей залежності фізико-механічних властивостей високоміцного чавуну від хімічного складу розплаву; *вперше розроблено* метод індуктивної побудови моделей залежності температури охолодження виливка у ливарній формі з піщаним наповнювачем від режимів ливарної установки; *вперше розроблено* комп’ютерну технологію розв’язання задач моделювання процесів охолодження металевих ливарних виробів; яка відрізняється експрес-аналізом сплаву сировини з метою корекції виливка в процесі його виготовлення шляхом впливу на його хімічний склад та температуру його охолодження, що дозволяє підвищити ефективність супроводу підтримки рішень ливарника у процесі виготовлення виливків; *вдосконалено метод* оперативного визначення хімічного складу розплаву на основі оцінювання близькості функцій, що описують процес охолодження литої проби.

**Практичне значення одержаних результатів** Розроблені методики та алгоритми можуть бути застосовані для підтримки рішень ливарника в процесі виготовлення виливка, що дозволить зменшити кількість бракованих виливків та виливків з неякісною структурою, зменшити економічні витрати та затрати часу.

Розроблену комп’ютерну технологію підтримки рішень ливарника в процесі охолодження виливка використано у ФТІМС, де її застосовано для розв’язання реальних практичних задач.

За допомогою розробленої технології розв’язано такі прикладні задачі:

* визначення хімічного складу виливка на основі порівняння функцій, що характеризують процес його охолодження з еталонними функціями, що описують відомі сплави;
* оцінювання залежності фізико-механічних властивостей виливка від його хімічного складу;
* моделювання залежності контрольної (проміжної) температури виливка від параметрів ливарної установки; розроблення комп’ютерної технології, в яку входять база даних металів та сплавів та функціональні модулі для розв’язання задач ливарного виробництва.

Розробки автора використані в ФТІМС для розв’язання задачі моделювання процесу охолодження виливка за експериментальними даними, моделювання та прогнозування термічних процесів на ливарних установках дозволяє підвищити ефективність процесу лиття за рахунок автоматизованого підбору найкращого режиму охолодження чавуну СЧ20, про що отримано акти впровадження.

Отримано акт дослідно-промислової перевірки про те, що на приватному підприємстві «ЕОН ПЛЮС», м. Київ, проведено дослідно-промислову перевірку у виробничому ливарному процесі 1111 «ЕОН ПЛЮС» та оцінено потенційну ефективність впровадження способу термічного аналізу металу.

**Особистий внесок здобувача**. В працях, написаних у співавторстві, автору дисертації належать: ідея застосування індуктивного підходу в задачах, що виникають при охолодженні виливка та побудова моделі залежності температури охолодження виливка від режимів роботи установки за комбінаторним алгоритмом МГУА [1]; підхід до розробки системи інформаційної підтримки рішень у ливарному виробництві [2]; розроблення основних блоків комп’ютерної технології підтримки рішень у процесі ливарного виробництва [3]; розроблення структури бази даних металів та сплавів для задач, що виникають при охолодженні металевого виливка [6]; розроблення структури та функціональних модулів комп’ютерної технології інформаційної підтримки рішень у процесі ливарного виробництва [7]; аналіз питань, пов’язаних з розробкою систем комп’ютерного моніторингу процесів у ливарному виробництві [8], порівняння способів лиття у вакуумовані піщані форми [9]; аналіз застосування 3D технології для створення заготовок металевих виробів[10]; порівняння методів термічного аналізу рідких чавунів шляхом визначення близькості між кривими охолодження виливка [11]; аналіз залежності структури виливка від різних режимів охолодження [12]; підхід до розв’язання задачі пошуку залежності температури охолодження від режимів ливарної установки на основі індуктивного підходу [13]; виконання розрахунків за новим методом оцінювання відстані між кривими охолодження виливка[14], побудова моделі залежності фізико-механічних властивостей виливка від хімічного складу сировини [15]; застосування нового методу знаходження близькості між функціями до відфільтрованих даних кривих охолодження [16]; методика розроблення технології розв’язання задач моніторингу процесів ливарного виробництва [17]; способи підвищення ефективності моделювання процесів ливарного виробництва на основі індуктивного підходу [18]; аналіз існуючих програмних засобів для моніторингу процесів у ливарному виробництві та загальна схема технології розв’язання задач моніторингу процесів ливарного виробництва [19]; конструювання системи підтримки прийняття рішень у ливарному виробництві та її загальної структури [20].

**Апробація наукових результатів**. Основні результати дисертаційної роботи оприлюднені та обговорювалися на ІІІ Міжнародній конференції з автоматичного управління та інформаційних технологій ICACIT-2015, (м. Київ, 2015); Міжнародній конференції «Інтелектуальні системи прийняття рішень та проблеми обчислювального інтелекту» ISDMCI-2016 (м. Залізний Порт, Херсон); Міжнародних конференціях і семінарах з індуктивного моделювання (Київ- Жукин, 2016; Львів, 2017-2020); XXIV Міжнародній конференції з автоматичного управління «Автоматика-2017» (Київ).

**Публікації**. Результати дисертаційних досліджень опубліковані у

20 наукових працях, з них 7 у наукових фахових виданнях України, 4 статті в періодичних виданнях за кордоном, 4доповіді конференцій, проіндексовані в базі Scopus, та тези 4 доповідей на конференціях, участь в патенті на корисну модель.

**ВИСНОВКИ**

У дисертаційній роботі отримала подальший розвиток практика МГУА за рахунок застосування комбінаторного алгоритму МГУА в галузі моделювання термічних процесів охолодження виливка.

Сукупність отриманих у дисертації результатів забезпечує розв’язання актуальної науково-прикладної задачі підвищення ефективності моделювання термічних процесів охолодження виливка шляхом розроблення комп’ютерної технології підтримки рішень ливарника в процесі виготовлення виливків.

Методи реалізовано в програмних засобах. Ефективність розробленої комп’ютерної технології досліджено чисельними експериментами та на реальних прикладних моделювання термічних процесів.

За результатами проведених досліджень можна зробити такі основні висновки:

1. Виконано аналіз методів та засобів моделювання процесів охолодження ливарних виробів на дослідних установках, визначено задачі, які постають перед ливарником в процесі охолодження виливка з метою розробки засобів підтримки його рішень.
2. Розроблена архітектура комп’ютерної технології підтримки рішень ливарника передбачає розв’язання такого комплексу задач: фільтрація кривих охолодження; визначення хімічного складу виливка на основі порівняння кривих охолодження з еталонними;оцінювання залежності фізико-механічних властивостей виливка від його хімічного складу;моделювання залежності контрольної температури виливка від параметрів ливарної установки.
3. Вдосконалений метод визначення близькості функцій, що описують процес охолодження литої проби, дозволяє тільки за різницями температур в характеристичних точках апроксимаційних функцій визначати хімічний склад розплаву без проведення додаткових експериментів.
4. Побудовані моделі залежності фізико-механічних властивостей високоміцного чавуну від хімічного складу розплаву на основі індуктивного підходу дозволяють оцінити вплив зміни кожної зі складових сплаву на тимчасовий опір при розтягуванні, відносне видовження, ударну в’язкість та міцність, тобто оцінити якість готового виливка.
5. Побудовані математичні моделі залежності проміжної температури охолодження виливка від режимів його охолодження у ливарній формі дозволяють обирати раціональні варіанти регулювання процесу охолодження, що впливає на структуроутворення і експлуатаційні властивості виливків.

Розроблена комп’ютерна технологія розв’язання задач моделювання процесів охолодження металевих ливарних виробів дозволяє підвищити ефективність супроводу підтримки рішень ливарника у процесі виготовлення виливків завдяки розробленим моделям. Ефективність розробленої комп’ютерної технології досліджено чисельними експериментами та продемонстровано при розв’язанні прикладних задач моделювання процесів лиття, що підтверджено відповідними актами впровадження та дослідно-промислової перевірки.