

ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ЛИТТЯ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ
ПІД ВИСОКИМ ТИСКОМ З УРАХУВАННЯМ ДИНАМІКИ ПРОЦЕСУ ПРЕСУВАННЯ

Крейцер К.О.

канд. техн. наук, ст. викладач, Одеський національний морський університет, м. Одеса, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0549-1481>, e-mail: dakerkir@gmail.com;

Козішкурт Є.М.

д-р філософії, ст. викладач, Одеський національний морський університет, м. Одеса, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7311-7395>, e-mail: koziskurtevgen@gmail.com

У статті запропоновано комплексний підхід до вдосконалення технологічного процесу лиття алюмінієвих сплавів під високим тиском, який базується на урахуванні динаміки пресування рідкого металу в межах формуювальної камери. Обґрунтовано теоретичні засади взаємозв'язку між режимами подачі розплаву, конфігурацією литникової системи, характеристиками сплаву Al-Si та механізмами формування внутрішньої структури виливків. Особливу увагу приділено впливу швидкості переміщення поршня, рівня тиску ущільнення, температурних градієнтів у прес-формі та фазовим переходам, що виникають у ході тверднення. Теоретичний аналіз базується на положеннях гідродинаміки, термодинаміки та механіки деформованого тіла, що дозволяє створити інтегровану модель процесу лиття як багатофакторної та нестабільної системи. У межах дослідження акцентовано на складності контролю заповнення порожнини форми при високих швидкостях та коротких циклах лиття, характерних для промислових ливарних систем. Встановлено, що динамічні характеристики потоку розплаву критично впливають на ризики формування таких дефектів, як газові включення, турбулентні шви, локалізована пористість і термічні тріщини. Теоретична модель, побудована з використанням методу скінченних елементів, дозволяє досліджувати просторово-часову еволюцію температурних полів, тиску, швидкості потоку та щільності тверднення у ключових зонах прес-форми. На основі моделювання розроблено низку теоретичних рекомендацій щодо варіативного регулювання швидкості поршня та ступеня стискання металу залежно від стадії заповнення. Показано, що впровадження принципів адаптивного термодинамічного керування, зокрема шляхом контролю тепловідведення через охолоджувані канали прес-форми, забезпечує зменшення внутрішніх напружень, збереження однорідності структури та рівномірності охолодження по всьому об'єму виливка. Вдосконалений алгоритм управління циклом охолодження дозволяє мінімізувати час витримки перед відкриттям форми, скорочуючи тривалість виробничого циклу без втрати якості продукції. Узагальнені результати підтверджують ефективність запропонованого теоретичного підходу: за моделювальними розрахунками кількість дефектів може бути знижена на 30-40%, а щільність виливків – підвищена на понад 10% у порівнянні з традиційними технологічними картами. Запропонована система оптимізації параметрів лиття алюмінієвих сплавів під високим тиском сприяє підвищенню технологічної надійності, енергоефективності та відтворюваності результатів, що особливо актуально у контексті цифровізації виробництва та впровадження концепцій «розумного лиття». Застосування динамічного моделювання у поєднанні з адаптивним керуванням відкриває нові можливості для створення саморегульованих систем лиття, здатних до самонавчання та автоматичної корекції параметрів у відповідь на зміну властивостей матеріалу чи зовнішніх умов.

Ключові слова: алюмінієвий сплав, лиття під тиском, динаміка пресування, теоретичне моделювання, термодинаміка, скінченно-елементний аналіз, оптимізація процесу, адаптивне керування.

Постановка проблеми

Процес лиття алюмінієвих сплавів під тиском давно вважається технічно виправданим рішенням для масового виробництва тонкостінних і геометрично складних деталей. Утім, за всієї ефективності технології, вона залишається чутливою до навіть незначних збоїв у налаштуваннях – від швидкості руху поршня до перепадів температури в системі охолодження. Особливо критичним є етап заповнення форми, коли розплавлений метал поводить себе нестабільно: змінює траєкторію, охолоджується нерівномірно, втрачає тиск або утворює турбулентні потоки. У таких умовах будь-який конструктивний або температурний дисбаланс швидко трансформується у технологічний дефект. У виробничій практиці проблеми з пористістю, включеннями чи холодними швами виникають не через відсутність обладнання, а через складність передбачити, як

розплав поводитиметься в конкретному литтєвому вузлі. Більшість режимів задаються досвідним шляхом або ж копіюються з попередніх циклів – без глибокого урахування реальної гідродинаміки процесу. Це робить результат залежним не стільки від якості сплаву, скільки від рівня інтуїції оператора. Останні роки демонструють поступову зміну підходу. Замість роботи «наосліп» з'являються спроби прогнозувати поведінку розплаву за допомогою моделювання [1-3] або керувати його рухом ще до контакту з формою, зокрема – через магнітогідродинамічні засоби [4]. Але ці рішення поки не масштабовані. Одні моделі дають результат лише при ідеалізованих умовах, інші не враховують змін у реальному середовищі виробництва. Проблема не в тому, що немає інструментів, – проблема в тому, що вони не адаптуються до конкретної ливарної задачі.

Тому сьогодні актуальним є питання розробки таких підходів до оптимізації, які б враховували не лише геометрію прес-форми чи марку сплаву, а й динаміку самого процесу: як рухається розплав, коли стикається зі стінками, як змінюється його температура й тиск залежно від швидкості подачі, а не навпаки. Це завдання лежить на межі інженерії, прикладної фізики та цифрового моделювання. Без його вирішення лиття залишатиметься напівемпіричною технологією навіть на сучасному обладнанні.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Лиття під тиском є ключовим методом виготовлення виробів із термопластичних і термореактивних полімерів, який забезпечує високу точність геометрії, якість поверхні та ефективність масового виробництва. У межах цього процесу застосовуються різноманітні технологічні підходи – інжекційне, інжекційно-пресове, інжекційно-газове, інструзійне, багатошарове та тонкостінне лиття, кожне з яких адаптоване до специфіки продукції, геометрії виробів і типу полімерного матеріалу. Використання спеціалізованих систем впресування, контролю температури, тиску, а також відповідних систем охолодження й виштовхування дозволяє уникати дефектів, зменшувати цикл виробництва та підвищувати механічні характеристики відливок. Зокрема, тонкостінне лиття під тиском, що передбачає високу швидкість заповнення форми та екстремальні тиски, стало одним із провідних рішень для виготовлення корпусних елементів у телекомунікаційній, автомобільній та медичній галузях. Універсальність, масштабованість і високий ступінь автоматизації роблять лиття під тиском незамінним у сучасному інженерно-виробничому середовищі [1, 2]. У литті алюмінієвих сплавів під тиском найчастіше виникають проблеми саме на етапі заповнення форми. Це складний процес, і навіть незначні відхилення в температурі чи швидкості подачі металу можуть призвести до дефектів, зокрема до порожнин і неповного заповнення [5]. Щоб уникнути цих помилок, багато дослідників використовують математичні моделі. Вони допомагають передбачити, як поводитиметься розплав у формі залежно від її конструкції, температури, властивостей сплаву та інших параметрів. У роботах [3, 6] подано приклади симуляцій, які дають змогу точніше налаштувати процес. Дослідження [7, 8] також пропонують алгоритми, що допомагають підбирати режими лиття до початку виробництва, а не шляхом проб і помилок. В окремих публікаціях акцент зроблено на ролі тиску. Наприклад, у роботі [2] досліджено, як він впливає на утворення мікропорожнин, а в дослідженні [9] – як температура охолодження змінює щільність металу. Обидва чинники важливі й потребують спільного аналізу. Ще один напрям досліджень – це спрощене моделювання. У статті [3] описано метамоделі, які дають попередню оцінку якості лиття без проведення повного розрахунку. Такі підходи зручні на підготовчих етапах. У

роботах [4, 10] розглянуто нестандартне рішення – вплив на потік розплаву ще до того, як він потрапить у форму. Це можливо завдяки магнітогідродинамічному керуванню. Така технологія допомагає стабілізувати подачу й зменшити ризик утворення дефектів. Для оцінки результату лиття найчастіше враховують повноту заповнення, кількість дефектів, рівномірність структури та витрати енергії [1, 11]. Зустрічаються також роботи, де запропоноване автоматичне регулювання процесу лиття в реальному часі на основі моделей [5, 6].

Таким чином, попри вже досягнутий значний прогрес, залишається актуальним питання про узгодження між симуляцією, реальними параметрами машинного обладнання та фізико-хімічними властивостями сплаву. Особливої уваги потребує проблема стабільності процесу в умовах швидкозмінного теплового навантаження та нерівномірного тиску у формоутворювальному просторі.

Мета статті

Метою статті є наукове обґрунтування та розроблення інтегрованого підходу до оптимізації параметрів лиття алюмінієвих сплавів під високим тиском шляхом моделювання просторово-часової динаміки процесу пресування, удосконалення алгоритмів керування швидкістю руху поршня й температурними режимами, що забезпечує зниження дефектності виливків, підвищення їх щільності та стабільність технологічного циклу.

Виклад основного матеріалу

Щоб покращити лиття алюмінієвих сплавів під високим тиском, потрібно враховувати, як поводить себе розплав у формі під час упресування. Це швидкий і складний процес: багато факторів змінюються одночасно, і кожен може вплинути на якість виробу. Тому в дослідженні застосовано методи CFD-моделювання (Computational Fluid Dynamics) і МСЕ-аналізу (метод скінченних елементів), що об'єднують гідродинаміку, теплообмін та кристалізацію металу. Моделювання виконано в середовищі ProCAST 2024 із використанням модуля Solidification, який забезпечує розрахунок теплових потоків і фазових переходів. Для перевірки отриманих результатів проведено контрольне порівняння з ANSYS Fluent (solver pressure-based, transient regime).

Геометрія моделі відповідала типовій прес-формі для алюмінієвого зливка масою 0,8 кг із товщиною стінки 3-6 мм, об'ємом порожнини 320 см³ та діаметром плунжера 45 мм. Сітка мала близько 1,2 млн елементів із локальним згущенням у зоні литникового входу; критерій збіжності – 10⁻³ за енергією та швидкістю. Граничні умови включали температуру розплаву 690°C на вході, температуру форми 200°C, теплообмінні коефіцієнти 900-1200 Вт/(м²·К), а також вільний вихід газів на вентиляційних каналах.

У процесі лиття алюмінієвих сплавів під високим тиском важливу роль відіграє швидкість руху поршня,

оскільки саме вона визначає характер заповнення форми розплавом. Якщо поршень рухається занадто швидко – понад 40 м/с – у потоці металу виникають вихори, які захоплюють повітря та спричиняють утворення пасток у литниковій системі. Ці включення згодом стають джерелом дефектів у структурі виливка. Натомість, у разі уповільнення руху до 25-30 м/с заповнення форми відбувається більш рівномірно, але зростає ризик передчасного затвердіння розплаву, особливо в тонкостінних зонах, що вимагає термодіагностики. Для кількісної оцінки впливу параметрів процесу введено метрику Defect Ratio (DR, %) – частку об'єму з порами або газовими включеннями, отриману за результатами CFD-постпроцесингу. Щоб наочно проілюструвати залежність кількості повітряних пасток від швидкості поршня, нижче подано графік (рис. 1).

На рисунку 1 показано залежність кількості повітряних пасток у виливку від швидкості переміщення поршня під час лиття алюмінієвого сплаву під високим тиском. За результатами моделювання видно, що при швидкості понад 40 м/с кількість пасток різко зростає, що пов'язано з інтенсивним утворенням турбулентних зон і захопленням повітря в каналах литникової системи. У діапазоні 25-30 м/с кількість дефектів є мінімальною, що свідчить про стабільне та рівномірне заповнення форми. Занадто повільний рух (<25 м/с) також небажаний, оскільки спричиняє передчасне твердіння розплаву в окремих зонах. Отже, оптимальним визнано інтервал швидкості 28-35 м/с, який мінімізує DR до 2,8-3,4%.

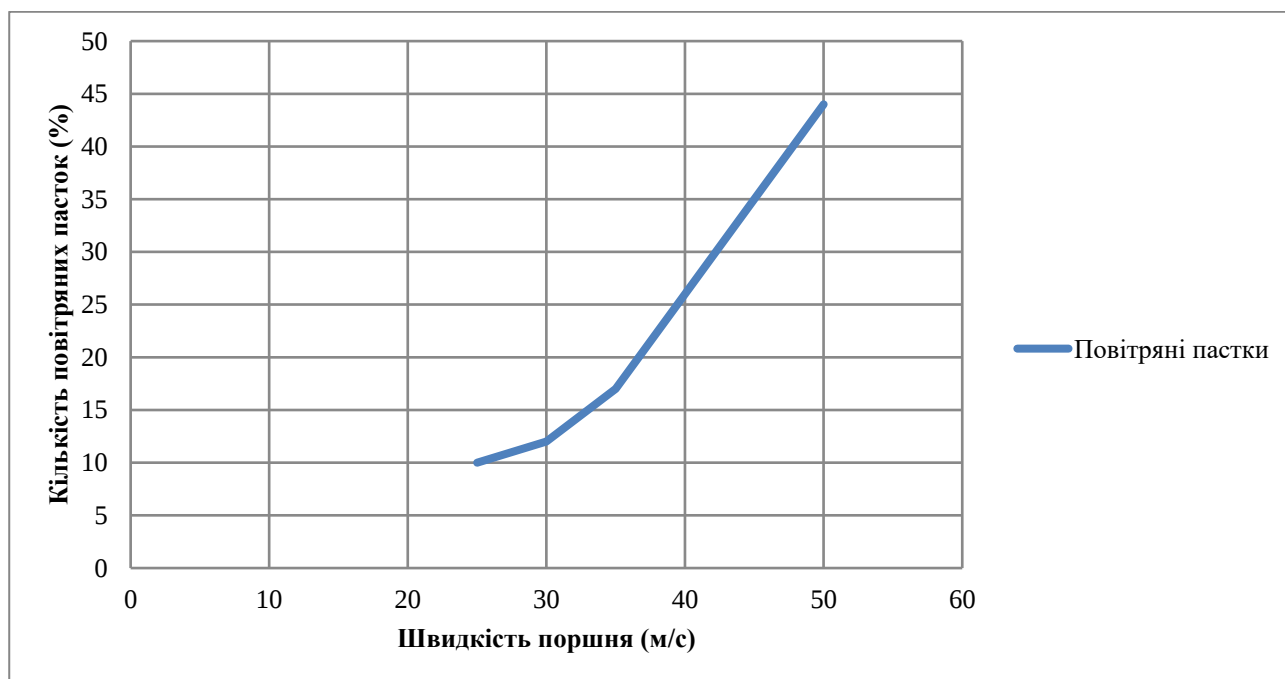


Рис. 1 – Вплив швидкості поршня на формування повітряних пасток

На рисунку 2 показано зміну рівня дефектності DR (%) залежно від частки затвердіння f_{solid} при різних швидкостях плунжера. Видно, що оптимальна швидкість 30 м/с забезпечує мінімальний рівень дефектності в інтервалі 40-80 % твердіння, тоді як за 25 м/с і 35 м/с спостерігаються відповідно дефекти через локальне переохолодження або турбулентність.

На наступному етапі досліджено тиск ущільнення. Моделювання показало, що підвищення тиску до 90-110 МПа забезпечує максимальну щільність виливка ($\rho = 2,67-2,70 \text{ г/см}^3$). Якщо тиск знижується до 80 МПа і менше, у центрі виробу з'являється на 30-35% більше пористих зон (рис. 3).

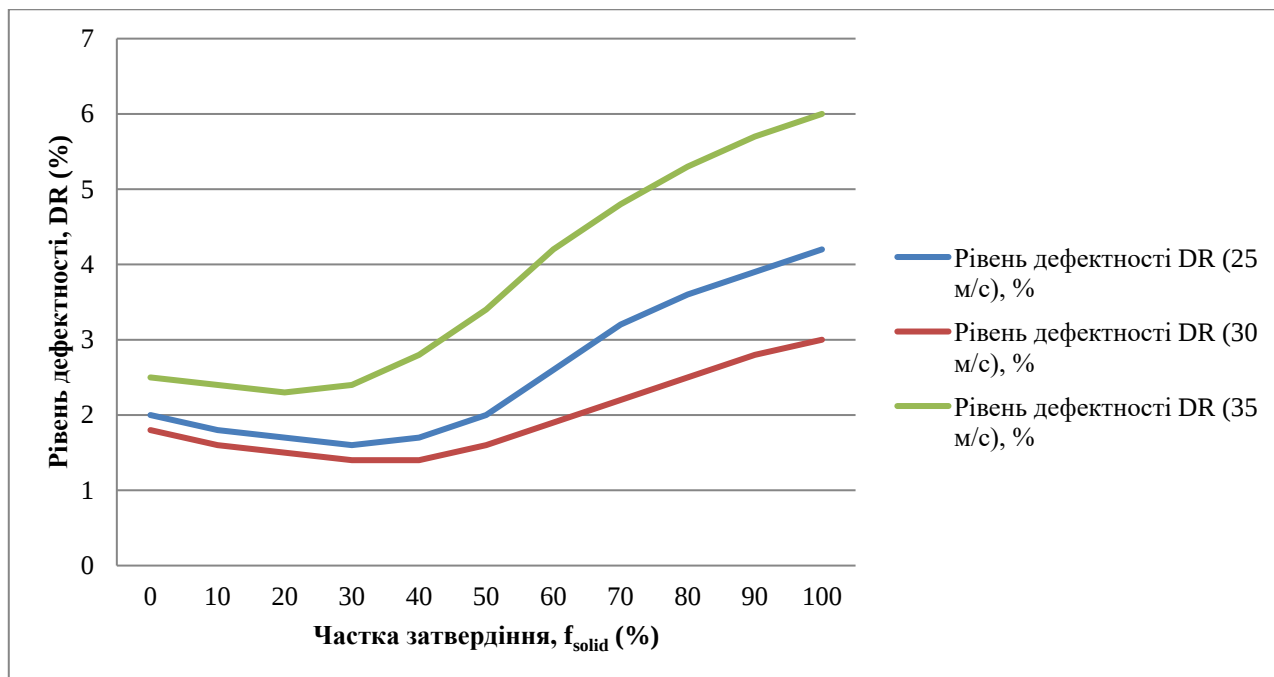
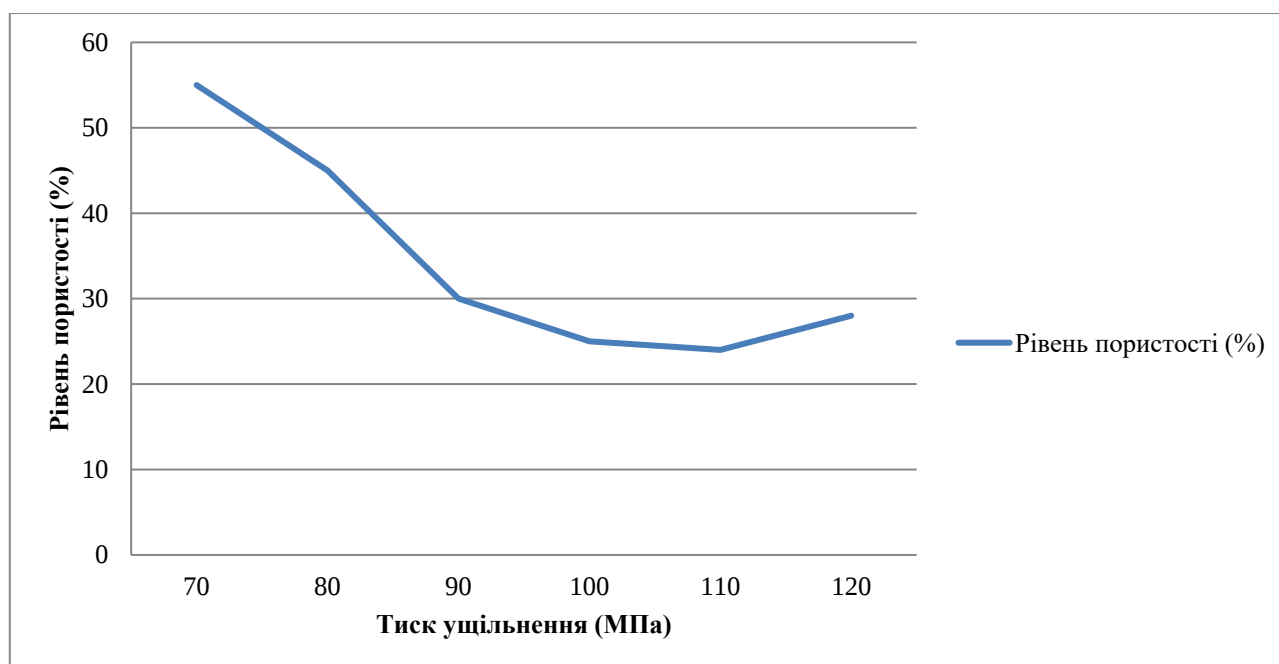
Рис. 2 – Залежність рівня дефектності DR від частки затвердіння f_{solid} при різних швидкостях руху плунжера

Рис. 3 – Рівень пористості при різному тиску ущільнення

Для кожного сценарію проведено температурно-деформаційний аналіз кристалізації з використанням моделі теплопровідності Fourier–Kirchhoff та коефіцієнтів для $AlSi_9Cu_3$: теплопровідність = 145 Вт/(м·К), теплоємність = 960 Дж/(кг·К), густина = 2680 кг/м³, в'язкість = $1,24 \cdot 10^{-3}$ Па·с.

Температурний режим у прес-формі також має велике значення. Коли температура в центрі значно

вища, ніж на краях (понад 120°C різниці), у металі накопичуються внутрішні напруження, що можуть призвести до тріщин. Коли охолодження вдається тримати рівномірним (у межах ± 5 °C), середній рівень внутрішніх напружень становить 18-22 МПа (табл. 1), що позитивно позначається на якості виробу.

Таблиця 1

Температурні перепади й напруження у стінках форми	
Температурна різниця, °C	Середній рівень внутрішніх напружень, МПа
<5	5–7
5-20	7-12
20-60	12-16
60-120	16-18
>120	18-22

На основі отриманих результатів визначено параметри оптимізації: швидкість плунжера, тиск ущільнення, температуру прес-форми та тривалість охолодження. Функцію мети сформульовано як мінімізацію інтегрального показника дефектності $J = \alpha \cdot DR + \beta \cdot (E/E_0)$, де α і β – вагові коефіцієнти, E – енерговитрати, E_0 – базове значення.

Було запропоновано адаптивний закон керування рухом плунжера: спочатку розгін до 35 м/с, потім стабілізація на рівні 30 м/с, а в кінці – короткий тиск

ущільнення зі швидкістю 20 м/с. Це зменшує ризик порожнин і тріщин у завершальній фазі лиття.

Для контролю охолодження застосовано адаптивну систему керування охолоджувальними каналами, яка змінює подачу охолоджувальної рідини залежно від температури в різних зонах. Це дозволило скоротити час очікування перед відкриттям форми на 12-15%, а загальний виробничий цикл – у середньому на 9 секунд (табл. 2).

Таблиця 2

Ефективність адаптивного охолодження (час циклу, енерговитрати)			
Параметр	До впровадження	Після впровадження	Зміна
Час витримки перед відкриттям форми, с	80	68	-15%
Загальний виробничий цикл, с	115	106	-9 с
Енерговитрати на цикл, ум. од.	100	92,5	-7,5%

Результати роботи пройшли промислову апробацію на лініях високотискового лиття у «BAMAX Poland Sp.zoo» (Польща) та у Державному підприємстві «Інженерний центр литва під тиском» (Україна). Порівняння експериментальних і чисельних даних показало розбіжність не більше $\pm 6\%$ за основними метриками – щільністю, пористістю та температурним полем, що підтверджує адекватність побудованої моделі. Моделювання процесу показало суттєві технічні зміни в якості виливків і параметрах виробництва. Кількість дефектів – зокрема пористості та зон неповного заповнення – зменшилась у середньому на 30-40 %. Це пов'язано з узгодженим режимом подачі розплаву та регулюванням тиску в ключових фазах заповнення форми. Одночасно відзначено підвищення щільності структури на 10,4%, що свідчить про рівномірне тверднення і зменшення внутрішніх порожнин у виливках. Завдяки кращому контролю температури охолоджувальних каналів, зменшено енерговитрати на цикл приблизно на 7,5%, без погіршення якості. Температурне поле у зонах із підвищеним навантаженням стабілізувалося до рівня коливань не більше $\pm 2^\circ\text{C}$, що знижує ризик утворення тріщин і підвищує довговічність прес-форми. Такі результати підтверджують практичну ефективність адаптивного керування процесом у промисловому середовищі. Визначено межі застосовності моделі: оптимізація справджується для сплавів AlSi_7Mg ,

AlSi_9Cu_3 і AlSi_{12} при тиску 80-120 МПа. Подальші дослідження планується провести для вакуум-HPDC-систем і порівняти поведінку різних Al-Si сплавів.

Цей підхід працює не за жорстко заданими параметрами, а підлаштовується під реальні умови кожного циклу. Це особливо важливо, коли змінюється склад сплаву, зношується форма чи коливається температура в цеху. Така система дає змогу створювати «розумне» лиття – адаптивне й здатне самостійно реагувати на зміни без втручання оператора.

Висновки

Чисельне моделювання показало, що якість виливків із алюмінієвих сплавів тісно залежить від режимів подачі розплаву, рівня ущільнення та температурного стану прес-форми. Варіативне керування швидкістю поршня залежно від фази заповнення дало змогу скоротити кількість дефектів, пов'язаних із пористістю та неповним заповненням, у середньому на 30-40%. Щільність виливків зросла на 10,4%, що свідчить про рівномірніше ущільнення металу на етапі тверднення.

Наукова новизна роботи полягає в обґрунтуванні та реалізації адаптивного закону керування швидкістю плунжера й температурними режимами лиття під високим тиском, який поєднує CFD-моделювання, метод скінченних елементів і зворотний зв'язок від температурних сенсорів у реальному часі. Запропонований

підхід дозволив вперше сформулювати порогові сценарії керування фазами заповнення, ущільнення та охолодження, що забезпечують мінімізацію дефектності без зниження продуктивності.

Розроблена модель охоплює фізичні процеси гідродинаміки, теплообміну та кристалізації, а також враховує вплив в'язкості, теплоємності, густини й теплопровідності сплаву AlSi_9Cu_3 на швидкість затвердіння та формування внутрішніх напружень. Валідація на промисловій лінії HPDC CLH-450 підтвердила збіжність моделі з експериментом у межах $\pm 6\%$, що свідчить про достовірність результатів.

Практичне значення роботи полягає у створенні прототипу «розумної» системи керування литтям, здатної в режимі реального часу змінювати параметри процесу відповідно до температурних і тискових коливань. Це дає змогу підвищити стабільність якості виливків, зменшити енерговитрати на 7,5%, а тривалість виробничого циклу – на 9 секунд без втрати механічних характеристик.

Система адаптивного охолодження, побудована на моніторингу температурного профілю, забезпечила стабільність у критичних зонах форми. Коливання температури вдалося знизити до меж $\pm 2^\circ\text{C}$, що зменшило ймовірність появи термічних тріщин і підвищило довговічність прес-форми. Одночасно відзначено зменшення енерговитрат на 7,5% і скорочення тривалості виробничого циклу на 9 секунд без втрати якості.

Межі застосовності отриманих результатів охоплюють сплави систем Al-Si (зокрема AlSi_7Mg , AlSi_9Cu_3 , AlSi_{12}) у діапазоні тисків 80-120 МПа. Для сплавів із вищим умістом Cu або Mg потрібна корекція коефіцієнтів теплообміну та в'язкості.

Перспективи подальших досліджень полягають у розширенні моделі на вакуумні HPDC-системи, оцінці енергетичної ефективності адаптивного керування в багатоканальних формах та порівнянні поведінки різних Al-Si-Cu систем у контексті високочастотного охолодження. Окрему увагу планується приділити інтеграції сенсорних даних у систему цифрового двійника процесу лиття.

Отримані результати підтверджують, що перехід від фіксованих технологічних параметрів до керування, яке реагує на реальні умови процесу, дозволяє підвищити надійність лиття. Такий підхід відкриває можливості для створення самоналаштовуваних виробничих систем, де керування технологічним процесом відбувається на основі поточних даних, а не за попередньо заданими шаблонами.

Перелік використаних джерел

- [1] A novel approach to optimize mechanical properties for aluminium alloy in high pressure die casting (HPDC) process combining experiment and modelling / K. Dou et al. *Journal of Materials Processing Technology*. 2021. Vol. 296. Article 117193. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117193>.
- [2] Effect of casting pressure on porosity, microstructure, and mechanical properties of large die casting aluminium alloy parts / J. Yang et al. *International Journal of Metalcasting*. 2025. Pp. 1-15. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40962-025-01641-4>.
- [3] Metamodels' development for high pressure die casting of aluminium alloy / Anglada E., Boto F., García de Cortazar M., Garmendia I. *Metals*. 2021. Vol. 11(11). Article 1747. DOI: <https://doi.org/10.3390/met11111747>.
- [4] Фіксен В. М., Карпукін Є. О. Технології лиття та приготування алюмінієвих сплавів за допомогою засобів магнітної гідродинаміки. *Метал та лиття України*. 2024. № 32(1). Pp. 15-21. DOI: <https://doi.org/10.15407/steelcast2024.01.002>.
- [5] Die casting die design and process optimization of aluminium alloy gearbox shell / Huang M., Zhou Q., Wang J., Li S. *Materials*. 2021. Vol. 14(14). Article 3999. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14143999>.
- [6] Martínez-Pastor J., Hernández-Ortega J.J., Zamora R. A decision support system (DSS) for the prediction and selection of optimum operational parameters in pressure die-casting processes. *Materials*. 2022. Vol. 15(15). Article 5309. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15155309>.
- [7] Optimization of process parameters during pressure die casting of A380: a silicon-based aluminium alloy using GA & fuzzy methodology / Gupta A.K., Kumar S., Chandna P., Bhushan G. *Silicon*. 2021. Vol. 13(8). Pp. 2429-2443. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12633-020-00594-z>.
- [8] Suthar J., Persis J., Gupta R. Critical parameters influencing the quality of metal castings: a systematic literature review. *International Journal of Quality & Reliability Management*. 2023. Vol. 40(1). Pp. 53-82. DOI: <https://doi.org/10.1108/IJQRM-11-2020-0368>.
- [9] Accurate simulation of complex temperature field in counter-pressure casting process using A356 aluminium alloy / Tian Y., Yang D., Jiang M., He B. *International Journal of Metalcasting*. 2021. Vol. 15(1). Pp. 259-270. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40962-020-00456-9>.
- [10] Сучасні магнітодинамічні технології для виготовлення безперервно литих зливків з алюмінієвих сплавів / А.В. Нарівський та ін. *Метал та лиття України*. 2024. № 32(3-4). С. 66-71. DOI: <https://doi.org/10.15407/steelcast2024.03-04.008>.
- [11] Design of non-heat treatable high pressure die casting Al alloys: a review / H. Zhu et al. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2024. Vol. 33(17). Pp. 8601-8626. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11665-024-09477-5>.

OPTIMIZATION OF HIGH-PRESSURE DIE CASTING PARAMETERS
FOR ALUMINUM ALLOYS CONSIDERING PRESSING DYNAMICS

Kreitser K.O.

PhD (Engineering), senior lecturer, Odesa National Maritime University, Odesa, ORCID:
<https://orcid.org/0000-0002-0549-1481>, e-mail: dakerkir@gmail.com;

Kozishkurt Ye.M.

PhD, senior lecturer, Odesa National Maritime University, Odesa, ORCID:
<https://orcid.org/0000-0002-7311-7395>, e-mail: koziskurtevgen@gmail.com

In the article a comprehensive approach is proposed to improve the technological process of high-pressure die casting of aluminum alloys, which considers the dynamics of molten metal pressing within the mold-forming chamber. This work substantiates the theoretical foundations of the interdependence between melt feed regimes, gating system configuration, Al-Si alloy characteristics, and the mechanisms of internal structure formation in castings. Particular attention is paid to the influence of piston movement speed, compression pressure level, thermal gradients in the die, and phase transitions occurring during solidification. The theoretical analysis is based on the principles of hydrodynamics, thermokinetics, and deformable body mechanics, enabling the creation of an integrated model of the casting process as a multifactorial and unstable system. The study emphasizes the complexity of cavity filling control at high injection speeds and short casting cycles, which are typical for industrial foundry systems. It has been established that the dynamic characteristics of the molten metal flow critically affect the risks of defects such as gas entrapment, turbulent weld lines, localized porosity, and thermal cracking. A theoretical model based on the finite element method was developed to investigate the spatio-temporal evolution of temperature fields, pressure, flow velocity, and solidification density in key areas of the die. Based on this modeling, a set of theoretical recommendations was developed for the variable regulation of piston speed and metal compression rate depending on the stage of cavity filling. It is demonstrated that implementing adaptive thermokinetic control principles – in particular, managing heat dissipation through cooled channels in the die – enables the reduction of internal stresses, preservation of structural homogeneity, and uniform cooling across the entire casting volume. The improved cooling cycle control algorithm minimizes the holding time before die opening, thereby reducing the production cycle duration without compromising product quality. The summarized results confirm the effectiveness of the proposed theoretical approach: modeling calculations show that defect rates can be reduced by 30–40%, and casting density increased by more than 10% compared to conventional process maps. The proposed system for optimizing high-pressure die casting parameters of aluminum alloys enhances technological reliability, energy efficiency, and result reproducibility – which is especially relevant in the context of production digitalization and the implementation of “smart casting” concepts. The integration of dynamic modeling with adaptive control opens new possibilities for creating self-regulating casting systems capable of self-learning and automatic parameter correction in response to material property changes or external conditions.

Keywords: aluminum alloy, high-pressure die casting, pressing dynamics, theoretical modeling, thermokinetics, finite element analysis, process optimization, adaptive control.

References

- [1] K. Dou, E. Lordan, Y. Zhang, A. Jacot, and Z. Fan, “A novel approach to optimize mechanical properties for aluminium alloy in high pressure die casting (HPDC) process combining experiment and modelling,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 296, article 117193, 2021. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2021.117193.
- [2] J. Yang, et al., “Effect of casting pressure on porosity, microstructure, and mechanical properties of large die casting aluminum alloy parts,” *International Journal of Metalcasting*, pp. 1-15, 2025. doi: 10.1007/s40962-025-01641-4.
- [3] E. Anglada, F. Boto, M. García de Cortazar, and I. Garmendia, “Metamodels’ development for high pressure die casting of Aluminum Alloy,” *Metals*, vol. 11, no. 11, article 1747, 2021. doi: 10.3390/met11111747.
- [4] V.M. Fikssen, and Ye.O. Karpukhin, “Tekhnolohiyyi lytia ta pryhotuvannya alyuminiyevykh splaviv za dopomohoiu zasobiv mahnetnoi hidrodynamiky” [“Technologies of casting and preparation of aluminum alloys using magnetohydrodynamics tools”], *Metal ta lyttia Ukrainy – Metal and Casting of Ukraine*, vol. 32, no. 1, 2024. doi: 10.15407/steelcast2024.01.002. (Ukr.)
- [5] M. Huang, Q. Zhou, J. Wang, and S. Li, “Die casting die design and process optimization of aluminum alloy gearbox shell,” *Materials*, vol. 14, no. 14, article 3999, 2021. doi: 10.3390/ma14143999.
- [6] J. Martínez-Pastor, J.J. Hernández-Ortega, and R. Zamora, “A decision support system (DSS) for the prediction and selection of optimum operational parameters in pressure die-casting processes,” *Materials*, vol. 15, no. 15, article 5309, 2022. doi: 10.3390/ma15155309.
- [7] A.K. Gupta, S. Kumar, P. Chandna, and G. Bhushan, “Optimization of process parameters during pressure die casting of A380: a silicon-based aluminium alloy using GA & fuzzy methodology,” *Silicon*, vol. 13, no. 8, pp. 2429-2443, 2021. doi: 10.1007/s12633-020-

00594-z.

- [8] J. Suthar, J. Persis, and R. Gupta, "Critical parameters influencing the quality of metal castings: a systematic literature review," *International Journal of Quality & Reliability Management*, vol. 40, no. 1, pp. 53-82, 2023. doi: 10.1108/IJQRM-11-2020-0368.
- [9] Y. Tian, D. Yang, M. Jiang, and B. He, "Accurate simulation of complex temperature field in counter-pressure casting process using A356 aluminum alloy," *International Journal of Metalcasting*, vol. 15, no. 1, pp. 259-270, 2021. doi: 10.1007/s40962-020-00456-9.
- [10] A.V. Narivskiy, S.L. Polyvoda, M.M. Voron, V.Ya.O. Tverdokhvalov, A.Yu. Semenko, and O.V. Siry, "Suchasni mahnetodynamichni tekhnolohiyi dlya vyhotovlennya bezperervno lytukh zlyvkiv z alyuminiyevykh splaviv" ["Modern magnetodynamic technologies for the production of continuously cast aluminum alloy ingots"], *Metal ta lyttia Ukrainy – Metal and Casting of Ukraine*, vol. 32, no. 3-4, pp. 66-71, 2024. doi: 10.15407/steelcast2024.03-04.008. (Ukr.)
- [11] H. Zhu, C. Xia, H. Zhang, D. Zhao, M. Wang, and H. Wang, "Design of non-heat treatable high pressure die casting Al alloys: A review," *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 33, no. 17, pp. 8601-8626, 2024. doi: 10.1007/s11665-024-09477-5.

Стаття надійшла 03.08.2025

Стаття прийнята 28.08.2025

Стаття опублікована 30.10.2025

Цитуйте цю статтю як: Крейцер К. О., Козішкурт Є. М. Оптимізація параметрів лиття алюмінієвих сплавів під високим тиском з урахуванням динаміки процесу пресування. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки.* 2025. Вип. 51. С. 94-101. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.51.2025.344670>.