

Інженерне моделювання та проектування процесів одержання виливків відповідального призначення методом лиття з кристалізацією під тиском

У статті представлено результати досліджень щодо впровадження цифрових технологій Industry 4.0 у виробництво литих деталей відповідального призначення. Ливарне виробництво є основним постачальником виливків для машинобудування. Якість отриманих виливків залежить від багатьох технологічних факторів. Під час вирішення зазначених завдань фахівці у сфері підготовки технологічних процесів виготовлення виливків змушені приймати рішення в умовах обмеженої інформації про фізичні закономірності перебігу процесів. Це обумовлює необхідність застосування сучасних підходів до аналізу та прогнозування. Тому одним із визначальних етапів створення високоефективного технологічного процесу отримання литих деталей є інженерне моделювання та проектування ливарних процесів із застосуванням спеціалізованих програмних комплексів, які дозволяють з високою точністю відтворювати фізико-технологічні процеси, що відбуваються під час формування виливків.

Метою роботи є підвищення якості виливків відповідального призначення, одержаних методом лиття з кристалізацією під тиском на основі використання інженерного моделювання та проектування процесів лиття.

На основі результатів чисельного моделювання процесу охолодження виливка та аналізу розподілу температурних полів встановлено характер існування рідкої, напівтвердої та твердої фаз у його об'ємі. Це дозволило детально проаналізувати послідовність охолодження та затвердіння виливка. Отримані результати свідчать про наявність критичних зон затвердіння, в яких останні обсяги рідкого металу ізольовані від живлення, що безпосередньо вказує на необхідність корекції технологічних параметрів лиття або тиску пресування для запобігання появи дефектів газоусаджувального характеру. Встановлено, що на виливках, одержаних без застосування тиску і при тиску 5,0 МПа, є дефекти ливарного походження — окремі та сконцентровані раковини розміром до 3 мм. При тиску 15,0 МПа спостерігалися рихлоти та окремі раковини до 1,5 мм. При тиску від 40,0 МПа та вище ливарних дефектів не виявлено. Методом моделювання та експериментально було встановлено, що для розмірного ряду поршнів діаметром 150...210 мм з алюмінієвих сплавів АК12М2МгН та АК21М2,5Н2,5, тиск пресування 40,0 МПа достатній для отримання бездефектних виливків.

Під час проведення промислового експерименту одночасно визначали вплив термообробки на мікроструктуру зразків зі сплаву АК12М2МгН. Використовували такі типи термічної обробки: 1) старіння 200 °С; 2) гартування 495 °С і старіння 195 °С; 3) старіння 220 °С; 4) гартування 510 °С і старіння 250 °С. При дослідженні зразків усіх варіантів встановлено, що мікроструктура їх складається з дендритів α -твердого розчину включень евтектики у вигляді колоній і включень на основі кремнію. На зразках без застосування навантаження з усіма видами термообробки виявлена дещо грубіша структура (евтектика має більш грубу голчасту будову, кремній розташовується скупченнями), у порівнянні з іншими варіантами, на яких відзначається тонкодисперсна структура з більш чітко вираженою переважною орієнтацією дендритів α -твердого розчину вздовж осей. При додатку навантаження 40,0 МПа відзначається значна коагуляція включень евтектики, їх рівномірний розподіл по полю шліфа.

Ключові слова: лиття із кристалізацією під тиском, інженерне моделювання, якість, тиск пресування, термічна обробка.

Вступ. Сучасне виробництво литих деталей відповідального призначення двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) перебуває на етапі суттєвих трансформацій, що обумовлені зростаючими вимогами до ефективності виробничих процесів, екологічної безпеки та ресурсозбереження, зменшення негативного впливу на довкілля та забезпечення раціонального використання ресурсів.

Поршень належить до числа найбільш відповідальних і навантажених деталей двигунів внутрішнього згоряння. Експлуатаційна надійність двигуна значною мірою визначається якістю, довговічністю та експлуатаційними характеристиками поршнів, які працюють в умовах інтенсивних теплових та механічних впливів. У зв'язку з цим до них висуваються підвищені вимоги щодо міцності, зносостійкості, антифрикційних властивостей, теплопровідності, корозійної стійкості та інших показників. З позицій ливарного виробництва поршень є виливком підвищеної складності, що характеризується наявністю значних за обсягом теплових вузлів, суттєвою різницею у товщині стінок та необхідністю формування конструктивних елементів, зокрема кільцевих канавок для забезпечення ефективного охолодження.

Сьогодні поршні сучасних високооборотних двигунів виготовляються різними способами лиття із алюмінієвих сплавів. В даний час існує стійка тенденція переходу від традиційних способів лиття в піщані форми до спеціальних способів лиття. Використання останніх сприяє зниженню металоємності одержуваних виливків, досягненню високих фізико-механічних характеристик та експлуатаційних властивостей деталей, а також різкому зниженню трудовитрат [1—2].

Метод лиття з кристалізацією під тиском (ЛКТ) забезпечує отримання щільних заготовок із мінімальними припусками на подальшу механічну обробку та підвищеними високими фізико-механічними та експлуатаційними характеристиками [1, 3]. Процес передбачає заливання розплаву в матрицю під дією сили тяжіння з подальшим формуванням виливка пуансоном і ущільненням у процесі витримки під тиском до повного завершення кристалізації [3, 4]. Після вилучення з прес-форми заготовки можуть піддаватися різним видам обробки, включаючи термічну та механічну [5, 6].

Якість отриманих виливків значною мірою залежить від комплексу технологічних параметрів, зокрема тиску пресування, температури розплаву, початкової температури прес-форми, тривалості витримки до прикладання тиску і під тиском, а також швидкісних режимів формоутворення і пресування [7].

Тому підвищення якості виливків та ліквідація всіх видів браку під час лиття з кристалізацією під тиском є актуальним завданням ливарного виробництва.

Постановка проблеми. У виливках поршнів при ЛКТ можливі такі дефекти: усадкові раковини та пористість, тріщини, недоливи.

Тріщини найчастіше виникають у виливках складної конфігурації, що мають різкі переходи від тонких стінок до товстих, що виготовляються в прес-формах з кількома площинами роз'єму. Усунення тріщин у виливках можливе зусиллями конструкторів за рахунок доопрацювання її конструкції. Часто цей дефект може бути усунений за рахунок застосування оптимальних режимів лиття, наприклад, зміни часу пресування та витримки розплаву до застосування тиску, зміни тиску пресування. Зміна розташування виливка у формі (поворот на 180 °) дозволяє також усувати тріщини.

Вибір сплаву і параметрів плавки значною мірою визначають як технологічні властивості розплаву, так і фізико-механічні властивості виливка. Більшість промислових металів і сплавів зазнає при затвердінні усадку, в результаті якої відбувається зменшення об'єму [8]. Тому, брак виливків за усадковими раковинами і усадковою пористістю є найпоширенішим браком при литті з кристалізацією під тиском.

Процес формування усадки та усадкової раковини у виливку при литті з кристалізацією під тиском і при литті в металеву форму без застосування тиску відрізняються один від одного.

Процес формування усадкової раковини у виливку при литті в металеву форму без застосування тиску відбувається наступним чином.

До появи твердої кірки усадка проявляється у вигляді зниження рівня розплаву в металевій формі. Кінетику утворення відкритої усадкової раковини можна пояснити, розглядаючи процес затвердіння як безперервне утворення шарів, що кристалізуються, які нашаровуються на заздалегідь затверділі шари. Якщо виливок або його частина починає твердіти зовні, то ізотермічні поверхні затверділої фази поступово сходяться у напрямку до теплової осі або теплового центру виливка.

Після утворення контуру виливка розміри цього контуру зменшуються внаслідок зниження температури. Розплав, укладений у контурній оболонці, зазнає великої усадки, оскільки спочатку він повинен віддати теплоту перегріву, потім затвердіти і потім охолонути до температури навколишнього середовища. При цьому утворюються усадкова раковина та порожнечі в місцях, де тверднуть останні частки розплаву. Після затвердіння всього обсягу металу відведення тепла формою зберігається. Охолодження, що продовжується, викликає подальшу усадку виливка до тих пір, поки його температура не стане нормальною.

При кристалізації під тиском до моменту застосування поршневого тиску усадкові процеси в виливку протікають так само, як і при звичайних умовах при литті в кокіль або виливницю.

В умовах лиття з кристалізацією під тиском усадка металу компенсується безперервною деформацією затверділої та перемішуванням незатверділої частин виливка. Якщо поршковий тиск прикладено в той момент, коли утворилася початкова кірка, то для зіткнення з незатверділою частиною розплаву пуансон повинен деформувати вказану кірку (переважно

поблизу пуансона). При цьому можливо часткове руйнування кірки та витіснення її уламків у незатверділу частину виливка. Незатверділий розплав під дією прикладеного тиску переміщається до усадкової порожнини, що утворилася у верхнього торця до моменту застосування тиску. На цьому етапі тиск є одностороннім, і відбувається стиск затверділої кірки. Після зіткнення з незатверділою частиною розплаву тиск стає всебічним (гідростатичним) і передається як через бічну кірку (за рахунок її деформації), так і через незатверділу частину виливка. Внаслідок цього усувається зазор між кіркою та матрицею, і відбувається повне прилягання зовнішньої поверхні виливка до стінок прес-форми. В усадковій порожнині, що виникають при затвердінні, запресовується незатверділий розплав, відбувається примусове його переміщення по капілярах між дендритами, що ростуть, і виливок ущільнюється. Це відбувається до того моменту, поки відбувається стиск прогресивно зростаючої кірки.

Після зупинки руху пуансона відбувається подальше затвердіння шарів металу. В тепловому центрі виливка затвердіння відбувається в останню чергу.

При правильному підборі режимів лиття та пресування, усадкової раковини у виливках не утворюється. Якщо ж технологічні режими обрані неправильно, можлива поява усадкових раковин або пор в тепловому центрі виливка.

Отже, всі шляхи, що сприяють зменшенню швидкості зростання кірки (підвищення температури прес-форми, збільшення товщини теплоізоляційного покриття та ін.) та покращенню її деформації (підвищення тиску пресування, зниження часу набору тиску до номінального часу пресування та ін.), дозволяють отримувати більш щільні виливки.

Об'єм сплаву, залитого в ливарну форму, зазнає безперервних змін на всіх стадіях охолодження, а також у процесі агрегатних і фазових перетворень. Усадка рідкого металу зумовлює зниження рівня розплаву в порожнині форми, що є початковою стадією формування усадкової раковини у виливку. Усадка, яка відбувається під час кристалізації, супроводжується зменшенням об'єму рідкої фази, локалізованої в міждендритних просторах двофазної зони. За умов обмеженого підживлення цієї зони це призводить до інтенсифікації розвитку усадкової раковини та обумовлює формування усадкової пористості у структурі виливка.

Таким чином, поява усадкових раковин і усадкової пористості та їх сумарний обсяг є функцією низки величин. Оскільки кількісну залежність від них точно не встановлено, об'єм раковин V_p можна виразити узагальненою формулою [9]:

$$V_p = \left[(T_L - T_S)^{\nu} \lambda_1, \frac{1}{\rho_1}, \frac{1}{b_3}, \frac{1}{U}, \frac{1}{p}, x \right], \quad (1)$$

де $T_L - T_S$ — інтервал затвердіння сплаву, К; ν — коефіцієнт в'язкості розплаву, кг/(м·с); λ —

теплопровідність розплаву, Вт/(м·К); ρ_1 — щільність розплаву, кг/м³; b_3 — коефіцієнт теплової акумуляції прес-форми, Вт·с^{1/2}/(м²·К); $b_3 = \sqrt{\lambda_3 c_3 \rho_3}$; λ_3 — теплопровідність матеріалу прес-форми, Вт/(м·К); c_3 — питома теплоємність матеріалу прес-форми, Дж/(кг·К); ρ_3 — щільність матеріалу прес-форми, кг/м³; U — швидкість затвердіння розплаву, м/с; p — тиск на розплав при затвердінні, МПа; x — товщина перерізу виливка, м.

Усадкові раковини та пористість є основними дефектами у ливарних виливках. Одним із ефективних способів їх запобігання є раціональний вибір величини тиску пресування, який забезпечує інтенсифікацію підживлення зони кристалізації та зменшення об'єму усадкових порожнин. Величина тиску, що забезпечує високу якість виливка, залежить від матеріалу виливка, його конструкції та розмірів, схеми пресування, температурних режимів лиття.

Можна оцінити залежність мінімального тиску, необхідного для ліквідації усадкової пористості в циліндричному виливку, від її розмірів. Підживлення усадкових порожнеч в металі, що твердне, відбувається через дендритну сітку твердо-рідкої зони в режимі фільтрації. Згідно із законом Дарсі, кількість рідкого металу W , яка може в одиницю часу подолати опір дендритної сітки під впливом тиску P в рідкому металі:

$$W = - \frac{Sk}{\mu} \text{grad} P, \quad (2)$$

де S — площа поверхні, якою йде фільтрація; k — коефіцієнт проникності; μ — коефіцієнт динамічної в'язкості розплаву.

Інтегруючи (2) за часом, знайдемо кількість рідкого металу V_1 , яка може надійти в центральну частину виливка шляхом фільтрації через сітку дендритів за період найбільш затруднених умов живлення, тобто з моменту досягнення осі виливка кордонів твердо-рідкої та рідко-твердої зон τ_1 до моменту повного затвердіння τ_2 :

$$V_1 = \int_{\tau_1}^{\tau_2} W d\tau. \quad (3)$$

Кількість рідкого металу V_2 , яку необхідно впресувати в твердо-рідку зону виливка за той же період для компенсації усадки при затвердінні, визначається з виразу:

$$V_2 = \alpha V_p = \alpha \int_{V_{\tau-p}} (1 - \psi) dV, \quad (4)$$

де α — коефіцієнт усадки при затвердінні; V_p — об'єм рідкого металу в твердо-рідкій зоні в момент τ_1 ; $V_{\tau-p}$ — об'єм твердо-рідкої зони в момент τ_1 ; ψ — част-

ка твердої фази в елементарному об'ємі металу, що твердне.

Прирівнюючи V_1 і V_2 , знаходимо тиск P_0 , необхідний для ліквідації усадкової пористості в циліндричному виливку заввишки H і радіусом R :

$$P_0 = \frac{4\alpha\mu A(1-\psi_0)(H-R)(H-R+r_0)}{r_0 K_0}, \quad (5)$$

де A — швидкість затвердіння; ψ — частка твердої фази на межі рідко-твердої та твердо-рідкої зон виливка; r_0 — відстань кордону твердої та твердо-рідкої зон виливка до його осі та момент τ_1 ; K_0 — коефіцієнт фільтрації на межі рідко-твердої та твердо-рідкої зон.

Тиск P повинен мати місце в рідкому металі на останніх стадіях затвердіння виливка. З рівняння (5) видно, що необхідний тиск сильно зростає зі збільшенням висоти H і зменшенням радіуса R .

Облік такої великої кількості змінних можливий в даний час завдяки широкому використанню сучасної комп'ютерної техніки і відповідного програмного забезпечення. Застосування систем, що забезпечують моделювання процесів лиття та дозволяють глибше зрозуміти їх фізичну природу, сприяє суттєвому вдосконаленню процесів проєктування і виробництва виливків. Це дає змогу скоротити витрати матеріальних і енергетичних ресурсів, зокрема металу, робочого часу, електроенергії [9, 10]. Такі можливості реалізуються за допомогою спеціалізованих програмних продуктів, призначених для аналізу процесів лиття металів [11]. У практичному аспекті застосування подібного програмного забезпечення дозволяє істотно знизити собівартість виливків, скоротити тривалість розроблення технологічних процесів, а також мінімізувати необхідність коригувань і доопрацювань на стадіях виготовлення та уникнути переробок на етапах виготовлення [11–12].

Метою роботи є підвищення якості виливків відповідального призначення, одержаних методом лиття з кристалізацією під тиском, на основі використання інженерного моделювання та проєктування процесів лиття.

Методика досліджень. Програмні продукти, призначені для аналізу процесу виготовлення виливка, відрізняються насамперед ступенем урахування факторів, впливають на процес моделювання, а також відповідною вартістю. Другою суттєвою відмінністю є підходи до формування та розв'язання різницевого рівняння. Рівняння тепломасоперенесення можуть бути подані як в диференціальній, так і інтегральній формах. Їх розв'язання ґрунтується на застосуванні чисельних методів, зокрема методів кінцевих різниць, кінцевих елементів та кінцевих обсягів.

Метод кінцевих різниць (МКР) базується на диференціальній формі рівнянь. Як правило, він реалізується на ортогональних сітках (прямокутних або циліндричних). Це дозволяє звести розв'язання багатовимірної задачі до послідовності одновимірних задач, істотно спрощуючи та прискорюючи обчислен-

ня. Водночас до недоліків методу належить недостатня точність апроксимації меж складних областей, що не дуже важливо для рівнянь теплопровідності, але досить суттєво для рівнянь гідродинаміки. Крім того, ефективність методу знижується при моделюванні тонкостінних виливків, коли товщина стінок є співрозмірною з кроком розрахункової сітки.

Методи кінцевих елементів (МКЕ) та кінцевих обсягів (МКО) базуються на інтегральній формі рівнянь тепломасоперенесення. Обчислювана область дискретизується на окремі елементи або обсяги, в межах яких здійснюється апроксимація шуканих функцій із використанням системи базисних функцій. Проєктуючи інтегральні рівняння, ці бази отримують систему різницевого рівняння.

При використанні МКР система різницевого рівняння має велику складність і вимагає набагато більшого часу на розрахунок та потужніший ПК. Одна з головних переваг МКЕ — висока точність розрахункових даних на межі кінцевих різницевого елементів, а основні недоліки — необхідність в якісному генераторі кінцевих елементів і складність рівнянь. У даній роботі для моделювання процесів лиття застосовано саме метод кінцевих елементів.

Застосування методу кінцевих елементів дозволяє цілеспрямовано регулювати технологічні параметри процесу. Це сприяє підвищенню механічних характеристик і вдосконаленню структури виливків, зменшенню ймовірності виникнення ливарних дефектів, скороченню обсягів відходів та прискоренню часу розроблення нових конструкцій литих деталей.

Формування ефективного технологічного процесу виготовлення литих деталей значною мірою залежить від застосування інженерного моделювання ливарних процесів із використанням сучасних програмних комплексів. Такі засоби створюють функціональне середовище для високоточного відтворення фізико-технологічних явищ, вирізняються інтерактивністю та зручністю інтерфейсу і дають змогу ще на ранніх етапах проєктування виявляти критичні ділянки, схильні до дефектоутворення, а також здійснювати комплексний аналіз гідродинамічних і теплових параметрів процесів заповнення форми та кристалізації металу.

Інженерне моделювання ливарних процесів при виготовленні деталей виконувалося відповідно до цілей дослідження і включало:

- визначення ділянок можливого виникнення газоусадкових дефектів, їх форми та розташування;
 - аналіз термодинамічних закономірностей фазових перетворень у процесі кристалізації та охолодження виливка в умовах металевої форми;
 - обґрунтування рекомендацій щодо керування структурою сплаву через зміну технологічних параметрів.
- Інженерне моделювання для литих деталей здійснювалося поетапно та включало:
- визначення і завдання початкових умов моделювання;
 - розроблення тривимірної геометричної моделі виливка з урахуванням конструктивних параметрів;
 - виконання комп'ютерно-інтегрованого

аналізу гідродинамічних та теплових процесів, що відбуваються під час заповнення форми та кристалізації;

- детальний аналіз результатів моделювання;
- дослідження закономірностей затвердіння при литті з кристалізацією під тиском, визначення локалізації дефектів та шляхів їх усунення;
- обґрунтування рекомендацій щодо підвищення ефективності технології на основі комп'ютерно-інтегрованого моделювання.

Результати дослідження. Формування початкових умов моделювання ливарних процесів проводилося з урахуванням геометричних параметрів і конструктивних особливостей конфігурації виливка. Побудова 3D-моделі заготовки поршня здійснювалася у системі Solid Works. 3D-модель виливка представлено на рис. 1.

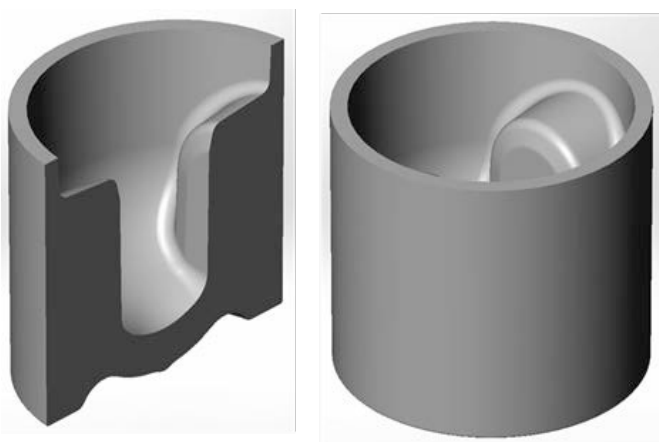


Рис. 1. 3D-модель виливка поршня

За допомогою модуля в розрахунковому програмному забезпеченні 3D модель виливка була конвертована в звичайно-елементну модель із загальними параметрами (рис. 2):

- кількість елементів — 7900.

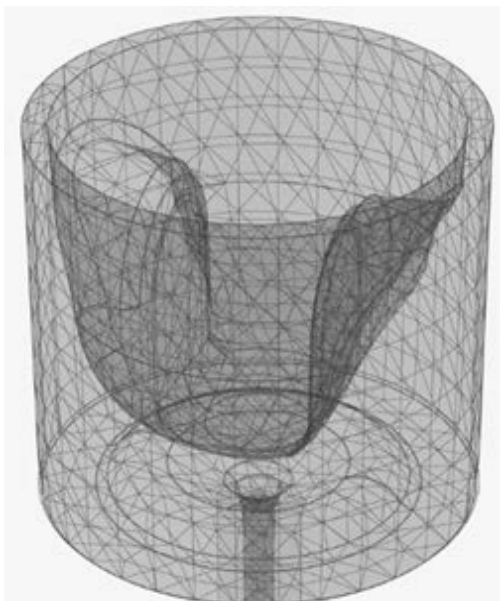


Рис. 2. Звичайно-елементна модель виливка поршня

Як початкові та граничні умови для інженерного моделювання були використані такі дані:

- Матеріал виливка — АК12М2МгН та АК21М2,5Н2,5 ДСТУ 2839-94;
- Матеріал матриці та пуансона — 4Х5ФМС ДСТУ 5950-2000;
- Початкова температура для розплаву АК12М2МгН становить 720 ...750 °С, для розплаву АК21М2,5Н2,5 — 840...850 °С;
- Температура матриці — 250 °С;
- Температура пуансона — 280 °С;
- Швидкість руху плити на холостому ходу — 180 мм/с;
- Час витримки — 4 хв.;
- Вилучення виливка 350...400 °С;
- Вага поршня — 4,3 кг.

Температура матриці та пуансона регулюється водним охолодженням. Сплав у матрицю заливається мірною ложкою при коливанні товщини дна виливка ± 1 мм.

За результатами чисельного моделювання процесу охолодження виливка, а також на основі подальшого аналізу розподілу температурних полів було визначено особливості існування рідкої, напівтвердої та твердої фаз у його об'ємі. Це дало можливість детально простежити послідовність охолодження та фазового затвердіння (рис. 3). Встановлено, що процес твердіння має нерівномірний характер і супроводжується: асиметрією температурних градієнтів, причому їх розподіл інтерпретується як за кольоровою шкалою, так і за числовими показниками. Характер розподілу температурних полів при кристалізації виливка представлений на рис. 3.



Рис. 3. Характер розподілу температурних полів при кристалізації виливка

За результатами проведеного аналізу встановлено, що в ділянках із підвищеною товщиною виливка процес твердіння завершується найпізніше. Такий режим охолодження зумовлює утворення критичних зон затвердіння, у яких залишкові об'єми рідкого металу ізолюються від системи живлення. Це свідчить про необхідність корекції та оптимізації технологічних параметрів лиття та режимів пресування з метою запобігання дефектів газоусаджувального характеру.

Для підтвердження перерахованих вище висновків виконано аналіз зон ізоляції розплаву при переході з рідкої в твердо-рідку та тверду фази, згідно з рис. 4, де графічно наведено ізоляцію рідкої фази.

Зазначені локації розташування дефектів та їх можливі обсяги дозволили остаточно визначити проблемні місця у виливку поршня. Було досліджено вплив тиску пресування на утворення дефектів усад-

кового походження. На основі моделювання вивчається процес зміни тиску пресування від 0 до 90 МПа. Зони розподілу пористості в тілі вилівка за результатами моделювання представлені на рис. 5: а — без додатку навантаження; б — тиск 5,0 МПа; в — тиск 15,0 МПа.

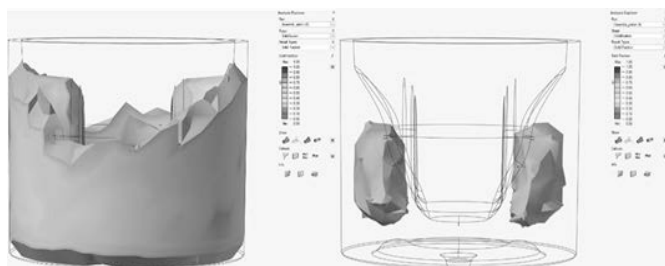


Рис. 4. Характер затвердіння та кристалізації вилівка

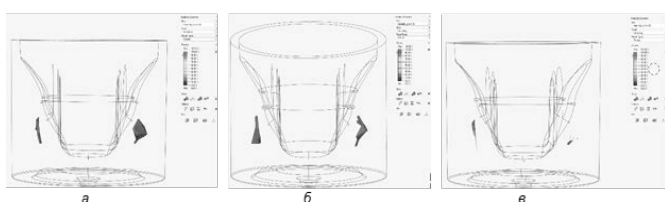


Рис. 5. Зони розподілу пористості в тілі вилівка

Комп'ютерне моделювання дозволило візуально визначити, що при питомому тиску понад 40,0 МПа та вище дефекти газоусаджувального характеру відсутні.

Для того, щоб визначити оптимальний тиск пресування, при якому не виникають усадкові раковини в умовах НВФ «Титан», був проведений промисловий експеримент. Для експериментів використовувався 160 т гідралічний прес ДБ 3232А. Умови проведення експериментів представлено у таблиці.

Таблиця

Умови проведення експериментів

Умовний номер зразка	Величина тиску, МПа	Режими термообробки
01 11 21 31	0 5,0 15,0 40,0	старіння 200 °С
02 12 22 32	0 5,0 15,0 40,0	гартування 495 °С, старіння 195 °С
03 13 23 33	0 5,0 5,0 40,0	старіння 220 °С
04 14 24 34	0 5,0 15,0 40,0	гартування 510 °С, старіння 250 °С

Експериментально було встановлено, що на виливках, одержаних без застосування тиску і при тиску 5,0 МПа, є дефекти ливарного походження — окремі та сконцентровані раковини розміром до 3 мм. При тиску 15,0 МПа спостерігалися рихлоти та окремі раковини до 1,5 мм. При тиску 40,0 МПа ливарних дефектів не виявлено [13, 14].

Методом моделювання та експериментально було встановлено, що для розмірного ряду поршнів діаметром 150...210 мм з алюмінієвих сплавів АК12М2МгН та АК21М2,5Н2,5, тиск пресування 40,0 МПа достатній для отримання бездефектних виливків.

Під час проведення промислового експерименту одночасно визначали вплив термообробки на мікроструктуру зразків зі сплаву АК12М2МгН. Використовували такі типи термічної обробки: 1) старіння 200 °С; 2) гартування 495 °С і старіння 195 °С; 3) старіння 220 °С; 4) гартування 510 °С і старіння 250 °С. При дослідженні зразків усіх варіантів встановлено, що мікроструктура їх складається з дендритів α -твердого розчину включень евтектики у вигляді колоній і включень на основі кремнію. На зразках без застосування навантаження з усіма видами термообробки виявлена дещо грубіша структура (евтектика має більш грубу голчасту будову, кремній розташовується скупченнями), у порівнянні з іншими варіантами, на яких відзначається тонкодисперсна структура з більш чітко вираженою переважною орієнтацією дендритів α -твердого розчину вздовж осей. При додатку навантаження 40,0 МПа відзначається значна коагуляція включень евтектики, їх рівномірний розподіл по полю шліфа.

Висновки та перспективи дослідження

1. Комплексне застосування інженерного моделювання та проєктування процесів отримання виливків відповідального призначення методом лиття з кристалізацією під тиском дозволяє підвищити їх якість, знизити брак, а також відкриває нові можливості для підвищення ефективності, якості та екологічної стійкості виробничих процесів, що сприяє зниженню матеріальних витрат, скороченню часу на розробку нових деталей.

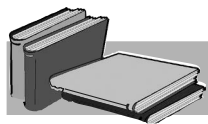
2. За результатами чисельного моделювання процесу охолодження вилівка, а також на основі подальшого аналізу розподілу температурних полів було встановлено характер існування рідкої, напівтвердої та твердої фаз у тілі вилівка, що дозволило детально оцінити послідовність його охолодження та затвердіння. Характер охолодження свідчить про наявність критичних ділянок затвердіння, в яких останні обсяги рідкого металу ізольовані від живлення, що безпосередньо вказує на необхідність оптимізації технологічних параметрів лиття або тиску пресування для запобігання появи дефектів газоусаджувального характеру. Методом моделювання було встановлено, що при тиску від 40,0 МПа та вище ливарні дефекти відсутні.

3. Експериментально було встановлено, що на виливках, одержаних без застосування тиску і при тиску 5,0 МПа, є дефекти ливарного походження — окремі та сконцентровані раковини розміром до 3 мм. При тиску 15,0 МПа спостерігалися рихлоти та окремі раковини до 1,5 мм. При тиску 40,0 МПа ливарних дефектів не виявлено.

4. Методом моделювання та експериментально було встановлено, що для розмірного ряду поршнів діаметром 150...210 мм з алюмінієвих сплавів АК12М2МгН та АК21М2,5Н2,5, тиск пресування 40,0 МПа достатній для отримання бездефектних виливків.

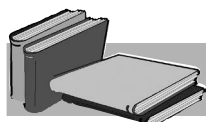
5. Під час проведення промислового експерименту одночасно визначали вплив термообробки на мікроструктуру зразків зі сплаву АК12М2МгН. Використовували такі типи термічної обробки:

1) старіння 200 °С; 2) гартування 495 °С і старіння 195 °С; 3) старіння 220 °С; 4) гартування 510 °С і старіння 250 °С. При дослідженні зразків усіх варіантів встановлено, що мікроструктура їх складається з дендритів α -твердого розчину включень евтектики у вигляді колоній і включень на основі кремнію. На зразках без застосування навантаження з усіма видами термообробки виявлена дещо грубіша структура (евтектика має більш грубу голчасту будову, кремній розташовується скупченнями), у порівнянні з іншими варіантами, на яких відзначається тонкодисперсна структура з більш чітко вираженою переважною орієнтацією дендритів α -твердого розчину вздовж осей. При додатку навантаження 40,0 МПа відзначається значна коагуляція включень евтектики, їх рівномірний розподіл по полю шліфа.



ЛІТЕРАТУРА

1. Ефимов В.А., Анисович Г.А., Бабич В.Н. и др. Специальные способы литья: Справочник. М.: Машиностроение, 1991. 436 с.
2. Дусанюк Ж.П., Шиліна О.П., Репінський С.В., Дусанюк С.В. Проектування та виробництво заготовок деталей машин. Литі заготовки: навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2009. 199 с.
3. Гуцин О.В. Технологічні методи виробництва заготовок деталей машин. Краматорськ: ДДМА, 2019. 159 с.
4. Campbell J. Complete Casting Handbook. Metal Casting Processes, Metallurgy, Techniques and Design. 2nd ed. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2015. 976 p.
5. Zhao B., Xing S., Gao W., Yan G. Effect of pressure on the microstructure refinement, solidification mechanism and fracture behavior of wrought Al-Zn-Mg-Cu alloys prepared by squeeze casting. *Journal of Materials Processing Technology*. 2024. Vol. 324. Art. 118239. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2023.118239>
6. Hai N.H., Quang P. Effect of Pressure on Solidification Process and Mechanical Properties During Semi-Solid Casting by Computational Fluid Dynamics (CFD). *Advances in Materials*. 2018. Vol. 7. Iss. 2. P. 44—49. <https://doi.org/10.11648/j.am.20180702.15>
7. Jiao X.Y., Zhang Y.F., Wang J., Nishat H., Liu Y.X., Liu W.N., Chen H.X., Xiong S.M. Characterization of externally solidified crystals in high-pressure die-cast AlSi10MnMg alloy and their effect on porosities and mechanical properties. *Journal of Materials Processing Technology*. 2021. Vol. 298. Art. 117299. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117299>
8. Хричиков В.Е., Меньяло О.В. Ливарне виробництво чорних і кольорових металів: Навч. посібник. Видання друге, доопрацьоване. Дніпропетровськ: НметАУ, 2015. 89 с.
9. Сосенушкин Е. Н. Штамповка кристаллизующегося металла. *Вестник МГТУ «Станкин»*. 2010. № 2(10). С. 12—20.
10. Jabbari A., Rosemann M. Modeling 4.0: Conceptual Modeling in a Digital Era. *Communications of the Association for Information Systems*. 2023. Vol. 53. No. 1. P. 1028—1051. <https://doi.org/10.17705/1cais.05344>
11. Альохін В.І., Марченко А.П., Кравченко С.С., Лал А.Г. Впровадження технологічних методик індустрії 4.0 у виробництві литих деталей ДВЗ, алгоритм їх комплексного застосування. *Двигуни внутрішнього згорання*. 2025. № 1. С. 87—97. <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2025.1.11>
12. Алехин В.И., Белогуб А.В., Акимов О.В. Исследование влияния размеров литейных дефектов на напряженно-деформированное состояние поршня. *Двигатели внутреннего сгорания*. 2011. № 2. С. 99—103. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/dc390b03-b194-49ce-ba80-5ce032ebb337> (дата звернення: 20.02.2026).
13. Євтушенко С.Д., Акімов О.В. Вибір способу виготовлення поршнів відповідального призначення: тези доповідей XXXI Міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2023 «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (17—20 травня 2023 р., м. Харків). Харків : НТУ «ХПІ», 2023. С. 290.
14. Євтушенко С.Д., Акімов О.В., Євтушенко Н.С., Пономаренко О.І. Вплив величини тиску на якість відливок при кристалізації під тиском: Збірник тез XVII Міжнародної науково-технічної конференції «Неметалеві вкrapлення і гази у ливарних сплавах» (28—27 листопада 2024 р., м. Запоріжжя). Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2025. С. 119—122. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/86195> (дата звернення: 20.02.2026).



REFERENCES

1. Efimov, V. A., Anisovich, G. A., Babich, V. N. et al. (1991). Spetsialnyie sposoby litya: Spravochnik [Special Casting Methods: Guidebook]. Mashinostroenie [in Russian].
2. Dusaniuk, Zh. P., Shylyna, O. P., Repinskyi, S. V., & Dusaniuk, S. V. (2009). Proektuvannia ta vyrobnytstvo zahotovok detalei mashyn. Lyti zahotovy: navchalnyi posibnyk [Design and production of machine part blanks. Cast blanks: textbook]. VNTU [in Ukrainian].
3. Hushchyn, O. V. (2019). Tekhnolohichni metody vyrobnytstva zahotovok detalei mashyn [Technological methods for the production of machine part blanks]. DDMA [in Ukrainian].
4. Campbell, J. (2015). Complete Casting Handbook. Metal Casting Processes, Metallurgy, Techniques and Design. 2nd ed. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 976 p.
5. Zhao, B., Xing, S., Gao, W., & Yan, G. (2024). Effect of pressure on the microstructure refinement, solidification mechanism and fracture behavior of wrought Al-Zn-Mg-Cu alloys prepared by squeeze casting. *Journal of Materials Processing Technology*, 324, 118239. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2023.118239>
6. Hai, N. H., & Quang, P. (2018). Effect of Pressure on Solidification Process and Mechanical Properties During Semi-Solid Casting by Computational Fluid Dynamics (CFD). *Advances in Materials*, 7(2), 44-49. <https://doi.org/10.11648/j.am.20180702.15>
7. Jiao, X. Y., Zhang, Y. F., Wang, J., Nishat, H., Liu, Y. X., Liu, W. N., Chen, H. X., & Xiong, S. M. (2021). Characterization of externally solidified crystals in high-pressure die-cast AlSi10MnMg alloy and their effect on porosities and mechanical properties. *Journal of Materials Processing Technology*, 298, 117299. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117299>
8. Khrychikov, V. E., & Meniailo, O. V. (2015). Lyvarne vyrobnytstvo chornykh i kolorovykh metaliv: navch. posibnyk. Vydannia druhe, doopratsovane [Foundry production of ferrous and non-ferrous metals: Textbook. Second, revised edition]. NmetAU [in Ukrainian].
9. Sosenushkyn, E. N. (2010). Shtampovka krystallyzuiushchehosia metalla [Stamping of crystallizing metal]. *Vestnyk MHTU "Stankyn"*, 2(10), 12-20 [in Russian].
10. Jabbari, A., & Rosemann, M. (2023). Modeling 4.0: Conceptual Modeling in a Digital Era. *Communications of the Association for Information Systems*, 53(1), 1028-1051. <https://doi.org/10.17705/1cais.05344>
11. Alokhin, V. I., Marchenko, A. P., Kravchenko, S. S., & Lal, A. G. (2025). Implementation of industry 4.0 technological methods in the production of cast ice components, an algorithm for their comprehensive application. *Dvyhuny vnutrishnoho zghorannia*, (1), 87-97. <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2025.1.11> [in Ukrainian].
12. Alyokhin, V. I., Belogub, A. V., & Akimov, O. V. (2011). Issledovanie vlianiia razmerov liteynykh defektov na naprjazhenno-deformirovannoe sostojanie porshnja [Study of the influence of the sizes of casting defects on the stress-strain state of the piston]. *Dvigateli vnutrennego sgoraniia*, (2), 99-103. <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/dc390b03-b194-49ce-ba80-5ce032ebb337> [in Russian].
13. Yevtushenko, S. D., & Akimov, O. V. (2023). Vybir sposobu vyhotovlennia porshniv vidpovidalnoho pryznachennia [Choosing a manufacturing method for pistons for critical purposes]. Tezy dopovidei XXXI Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii MicroCAD-2023 "Informatsiini tekhnolohii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorovia" (17-20 travnia 2023 r., m. Kharkiv). Kharkiv: NTU "KhPI", p. 290 [in Ukrainian].
14. Yevtushenko, S. D., Akimov, O. V., Yevtushenko, N. S., & Ponomarenko, O. I. (2025). Vplyv velychyny tysku na yakist vidlyvok pry krystalizatsii pid tyskom [The influence of pressure on the quality of castings during crystallization under pressure]. Zbirnyk tez XVII Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii "Nemetalevi vkraplennia i hazy u lyvarnykh splavakh" (28-27 lystopada 2024 r., m. Zaporizhzhia). Zaporizhzhia: NU "Zaporizka politekhnika", pp. 119-122. <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/86195> [in Ukrainian].

Надійшла/Received 26.02.2026

Прийнята/Accepted 18.03.2026

Опублікована/Published 31.03.2026

Summary

S.D. Yevtushenko, Postgraduate Student, e-mail: stepanco.00@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-0154-4563>

O.V. Akimov, Dr. Sci. (Engin.), Professor, Professor, e-mail: Oleg.Akimov@khpi.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0001-7583-9976>

V.I. Alokhin, PhD (Engin.), Doctoral Student, e-mail: vitalii.alokhin@khpi.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-6290-5994>

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" (Kharkiv, Ukraine)

Engineering Modeling and Design of Processes for Producing Critical Castings by the Method of Squeeze Casting

The article presents the results of research on the implementation of Industry 4.0 digital technologies in the production of critical cast components. Foundry production is the main supplier of castings for mechanical engineering. The quality of the resulting castings depends on many technological factors. When addressing these tasks, specialists involved in the preparation of technological processes for casting production are forced to make decisions under conditions of limited information about the physical regularities underlying these processes. This necessitates the use of modern approaches to analysis and forecasting. Therefore, one of the key stages in creating a highly efficient technological process for producing cast parts is engineering simulation and the design of casting processes using specialized software systems, which allow highly accurate reproduction of the physical and technological processes occurring during casting formation.

The aim of this study is to improve the quality of critical castings produced by the squeeze casting method through the application of engineering simulation and advanced casting process design.

Based on the results of numerical simulation of the casting cooling process and analysis of temperature field distribution, the behavior of liquid, semi-solid, and solid phases within its volume has been determined. This made it possible to analyze in detail the sequence of cooling and solidification of the casting. The obtained results indicate the presence of critical solidification zones in which the last volumes of liquid metal are isolated from feeding, which directly indicates the need to adjust technological casting parameters or pressing pressure to prevent the occurrence of gas-shrinkage defects. It was established that castings produced without applied pressure and at a pressure of 5.0 MPa contain casting defects, including isolated and clustered cavities up to 3 mm in size. At a pressure of 15.0 MPa, looseness and isolated cavities up to 1.5 mm were observed. At pressures of 40.0 MPa and higher, no casting defects were detected. Both modeling and experimental studies confirmed that for a dimensional range of pistons with diameters of 150–210 mm produced from aluminum alloys AK12M2MgN and AK21M2.5N2.5, a pressing pressure of 40.0 MPa is sufficient to obtain defect-free castings.

During the industrial experiment, the influence of heat treatment on the microstructure of samples made from alloy AK12M2MgN was also investigated. The following types of heat treatment were applied: 1) aging at 200 °C; 2) quenching at 495 °C followed by aging at 195 °C; 3) aging at 220 °C; 4) quenching at 510 °C followed by aging at 250 °C. The study of samples in all variants revealed that their microstructure consists of dendrites of the α solid solution containing eutectic inclusions in the form of colonies and silicon-based particles. Samples produced without the application of pressure and subjected to all types of heat treatment exhibited a somewhat coarser microstructure (the eutectic showing a more pronounced needle-like morphology, with silicon distributed in clusters) compared to the other variants, where a fine-dispersed microstructure with a more clearly defined preferential orientation of α -solid-solution dendrites along the axes was observed. When a pressure of 40.0 MPa was applied, significant coagulation of eutectic inclusions and their more uniform distribution throughout the polished section were noted.

Keywords

Squeeze casting, engineering simulation, quality, pressing pressure, heat treatment.