

Автор статті

В. С. Дорошенко, докт. техн. наук,
e-mail: doro55v@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0070-5663>
Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України (Київ, Україна)

Штучний інтелект у ливарних технологіях:

ВІД КОНТРОЛЮ ДО КОМПЛЕКСНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ

У даний момент ливарне виробництво переживає важливий етап свого розвитку: сучасні цифрові інструменти — зокрема системи штучного інтелекту (ШІ) — відкривають нові можливості для підвищення якості, стабільності та ефективності ливарних процесів. ШІ стає ключовим фактором цифрової модернізації ливарного виробництва. Його застосування дозволяє не лише вдосконалювати контроль якості та зменшувати рівень браку, а й значно підвищувати стійкість процесів, скорочувати енерговитрати та формувати справді гнучкі виробничі ланцюги

Вироби з металу, що виготовляються методом лиття, піддаються виникненню різноманітних дефектів: газова та усадкова пористість, гарячі тріщини, раковини, спаї, дефекти заповнення форми, порушення структури та ін. Ці проблеми збільшують витрати та знижують випуск якісної продукції, особливо при литті відповідальних деталей.

Системи ШІ надають нові інструменти для розв'язання цих завдань. Вони дозволяють:

- **передбачати появу дефектів** на основі аналізу великих масивів технологічних даних;
- **оптимізувати конструкцію виливків і ливниково-живильних систем (ЛЖС)** з урахуванням теплових режимів та особливостей сплавів;
- **підвищувати точність моделювання, формоутворення та кристалізації;**
- **керувати складом та властивостями ливарних сумішей і розплавів** у режимі реального часу;
- **оптимізувати роботу ливарних комплексів загалом**, включно з плавильним, формувальним, стержневим і заливальним обладнанням;
- **знижувати енергоспоживання та підвищувати продуктивність** металоплавильних ділянок.

ШІ не замінює спеціаліста-ливарника — він перетворюється на його інструмент, посилюючи експертні можливості та мінімізуючи ризик людських помилок. Саме поєднання інженерної компетенції та інтелектуальних цифрових систем стає фундаментом стійкої, конкурентоспроможної та технологічно розвиненої ливарної галузі.



Рис. 1. Структура концепцій у галузі ШІ [Luo A. A., & Apelian D. (2024). Integrated computational materials engineering and artificial intelligence for sustainable casting industry. The 75th World Foundry Congress, Deyang, Sichuan, China. Retrieved from <https://www.75wfc.com/uploads/pdf/14/14-1066-756.pdf>]

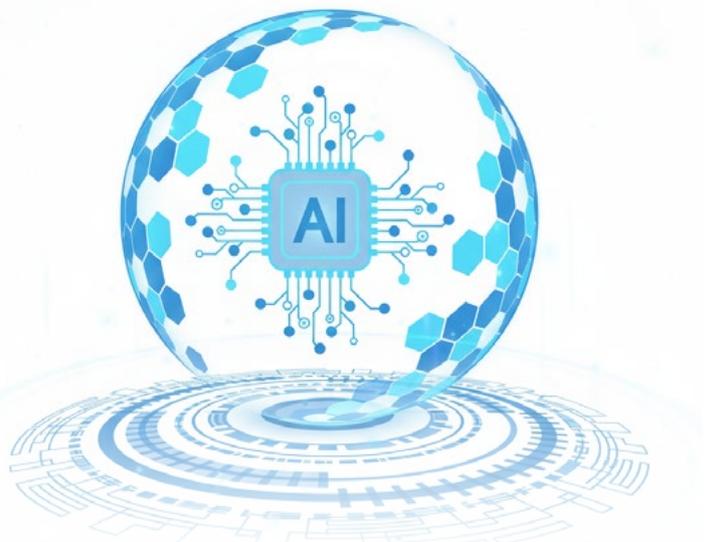
ЦИФРОВІЗАЦІЯ КОНТРОЛЮ ТА УПРАВЛІННЯ ЛИВАРНИМИ ПРОЦЕСАМИ: РОЛЬ ШІ

Раніше контроль ливарних процесів був трудомістким і залежав від досвіду фахівців. Інженерам доводилося вручну відстежувати практично кожен етап: підготовку формувальних і стрижневих матеріалів, параметри плавки, стан розплаву, режими заливки, якість заповнення форми, процеси кристалізації, вибивання, очищення, термообробки та фінального контролю. Це вимагало значних трудовитрат, часу, складного обладнання та неминуче супроводжувалося людським фактором.

Поява ШІ кардинально змінила ситуацію. Сучасні алгоритми здатні за секунди аналізувати масиви технологічних даних, виявляти аномалії, прогнозувати ризик дефектів (усадка, пористість, спаї, гарячі тріщини, порушення структури тощо) та пропонувати оптимальні коригувальні дії.

Уявімо ливарний цех, інтегрований у цифрову виробничу екосистему. Мережа датчиків, камер та інтелектуальних систем контролює ключові етапи виробництва — від підготовки сировини та шихти до заливки, затвердіння, охолодження виливків та подальших механічних і термічних операцій. Алгоритми машинного навчання автоматично підбирають оптимальні режими плавлення, температури заливки, швидкості заповнення форми, склад формувальних сумішей, процесів формовки і параметри термообробки залежно від типу виробу та ливарного сплаву.

Завдяки впровадженню **цифрових двійників ливарних процесів** виробничники можуть моделювати складні сценарії — теплопередачу, течію розплаву, усадку, протидію утворення дефектів — ще до запуску реальної плавки. Це дозволяє мінімізувати кількість пробних заливок, прискорити розробку технологічного маршруту та суттєво підвищити стабільність якості.



СКЛАДНОЩІ ВПРОВАДЖЕННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ

Попри високу ефективність технологій ШІ, їх інтеграція в ливарне виробництво супроводжується низкою проблем:

- **Висока вартість впровадження** цифрових платформ, датчиків, серверних потужностей і ПЗ.
- **Необхідність науково-технологічного супроводу**, оскільки ШІ потребує коректного налаштування та постійної валідації даних.
- **Перепідготовка та підвищення кваліфікації персоналу**, збільшення частки інженерних компетенцій у виробництві.
- **Вимоги до кібербезпеки та захисту** технологічних даних.

Проте потенціал цих технологій величезний. ШІ не лише дозволяє автоматизувати процеси управління ливарним виробництвом, а й змінює саму модель взаємодії між замовником і виробником. Уже сьогодні замовники можуть налаштовувати параметри майбутнього виробу онлайн, використовуючи інтерактивні цифрові інтерфейси, а технологічні системи автоматично перелаштовують параметри плавки та лиття під конкретне замовлення.

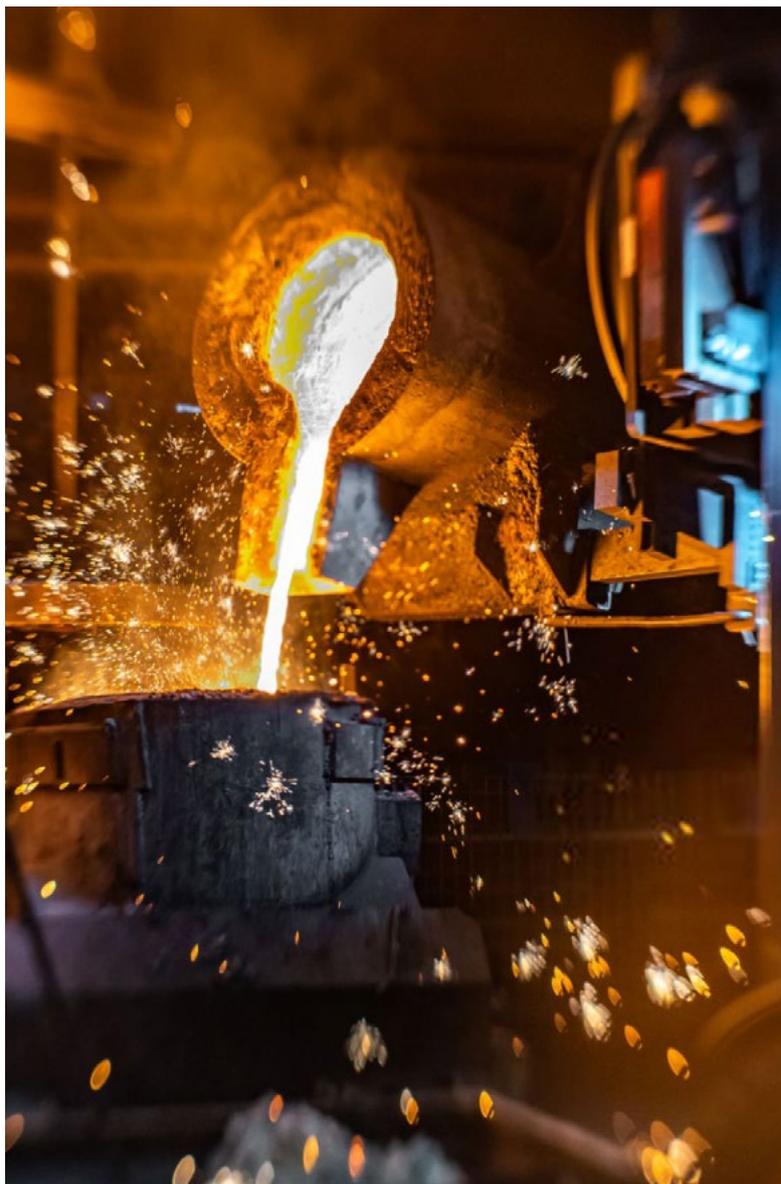
ЛИВАРНЕ ВИРОБНИЦТВО НА ПОРОЗІ НОВОЇ ЕРИ

Світова промисловість рухається в бік безперервних, самоналаштовуваних підприємств, де обладнання, передусім цифрової технологічної підготовки та моделювання виробництва, автоматично адаптується до зміни попиту, номенклатури та параметрів виробів. Зокрема, в ливарній галузі можливе застосування цифрових методів з мінімальною адаптацією ряду діючих ливарних процесів точного лиття.

Ливарне виробництво — традиційна та консервативна галузь — також входить у цю нову епоху. Епоху, в якій ШІ забезпечує:

- інтелектуалізацію й автоматизацію обладнання;
- глибинну оптимізацію процесів;
- скорочення виробничих циклів;
- зниження витрат, особливо разового (кастомізованого) і дрібносерійного виробництва;
- стабільно високу якість і доступність персоналізації продукції.

ШІ стає одним із ключових інструментів еволюції ливарних технологій, перетворюючи виробництво на більш передбачуване, стійке та ефективне.



ЗАСТОСУВАННЯ ШІ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ДЕФЕКТІВ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ

Одним із найважливіших напрямів упровадження ШІ в ливарному виробництві є прогнозування дефектів.

Алгоритми машинного навчання аналізують великі обсяги історичних даних: температурні режими, газогідродинамічний тиск у формі, швидкість заливки, характеристики формувальних матеріалів, газопроникність суміші, хімічний склад сплаву, тривалість і умови кристалізації. На основі цих даних ШІ виявляє приховані закономірності та формує предиктивні моделі, здатні з високою точністю прогнозувати ймовірність утворення пористості, усадочних раковин, гарячих тріщин, спаїв та інших типових ливарних дефектів ще до завершення заливки та затвердіння. Такі системи дозволяють технологам заздалегідь коригувати параметри процесу, запобігаючи випуску бракованої продукції та зменшуючи обсяг переробок.

ШІ відіграє ключову роль і в оптимізації технологічних параметрів. Сучасні алгоритми ML можуть підбирати оптимальні значення температури розплаву та ливарної форми, швидкостей і тисків лиття, конструкції ливниково-живильної системи, режимів дегазації, перемішування та модифікування розплаву. Це скорочує кількість експериментальних плавок і дороговартісних пробних заливок, суттєво прискорюючи підготовку виробництва та підвищуючи стабільність якості відливок.

ШІ В КОНТРОЛІ ЯКОСТІ:

рентген, візуальний контроль і цифровий зір

Автоматизовані системи технічного контролю на базі ШІ радикально трансформують процес оцінки якості литої продукції. Методи **комп'ютерного зору** (Computer Vision), поєднані з глибокими нейронними мережами, аналізують зображення — від висококонтрастних рентгенограм до відео з візуальних інспекційних камер — і автоматично виявляють як поверхневі, так і внутрішні дефекти.



На відміну від традиційного візуального контролю такі системи забезпечують:

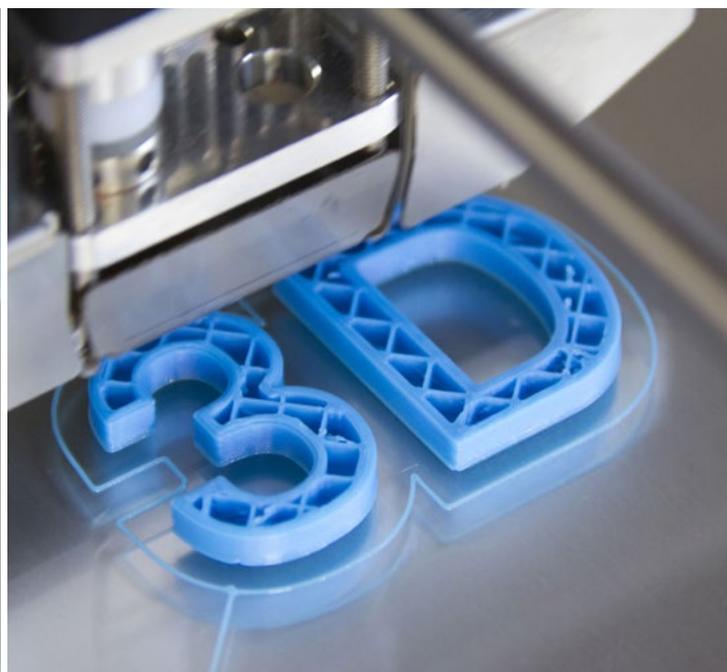
- вищу об'єктивність і відтворюваність;
- контроль у реальному часі;
- різке зниження впливу людського фактора;
- можливість сортування, бракування та створення бази даних статистики якості.

Це значно підвищує ефективність і швидкість виробничого циклу.

РЕСУРСОЕФЕКТИВНА ОПТИМІЗАЦІЯ ВСЬОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ЛАНЦЮЖКА

ШІ дозволяє вийти за межі оптимізації окремих операцій і перейти до інтегрованого управління всім ливарним технологічним ланцюжком. Алгоритми можуть:

- **підбирати параметри лиття** так, щоб мінімізувати (або усунути) подальшу механічну обробку;
- **пропонувати оптимальні режими термічної обробки** з урахуванням реальних умов затвердіння, включно з поєднанням лиття і термообробки шляхом видалення з форми гарячого виливка та занурення його в гартувальне середовище;
- **формувати рекомендації** щодо зниження залишкових напружень;
- **адаптувати ливарний процес** для забезпечення необхідних експлуатаційних властивостей і відповідної мікроструктури в різних зонах виливка.



ШІ ТА 3D-ДРУК ЛИВАРНИХ ФОРМ І МОДЕЛЕЙ

Особливо важливі перспективи відкриває поєднання ШІ з технологіями адитивного виробництва. ШІ може:

- проєктувати оптимізовані ливарні форми, моделі та ливникові системи, враховуючи можливості різновидів 3D-друку;
- генерувати топологічно оптимізовані конструкції, недоступні для традиційних методів, зокрема каркасно-комірчасті та композитні з литою металевою матрицею;
- прогнозувати поведінку піщаних, металевих або полімерних форм під час заливання та охолодження;
- створювати повністю цифровий ланцюжок «CAD → 3D-ДРУК → ФОРМУВАННЯ → ЗАЛИВКА → ОХОЛОДЖЕННЯ → ОБРОБКА», включно з роботизованою 3D-обробкою.

3D-друк дозволяє реалізовувати металоконструкції, які раніше були технологічно неможливі, включно зі складними каналами охолодження, біонічними формами та багаторівневими ливниковими системами. Крім того, 3D-друковані разові воскоподібні чи піно-полімерні моделі вписуються в діючі ливарні процеси без зміни виробничого базису.

ПРИКЛАД ЗАСТОСУВАННЯ ШІ: ПРОЄКТ PIVOT І КОМПАНІЯ SARGINSONS INDUSTRIES

Одним із яскравих прикладів упровадження ШІ в ливарне виробництво є проєкт **Performance Integrated Vehicle Optimization Technology (PIVOT)** компанії **Sarginsons Industries** (Велика Британія).

Використовуючи програмні комплекси на основі ШІ, інженери оптимізували конструкцію литого алюмінієвого каркаса підвіски автомобіля, скоротивши вагу деталі майже вдвічі — з 28 кг до 15 кг — без втрати механічної міцності та довговічності.

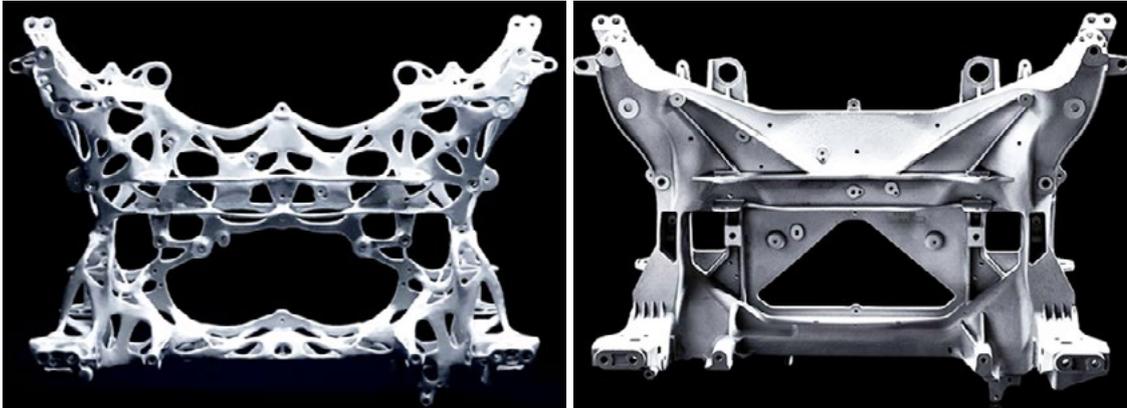


Рис. 2. Конструкції автомобільного вилівка вагою 15 та 28 кг [Artificial Intelligence makes castings more natural. Foundry Management & Technology. 2025. Apr. P. 25.]

Оптимізація виконувалась за рахунок:

- усунення надлишкового матеріалу в зонах низької напруги;
- перерозподілу маси в критично навантажені області;
- топологічної оптимізації на основі реальних умов експлуатації;
- моделювання механічних властивостей з урахуванням ливарних особливостей.

Додатково проєкт відзначився використанням вторинного переробленого алюмінію, що знизило вуглецевий слід і підвищило екологічну стійкість виробництва. Легкі оптимізовані конструкції також покращили показники пасивної безпеки автомобіля завдяки кращому поглинанню енергії при зіткненнях.

Цей приклад демонструє, що інтеграція ШІ в ливарні процеси відкриває шлях до створення легковагових, екологічних, високоякісних і технологічних деталей нового покоління.

ШІ Й АНАЛІЗ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ (LCA)

ШІ також виходить на рівень стратегічного управління, оптимізуючи життєвий цикл виливків — від розробки та виробництва до утилізації та повторної переробки. Він аналізує дані про методи плавки, формувальні матеріали, вуглецевий слід, термін служби виробу, вартість повторного переплавлення та логістику, дозволяючи:

- обирати оптимальний маршрут виробництва;
- зменшувати споживання енергії та матеріалів;
- зменшувати викиди CO₂;
- підвищувати ступінь рециклінгу металу.

Цей підхід повністю відповідає принципам циркулярної економіки та вимогам сталого розвитку.



ШІ ТА ICME – НОВЕ ПОКОЛІННЯ МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА ТА ЛИВАРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

У сучасних дослідженнях особливу увагу приділяють інтеграції ШІ з методологією **Integrated Computational Materials Engineering (ICME)** — інтегрованого обчислювального інженерного матеріалознавства. ICME поєднує відомості про склад, властивості та мікроструктуру матеріалів з моделюванням технологічних операцій та характеристик виробів в умовах експлуатації.

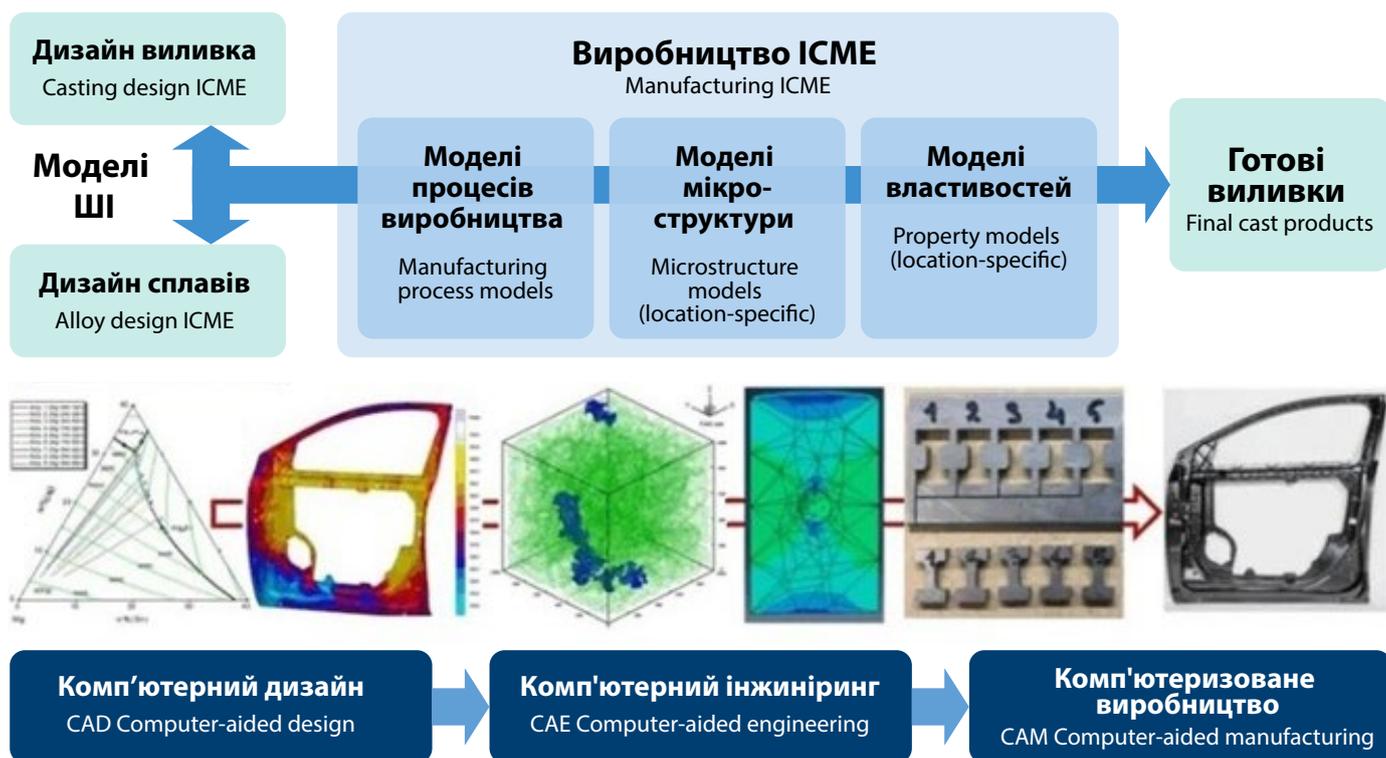


Рис. 3. Структура ICME для проектування та розробки процесу лиття в порівнянні з промисловим підходом CAD-CAE-CAM [Luo A. A., Sachdev A. K., Apelian D. Alloy Development and Process Innovations for Light Metals Casting. Journal of Materials Processing Technology. 2022. Vol. 306. Art. 117606. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2022.117606>]

У поєднанні з ШІ ця методологія дозволяє:

- моделювати мікроструктуру виливків на рівні кристалічних зерен;
- прогнозувати механічні та інші експлуатаційні властивості виробу ще на стадії проектування;
- проводити віртуальні експерименти, повністю виключаючи необхідність пробних заливок;
- значно прискорювати розробку нових сплавів разом з проектуванням литих конструкцій з них. 

Закінчення читайте в наступному номері