

УДК 621.74:004.94

DOI: 10.32626/2308-5916.2025-28.13-21

**А. І. Дегула**, канд. техн. наук,

**Н. А. Харченко**, канд. техн. наук,

**В. В. Гриб**, аспірант

Сумський державний університет, м. Суми

## **АНАЛІЗ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЛИТТЯ**

У статті подано розширений аналіз сучасного програмного забезпечення, призначеного для комп'ютерного моделювання технологічних процесів лиття металів і сплавів. Розглянуто теоретичні та математичні основи чисельного моделювання, що застосовуються для опису гідродинаміки заповнення ливарних форм, процесів теплопереносу, кристалізації, фазових перетворень і формування макро- та мікроструктури виливків. Проаналізовано можливості використання методів скінченних елементів, скінченних об'ємів і мультифізичних підходів, які реалізовані в сучасних симуляційних системах для підвищення точності прогнозування результатів лиття.

Виконано порівняльний аналіз поширених комерційних і дослідницьких програмних продуктів, зокрема ProCAST, MAG-MASoft, FLOW-3D Cast, ANSYS, SolidCast, NovaFlow&Solid та QuikCAST. Визначено їхні функціональні особливості, переваги й обмеження, а також сфери доцільного застосування залежно від типу лиття, складності геометрії виробів і вимог до точності прогнозування дефектів. Окрему увагу приділено питанням інтеграції програм моделювання у комплексні CAD/CAE/CAM-системи, що забезпечує створення цифрових двійників технологічних процесів у межах концепції Industrie 4.0 та підвищує ефективність підготовки виробництва.

Розглянуто сучасні тенденції використання штучного інтелекту та методів машинного навчання в ливарному виробництві, зокрема для оптимізації технологічних параметрів, прискорення чисельних розрахунків і прогнозування виникнення ливарних дефектів. Показано, що впровадження комп'ютерного моделювання дозволяє знизити витрати на експериментальні дослідження, підвищити якість виливків і скоротити терміни розробки нової продукції.

**Ключові слова:** *математичне моделювання, технологічний процес, лиття металу, якість продукції, дефекти.*

**Вступ.** Сучасне машинобудування, авіаційна та енергетична промисловість неможливі без використання процесів лиття, які зали-

шаються одним із найбільш розповсюджених способів отримання заготовок складної геометрії. Попри розвиток альтернативних технологій формоутворення, таких як адитивне виробництво чи високоточна механічна обробка, саме лиття забезпечує оптимальне співвідношення вартості та продуктивності у випадку серійного й масового виробництва [1]. Проте технологічні процеси лиття є багатофакторними, складними для прогнозування й часто супроводжуються утворенням дефектів, серед яких пористість, газові вclusions, усадкові раковини та макросегрегація [2].

Раніше удосконалення технологій лиття здійснювалось переважно емпіричним шляхом, що вимагало значних матеріальних і часових витрат. Із розвитком чисельних методів та обчислювальної техніки з'явилася можливість застосовувати програмні засоби для моделювання процесів лиття з високим рівнем достовірності. Такі системи дозволяють на етапі проектування прогнозувати перебіг заповнення форми розплавом, охолодження, затвердіння, а також формування можливих дефектів. Використання моделювання суттєво скорочує витрати на дослідні відливки та мінімізує ризики браку [3].

Застосування методів комп'ютерного моделювання у литті базується на розв'язанні системи рівнянь теплопереносу, гідродинаміки, фазових перетворень, масопереносу та кристалізації [4]. У більшості сучасних програмних пакетів реалізовано метод скінченних елементів (МКЕ) або метод скінченних об'ємів (МСО), які забезпечують достатню точність при прийнятних обчислювальних витратах. Використання адаптивних сіток та паралельних обчислень підвищує ефективність розрахунків, що особливо важливо для промислових застосувань [5].

Серед комерційних програмних продуктів, найбільш поширених у сфері лиття, варто відзначити ProCAST, MAGMASoft, NovaFlow&Solid, AutoCAST та Flow-3D Cast. Кожна із систем має свої особливості: наприклад, MAGMASoft відзначається потужними можливостями оптимізації параметрів технології, ProCAST забезпечує точне моделювання усадкових явищ і термомеханічних напружень, NovaFlow&Solid – ефективна у випадках лиття складних форм, а Flow-3D Cast широко використовується для аналізу динаміки потоку [6]. Паралельно розвиваються відкриті та дослідницькі проєкти, що ґрунтуються на вільному ПЗ та можуть інтегруватися в університетські навчальні програми [7].

Актуальність дослідження програмного забезпечення для лиття зумовлюється також тенденціями цифровізації виробництва. Інтеграція симуляційних систем у концепцію Industrie 4.0 дозволяє створювати «цифрових двійників» технологічних процесів і пов'язувати результати розрахунків із системами управління виробництвом. Це відкриває нові можливості для оптимізації, скорочення циклів розробки продукції та підвищення конкурентоспроможності підприємств [8].

**Мета роботи.** Метою даної статті є виконання комплексного аналізу сучасного програмного забезпечення для моделювання технологічних процесів лиття, з урахуванням їх математичних моделей, функціональних можливостей та сфер застосування.

У роботі розглянуто основні підходи до моделювання, наведено порівняння поширених програмних продуктів, визначено їхні переваги та обмеження. Особлива увага приділяється перспективам розвитку цієї галузі, зокрема застосуванню алгоритмів штучного інтелекту, методів машинного навчання та інтеграції симуляцій у комплексні CAD/CAE/CAM-системи.

Таким чином, огляд та аналіз програмних засобів моделювання лиття є важливим завданням як з наукової, так і з практичної точки зору, оскільки дозволяє систематизувати наявні рішення, оцінити їх ефективність та визначити шляхи подальшого удосконалення.

**Порівняльний аналіз.** Моделювання лиття стало невід'ємною частиною сучасних ливарних технологій: воно дозволяє прогнозувати наповнення форми, твердісні фронти, утворення усадкових порожнин, ризики газових дефектів та залишкові напруження, а також оптимізувати конструкцію систем заливання й охолодження до виготовлення першого прототипу. Завдяки цьому знижується кількість дорогоцінного ливарного браку, скорочуються витрати на експерименти та прискорюється час виведення продукту [9].

Моделювання процесів лиття охоплює кілька взаємопов'язаних фізичних задач: гідродинаміка заповнення форми; теплообмін і твердісне затвердіння; моделі кристалізації та формування структури; прогнозування дефектів; залишкові напруження і деформації після охолодження і вилучення з форми.

Чисельно ці задачі реалізуються за допомогою методів [10]:

- обчислювальної гідродинаміки (CFD);
- скінченних елементів (FEM) для теплових і механічних задач;
- скінченних різниць та фініт – об'ємів у деяких CFD-реалізаціях;
- багатофізичних монокумулятивних підходів, де CFD та FEM взаємодіють у мультифізичній схемі.

**Огляд і порівняння типових програмних продуктів.** Нижче наведено короткий огляд і порівняння найбільш поширених серед індустрії інструментів: ProCAST (ESI Group), MAGMASOFT (MAGMA GmbH), FLOW-3D Cast (Flow Science), ANSYS (CFX/Fluent з модулями лиття), а також спеціалізованих/недорогих рішень і відкритих пакетів [9, 12].

**ProCAST** – потужний комерційний мультифізичний пакет, орієнтований на комплексне моделювання лиття (лиття в піщані форми, під тиском, лиття труб, безперервне лиття). Забезпечує моделі наповнення,

твердісного затвердіння, прогноз дефектів, розширені матеріалознавчі бази, а також модулі для відновлення і зворотного розрахунку параметрів процесу. ProCAST використовує FEM-підхід для теплових та механічних задач і спеціалізовані алгоритми для двофазної течії.

Переваги: висока точність, велика кількість промислових валідованих моделей.

Недоліки: висока вартість ліцензій та потреба в сильному апаратному забезпеченні і кваліфікованому персоналі.

**MAGMASOFT** – орієнтований насамперед на оптимізацію ливарних систем і дозволяє інтегрувати процедури автоматизованої оптимізації (наприклад, алгоритми для підбору розмірів виливків, розташування ливникової системи, тощо). Має зручні інструменти для аналізу усадкових дефектів та управління якістю.

Переваги: інтуїтивна робота з оптимізацією ливникової системи, сильні інструменти для процес-орієнтованої оптимізації.

Недоліки: також висока вартість і залежність від налаштувань матеріальних баз.

**FLOW-3D Cast** – застосовує фініт – об'ємні методи (Finite Volume Methods) з детальною моделлю вільної поверхні та добре показує себе при моделюванні процесу наповнення, включаючи складні геометрії і багатофазні явища.

Переваги: точність в прогнозі поведінки фронту розплаву та можливість моделювання дефектів наповнення.

Недоліки: обмежені функції для подальшого прогнозування структури і властивостей без додаткових модулів.

**ANSYS** – пропонує модульні рішення: CFX/Fluent для CFD-завдань і власні або інтегровані інструменти для лиття, що дають перевагу в універсальності (можливість зв'язку з великими FEM-розрахунками), але іноді поступаються вузькоспеціалізованим продуктам у готових алгоритмах прогнозування дефектів.

**Інші продукти та відкриті рішення.** Існують рішення початкового рівня (SolidCast, NovaFlow&Solid, QuikCAST), які підходять малим підприємствам.

**SolidCast** – Американське програмне забезпечення для моделювання процесів лиття. Використовує метод скінченних різниць та скінченно-об'ємні підходи. Орієнтоване на моделювання заповнення форми та твердіння металу. Має модуль FLOWCast (для гідродинаміки) та OPTICast (оптимізація розташування прибутків і ливників). Просте у використанні, добре підходить для навчання та промислових підприємств середнього масштабу.

**NovaFlow&Solid** – Продукт шведської компанії NovaCast Systems. ґрунтується на методі дискретних об'ємів (Finite Volume Method, FVM).

Відома висока точність у розрахунку турбулентності та теплообміну. Дає змогу моделювати заповнення, твердіння, газоутворення, утворення усадочних раковин. Має розширені можливості для роботи зі складними 3D-геометріями та неструктурованими сітками.

**QuikCAST** – Продукт компанії ESI Group (Франція). Створений як більш спрощена та швидка альтернатива програмі ProCAST. Орієнтований на оперативний аналіз процесів лиття з достатньою точністю при значно меншій витраті часу на обчислення. Моделює заповнення форми, твердіння, утворення дефектів (газові включення, усадка). Використовується у промисловості для швидкої перевірки технологічних рішень.

**Критерії вибору ПЗ для практичних задач.** При виборі ПЗ слід звертати увагу на: тип лиття (піщане, лиття під тиском, безперервне тощо); наявність моделей дефектів, які потрібні (усадкові пори, газова пористість, холодні шви); можливість інтеграції з CAD (формати імпорту/експорту); наявність матеріальних баз і можливість їх розширення; інструменти для оптимізації (вбудовані алгоритми або API для скриптів); ресурсні обмеження (час моделювання, апаратні вимоги, вартість ліцензій) [11-13].

**Типові джерела помилок моделювання.** Навіть найкращі пакети дають помилки, якщо: використані неточні термофізичні дані (теплопровідність, питома теплоємність, інтерфейсні теплові опори); геометрія/сітка занадто груба для опису локальних процесів; невірно задані граничні умови контакту з формою або холодильниками та ін.

Рекомендується поєднувати моделювання з контрольними експериментами та проводити аналіз параметрів.

**Застосування машинного навчання та ШІ у литті.** Інтеграція ML/ШІ розвивається за кількома напрямками [14, 15]:

- прискорені емульовані моделі (surrogate models): заміна важких CFD/FEM-симуляцій моделями ML, щоб оперативно оцінювати результати при оптимізації. Наприклад, нейронні мережі навчають на популяції симуляцій і потім швидко прогнозують усадкову пористість чи час затвердіння;
- оптимізація параметрів процесу: комбінування симуляцій з еволюційними алгоритмами або Bayesian-оптимізацією для підбору оптимальних розмірів виливків і режимів заливання;
- діагностика й контроль якості: ML для обробки даних з камер і датчиків (визначення дефектів по зображенню, прогноз відмов устаткування);
- гібридні підходи: ML підмінює деякі підсистеми (наприклад, швидке оцінювання локальної пористості), а верифікація робиться фізичною симуляцією.

Останні дослідження показують, що комбінація великої кількості згенерованих симуляцією даних і сучасних архітектур нейронних мереж (включно з convolutional і graph-based мережами для роботи з геометрією) дає проміжні моделі, які істотно знижують обчислювальні витрати при прийнятній точності. Проте ключовою умовою є якісна база тренувальних даних і увага до генералізації моделей на нові геометрії й матеріали.

**Інтеграція в CAD/CAE/CAM-ланцюжок.** Ефективна цифрова інженерія вимагає плавної інтеграції симуляцій у робочі процеси CAD/CAE/CAM [13]:

- двосторонній обмін геометрією і метаданими (параметричне моделювання);
- використання стандартних форматів і ієрархічних даних для передачі великих мультифізичних полів між модулями;
- застосування PLM/PLATFORM підходів для збереження версій і трасування змін у конструкції, процесі і результатах симуляцій.

Це дозволяє автоматизувати оптимізацію та швидко переводити результат симуляції у технологічну документацію чи САМ-операції.

**Рекомендації для інженерної практики [10, 16]:**

- починати з чіткого визначення цілей симуляції (що потрібно прогнозувати – наповнення, температурне поле розплаву та форми, час застигання та охолодження, усадкова пористість, структура та ін.);
- інвестувати у якісні матеріальні дані або проводити власні виміри для ключових властивостей;
- проводити валідацію хоча б на одному експериментальному зразку перед масовим використанням симуляцій;
- використовувати комбінований підхід: вузькоспеціалізований пакет для лиття + загальні CAE-інструменти для механіки/напружень, або модульну інтеграцію в платформу підприємства;
- розглядати ML як доповнення, а не як повну заміну фізичних моделей, особливо для критичних деталей.

**Актуальність моделювання процесів лиття.** У сучасних умовах підвищеної конкуренції на ринках машинобудування, авіації, енергетики та автомобілебудування однією з вирішальних складових технологічної переваги є ефективність процесу лиття. Використання засобів комп'ютерного моделювання дозволяє заздалегідь прогнозувати процеси заповнення форми, охолодження виливка, виникнення дефектів (пористості, холодних швів, усадкових раковин) та оптимізувати конструкцію системи лиття (живильні та випускні канали), що дає змогу знизити брак і матеріаломісткість виробів.

Зокрема, українські дослідження показують, що методи комп'ютерного моделювання дозволяють суттєво скоротити час освоєння литарних виробництв і підвищити їхню ефективність. Наприклад, в огляді О. В. Токової (2017) показано, що вже на початковому етапі впровадження ІТ-рішень для моделювання термічних процесів лиття можна очікувати значного підвищення технологічної готовності підприємства [17].

У роботі І. А. Шалевської (2021) наведено результати моделювання системи лиття виробу «корпус вентиля DN80 PN40» в програмі Flow-3D Cast, що демонструє можливість ідентифікації зон утворення дефектів і оптимізації ливниково-живильної системи [18].

З огляду на це, актуальність досліджень у сфері моделювання лиття полягає не лише в науковому пошуку, а й у практичній потребі вітчизняної промисловості у цифровізації, скороченні витрат, підвищенні якості продукції та ефективному навчанні інженерно-технологічного персоналу.

**Висновки.** Моделювання процесів лиття на сучасному етапі розвитку машинобудування є невід'ємним інструментом інженерної практики, що дозволяє суттєво знизити витрати на експериментальні випробування та зменшити ризики утворення дефектів у готових виливках. Використання чисельних методів забезпечує можливість комплексного аналізу гідродинаміки наповнення форми, теплообміну, процесів кристалізації та формування структури матеріалу, прогнозування усадкових і газових дефектів, а також залишкових напружень. Це створює передумови для оптимізації ливарних технологій ще на етапі проектування.

Аналіз програмних продуктів показав, що кожне рішення має свої особливості та сферу доцільного застосування. ProCAST і MAGMA-SOFT демонструють високу точність та багатофункціональність, але потребують значних фінансових та апаратних ресурсів. FLOW-3D Cast вирізняється ефективним моделюванням наповнення складних геометрій, проте має обмеження у прогнозуванні структури матеріалу. ANSYS забезпечує широкую інтеграцію з іншими інженерними розрахунками, але поступається спеціалізованим системам у швидкості та зручності під час оцінювання дефектів. Для малих і середніх підприємств доступними є SolidCast, NovaFlow&Solid та QuikCAST, що поєднують достатню точність з простотою у використанні.

Проведений огляд також підкреслив, що ключовими критеріями вибору ПЗ залишаються тип лиття, наявність необхідних моделей дефектів, інтеграція з CAD/CAE-системами, можливість роботи з розширюваними базами матеріалів та співвідношення ціна/продуктивність. Важливо враховувати, що якість результатів моделювання значною мірою залежить від точності вихідних даних та коректності постановки граничних умов. Тому симуляції мають супроводжуватися контрольними експериментами для підтвердження достовірності прогнозів.

## Список використаних джерел:

1. Chatterjee A., Kumar D. Casting Processes and Modelling of Metallic Materials. *CRC Press*. 2021. ISBN-10: 1839684313.
2. Stefanescu D. M. Science and Engineering of Casting Solidification. *Springer*. 2015. DOI: 10.1007/978-3-319-15693-4
3. Campbell J. Complete Casting Handbook: Metal Casting Processes, Metallurgy, Techniques and Design. *Elsevier*. 2015. ISBN 978-0-444-63509-9.
4. Vynnycky M. Applied Mathematical Modelling of Continuous Casting. *Metals*. 2018. Vol. 8 (11). Art. 928. DOI: 10.3390/met8110928.
5. Voller V. R. Basic Control Volume Finite Element Methods for Fluids and Solids. *World Scientific*. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1142/7027>.
6. Lehmhus D. Advances in Metal Casting Technology: A Review of State of the Art, Challenges and Trends. Part II: Technologies New and Revived. *Metals*. 2024. Vol. 14 (3). Art. 334. DOI: <https://doi.org/10.3390/met14030334>.
7. Rajkumar I., Prasad K., Kumar S. Metal casting modeling software for small scale enterprises to improve efficacy and accuracy. *Materials Today: Proceedings*. 2021. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.02.542.
8. Dučić N., Jovićić R., Stanković D. Casting Process Improvement by the Application of Artificial Intelligence. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12 (7). Art. 3264. DOI: 10.3390/app12073264.
9. Khan M. A. A., et al. A Comparative Study of Simulation Software for Modelling Metal Casting Processes. *International Journal of Simulation Modelling (IJSIMM)*. 2018. DOI: [https://doi.org/10.2507/IJSIMM17\(2\)402](https://doi.org/10.2507/IJSIMM17(2)402).
10. Guo G., et al. Numerical Simulation and Machine Learning Prediction of Solidification and Defects in Continuous Casting. *Materials*. 2024. Vol. 17 (6). Art. 1409. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17061409>.
11. Khan M. T. H., et al. A review of CAD to CAE integration with a hierarchical data format (HDF) – based solution. *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*. 2021. Vol. 33. Is. 4. P. 248-258. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2020.04.009>.
12. Danylchenko L. Comparative analysis of computer systems for casting processes. *ICAAEIT Conference Proceedings*. 2021.
13. Yang D. Y., et al. Integration of CAD/CAM/CAE/RP for the development of metal forming process. *Journal of Materials Processing Technology*. 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00414-4](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00414-4).
14. Bhagwat V. B., Kamble D. A., Kore S. S. An Overview of Machine Learning Applications in Metal Casting Industries. *Arch. Metall. Mater.* 2024. Vol. 69 (4). Vol. 1577-1584. DOI: <https://doi.org/10.24425/amm.2024.151428>.
15. Dučić N., Jovićić A., et al. Application of Machine Learning in the Control of Metal Melting Production Process. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10. Art. 6048. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10176048>.
16. Tiberto D., Klotz U. E. Computer simulation applied to jewellery casting: Challenges, results and future possibilities. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2012. Vol. 33 (1). DOI: 10.1088/1757-899X/33/1/012008.
17. Токова О. В. Огляд методів та засобів комп'ютерного моделювання процесів ливарного виробництва. Київ: МННЦ ІТС НАН та МОН України, 2017. Вип. 9. С. 204-213.



18. Шалевська І. А. Використання комп'ютерного моделювання для аналізу формування дефектів литва. *Журнал «Процеси лиття» (Processes of Foundry): електронне видання*. 2021. № 3(145). С. 53-60. DOI: <https://doi.org/10.15407/plit2021.03.053>.

## SOFTWARE ANALYSIS FOR MODELIZATION OF THE CASTING TECHNOLOGICAL PROCESS

The paper presents an extended analysis of modern software tools intended for computer simulation of technological processes of metal and alloy casting. The theoretical and mathematical foundations of numerical modeling used to describe mold filling hydrodynamics, heat transfer, solidification, phase transformations, and the formation of macro- and microstructures of castings are considered. The capabilities of the finite element method, finite volume method, and multiphysics approaches implemented in modern simulation systems to improve prediction accuracy are analyzed.

A comparative analysis of widely used commercial and research software products, including ProCAST, MAGMASoft, FLOW-3D Cast, ANSYS, SolidCast, NovaFlow&Solid, and QuikCAST, is performed. Their functional features, advantages, limitations, and areas of practical application depending on the casting type, product geometry complexity, and defect prediction accuracy requirements are identified. Special attention is paid to the integration of simulation software into comprehensive CAD/CAE/CAM systems, enabling the development of digital twins of technological processes within the Industry 4.0 concept and improving manufacturing preparation efficiency.

Current trends in the application of artificial intelligence and machine learning methods in foundry production are also discussed, particularly for optimizing technological parameters, accelerating numerical calculations, and predicting casting defects. It is shown that the use of computer modeling reduces experimental costs, improves casting quality, and shortens the development time of new products.

**Keywords:** *mathematical modeling, technological process, metal casting, product quality, defects.*

Отримано: 30.10.2025