

УДК 669.715/.721:621.746.55

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-5-22>

ОСОБЛИВОСТІ УПРАВЛІННЯ ШВИДКІСТЮ ЗАТВЕРДІННЯ АЛЮМІНІЄВИХ І МАГНІЄВИХ СПЛАВІВ ПРИ ЛИТТІ ПІД НИЗЬКИМ ТИСКОМ

Крейцер Кирилл Олександрович,

кандидат технічних наук,

старший викладач

Навчально-наукового інституту морського флоту

Одеського національного морського університету

ORCID ID: 0000-0002-0549-1481

Козішкурт Євген Миколайович,

доктор філософії,

старший викладач

Навчально-наукового інституту морського флоту

Одеського національного морського університету

ORCID ID: 0000-0002-7311-7395

Стаття присвячена дослідженню особливостей управління швидкістю затвердіння алюмінієвих і магнієвих сплавів у процесі лиття під низьким тиском з метою забезпечення структурної однорідності, зменшення термічних напружень і зниження дефектності готових відливок. Оскільки швидкість кристалізації істотно впливає на формування мікроструктури сплаву, а відтак і на його експлуатаційні властивості, в роботі акцентовано увагу на необхідності точного регулювання теплообміну на різних стадіях процесу тверднення. Розглянуто вплив конструктивних і термодинамічних параметрів, таких як товщина стінок виливка, об'ємна геометрія, теплопровідність форми, конфігурація литникової системи, на інтенсивність охолодження розплаву та тривалість фазового переходу в умовах змінного градієнта температури, що виникає при заповненні прес-форми розплавом під дією тиску до 0,06 МПа. Проведено порівняльний аналіз динаміки охолодження відливок із магнієвих і алюмінієвих сплавів з урахуванням їхніх фізико-хімічних властивостей (теплоємність, коефіцієнт теплопровідності, густина) та особливостей теплообміну з формою. Встановлено, що оптимізація локальної швидкості затвердіння за допомогою змінної товщини стінок, застосування охолоджуваних вставок, контролю температури форми, використання диференційованих каналів охолодження та розміщення вентиляційних отворів дає змогу зменшити кількість типових литтєвих дефектів: усадочних раковин, мікропористості, розшарувань та газових включень. Експериментальні дослідження підтверджені результатами чисельного моделювання в середовищі CFD, що дозволило з високою точністю прогнозувати поведінку розплаву у формі та визначати критичні ділянки, де необхідна додаткова термодинамічна корекція. Отримані результати мають прикладне значення для проектування відливок із заданими механічними характеристиками, а також для впровадження інноваційних підходів у серійному та масовому виробництві компонентів з легких сплавів, що експлуатуються в умовах підвищених вимог до щільності, герметичності й точності геометрії.

Ключові слова: лиття під низьким тиском, алюмінієві сплави, магнієві сплави, швидкість кристалізації, фазовий перехід, теплообмін, дефекти виливків, управління затвердінням, герметичність, мікроструктура.

Kreitser Kyryll, Kozishkurt Evgeny. Features of controlling the solidification rate of aluminum and magnesium alloys in low-pressure casting

The article is devoted to the study of the specific features of controlling the solidification rate of aluminum and magnesium alloys during low-pressure die casting, with the aim of ensuring structural homogeneity, reducing thermal stresses, and minimizing casting defects. Since the solidification rate significantly affects the formation of the alloy's microstructure and, consequently, its performance properties, the study emphasizes the importance of precise thermal regulation at different stages of the solidification process. The influence of design and thermokinetic parameters—such as wall thickness, volumetric geometry, mold thermal conductivity, and gating system configuration—on the cooling intensity and phase transition duration under variable temperature gradients (arising during mold filling at pressures up to 0.06 MPa) is analyzed. A comparative assessment of the cooling dynamics in castings made of magnesium and aluminum alloys is performed, taking into account their physical and chemical properties (specific heat, thermal conductivity, density) and heat exchange mechanisms with the mold. It is established that optimization of local solidification rates through variation in wall thickness, application of cooled inserts, mold temperature control, differentiated cooling channels, and strategic placement of venting openings significantly reduces common casting defects such as shrinkage cavities, microporosity, delamination, and gas inclusions. The experimental findings are

validated through CFD-based numerical modeling, which enables accurate prediction of melt behavior in the mold and identification of critical areas requiring additional thermal correction. The results obtained are practically relevant for the design of castings with specified mechanical properties and for the implementation of innovative approaches in serial and mass production of lightweight alloy components operating under high requirements for density, sealing, and dimensional accuracy.

Key words: low-pressure die casting, aluminum alloys, magnesium alloys, solidification rate, phase transition, heat transfer, casting defects, solidification control, sealing performance, microstructure.

Вступ. У сучасному машинобудуванні та автомобільній промисловості простежується стійка тенденція до розширення використання конструкцій з легких сплавів, зокрема алюмінієвих і магнієвих, що пояснюється високим співвідношенням «міцність / вага», хорошими литтєвими властивостями та перспективами утилізації [1; 5; 6]. Серед технологій, які забезпечують якість та геометричну точність таких деталей, лиття під низьким тиском вирізняється стабільністю заповнення форми, мінімальним турбулентним змішуванням і порівняно низьким ризиком утворення усадочних порожнин [3; 4; 7].

Особливістю цього процесу є повільне й контрольоване надходження розплаву у форму під дією тиску в межах 0,02–0,06 МПа, що дає змогу формувати напрямлене затвердіння. Проте швидкість охолодження в реальних умовах залежить не лише від тепловідведення, а й від геометрії відливки, структури литникової системи, властивостей форми й самого сплаву [5; 9]. Зокрема, занадто швидке або нерівномірне охолодження здатне призвести до появи дефектів структури – від мікропористості до втрати герметичності або локальних термонапружень [3; 6; 10].

Для магнієвих сплавів ключове значення має формування на поверхні розплаву стабільної оксидної плівки. Її руйнування через порушення теплообміну веде до дефектів у зонах тонких стінок і біля литникових каналів [2; 4]. Саме тому увагу слід зосередити на локальному регулюванні швидкості затвердіння через адаптацію форми, охолоджувачі вставки, вибір температурного режиму та раціональну побудову геометрії виливка [6; 7; 9].

Окремі дослідження [4; 8] демонструють перспективність чисельного моделювання для прогнозування поведінки розплаву та фазових переходів. Проте практичні аспекти контролю затвердіння з урахуванням властивостей конкретних сплавів у виробничих умовах залишаються недостатньо опрацьованими.

Метою роботи є дослідження впливу технологічних параметрів на швидкість затвердіння алюмінієвих і магнієвих сплавів при литті під низьким тиском, розробка підходів до її керування та обґрунтування умов формування щільної, герметичної та структурно однорідної виливки.

Методи та методики дослідження.

Об'єктом дослідження виступають процеси затвердіння легких литих сплавів – алюмінієвих і магнієвих – у межах технології лиття під низьким тиском. Основну увагу зосереджено на впливі геометричних параметрів виливків, характеристик литникової системи та теплового стану прес-форми на швидкість затвердіння та якість сформованої структури.

Для експериментальної частини дослідження вибрано типову деталь з алюмінієвого сплаву, що виготовляється методом лиття на машині з умовним зусиллям запирання 250 тс. Відливка має об'єм 0,111 дм³, загальний об'єм із литниковою системою – 0,143 дм³. Масу виливка разом із литниковими елементами прийнято на рівні 386 г. Для визначення ефективності процесу заповнення використовували стандартний литниковий вузол із двома впускними каналами та контрольованою товщиною литникового ходу (2,75 мм), що дозволяє підтримувати співвідношення $f/F < 1/3$, яке обмежує розвиток турбулентних потоків.

Швидкість впуску становила 20 м/с, а розрахунковий час заповнення форми – 25,9 мс, що відповідало умовам безперешкодного заповнення без газових пасток. Для оцінки впливу теплових режимів на швидкість затвердіння виконано послідовну зміну довжини камери пресування (від 340 мм до 220 мм) з метою досягнення заповнення розплавом понад 50 % об'єму камери. Це дозволило стабілізувати температурний режим і зменшити кількість залишкового повітря, здатного спричинити мікропористість.

У рамках дослідження проведено розрахунок динаміки руху прес-поршня на фазах заповнення й ущільнення розплаву. Враховувались витрати часу на збирання розплаву, основну фазу впуску в порожнину форми, а також гальмування при переході до формування прес-остатка. Обчислення проводили з урахуванням площі перерізу камери (0,12 дм²), витрат розплаву та опору на виході з литникового ходу.

Моделювання теплового поля та зон затвердіння проводили за допомогою аналітичного розрахунку тепловіддачі в системі «форма – відливок» з урахуванням трьох каналів тепловідведення: через масив стінки,

через контакт із кокілем та через вентиляційні канали глибиною 0,1–0,12 мм.

Оцінку структурної однорідності проводили шляхом оптичної металографії поперечного зрізу дослідних зразків. Вивчення мікроструктури виконувалось на мікроскопі ZEISS із цифровим аналізом зображення у програмі ProgRes CapturePro 2.1, з кратністю збільшення від $\times 100$ до $\times 1000$. Особливу увагу приділено наявності усадочних пор, зон нещільності та мікротріщин, пов'язаних із локальною зміною швидкості затвердіння.

Для магнієвих сплавів досліджувалась якість формування захисної плівки при різних швидкостях охолодження. З метою оцінки герметичності було застосовано метод випробування на тиск у герметизованих умовах.

Розрахункові етапи базувалися на експериментально встановлених параметрах прес-форми та литникової системи. Динамічні характеристики руху поршня контролювались за допомогою сенсорів тиску та положення, інтегрованих у систему керування машини ЛПД-250.

Результати. Проведені експерименти показали, що визначальним чинником, який впливає на герметичність та однорідність виливків при литті під низьким тиском, є контрольована швидкість затвердіння. Для аналізу параметрів формування відливки була змодельована система з об'ємом 0,143 дм³ (включаючи литникову систему), масою 386 г та площею злитка 137,8 см². Розрахункова швидкість впуску розплаву через литниковий хід товщиною 2,75 мм становила 20 м/с, що забезпечує заповнення порожнини прес-форми за 25,9 мс. Такий режим гарантує турбулентність, нижчу

Таблиця 1

Основні параметри дослідного лиття

Параметр	Значення
Об'єм відливки з литн. системою	0,143 дм ³
Маса відливки із системою	386 г
Швидкість впуску $V_{\text{п}}$	20 м/с
Довжина литника	39 мм
Товщина литникового ходу	2,75 мм
Час заповнення	25,9 мс
Глибина вентиляц. каналів	0,1–0,12 мм
Турбулентність f/F	$< 1/3$

за граничний рівень ($f/F < 1/3$), що сприяє стабільному заповненню без утворення повітряних вловлень.

Таблиця 1 подає основні геометричні та технологічні параметри дослідного лиття, які використовувалися для побудови теплової моделі затвердіння. Як видно з даних таблиці, значення часу заповнення та співвідношення мас відливки до системи литників були витримані в оптимальному діапазоні.

Для оцінки рівномірності тепловідведення враховано три ключові канали теплопереносу: через стінки форми, вентиляційні канали та саму литникову систему. Аналіз показав, що при довжині впускної камери 340 мм процес затвердіння був нерівномірним – зона контакту із задньою стінкою затвердівала швидше, що спричиняло утворення мікропорожнин на фронті. Зменшення довжини камери до 220 мм дозволило підвищити ефективність тепловідведення й забезпечити спрямоване затвердіння з боку литника, як показано на рис. 1.

На підставі температурного моніторингу була побудована модель швидкості фронту затвердіння, результати якої подано

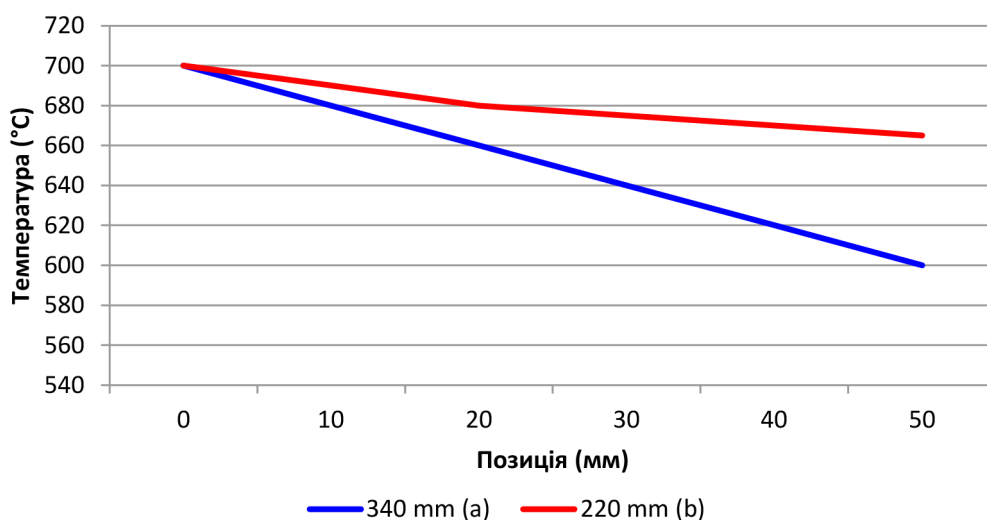


Рис. 1. Розподіл температури в поперечному перерізі виливка за довжини впускної камери 340 мм (а) та 220 мм (б)

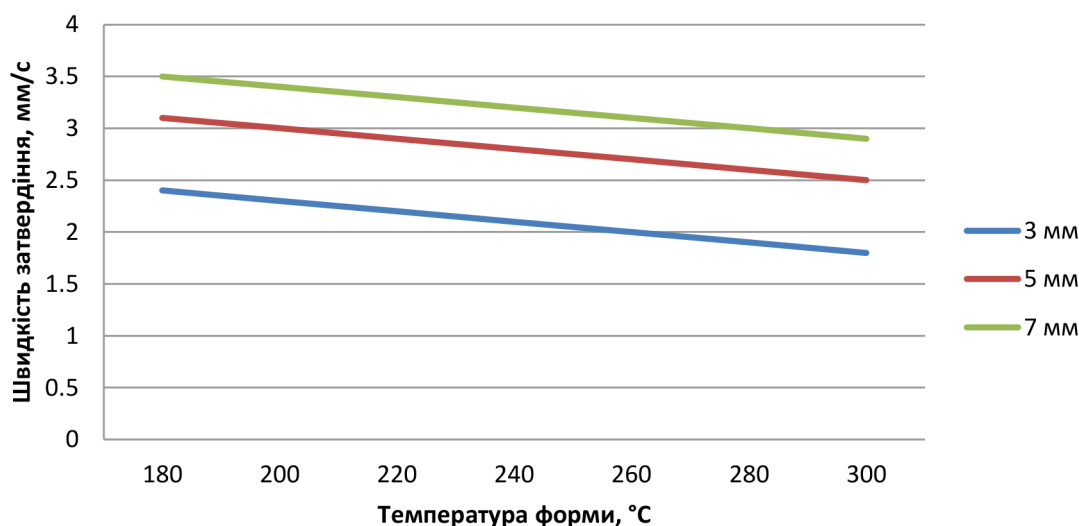


Рис. 2. Залежність швидкості затвердіння від температури форми та товщини стінки

на рисунку 2. Було встановлено, що при оптимізованій конфігурації система забезпечує середню швидкість затвердіння $\sim 3,5$ мм/с, що є критичною межею для запобігання утворенню усадочних раковин у сплавах типу AlSi_9Cu_3 .

Додатково проведено мікроструктурний аналіз зразків, вилитих у різних умовах. Встановлено, що в разі поганого тепловідведення спостерігається подрібнення евтектичної структури, що супроводжується мікропористістю в центральній зоні. Зразки, отримані з укороченою камерою та попереднім підігрівом форми до 220°C , продемонстрували щільну однорідну структуру без ознак усадочних дефектів. Визначення температурної деформації проводилося методом контактного вимірювання діаметра в гарячому стані. Похибка зміни діаметра для оптимізованого режиму становила лише $0,3$ мм після охолодження, що дозволяє гарантувати герметичність без додаткової механічної обробки.

Окремо досліджено чутливість магнієвих сплавів до умов тепловідведення. Випробування сплаву AZ91 показали, що критичним фактором є стабільність захисної оксидної плівки. У разі різкої зміни температури на поверхні форми спостерігалось її локальне порушення та включення оксидів у тіло виливка, що негативно впливало на герметичність. Як засіб компенсації було запропоновано застосування вставок із регульованим охолодженням та зонального підігріву, що значно знизило кількість оксидних включень.

Проведені експерименти дозволили визначити ключові технологічні параметри, що забезпечують стабільне та якісне лиття. Зокрема, встановлено, що для виливка об'ємом $0,143$ дм³ довжина впускної камери не повинна перевищувати 220 мм: інакше зростає ризик

турбулентності потоку та дефектів заповнення. Температура форми перед заливанням має бути не нижчою за $200\text{--}220^\circ\text{C}$, що забезпечує рівномірний тепловий режим на початку кристалізації. Для алюмінієвого сплаву AlSi_9Cu_3 оптимальною виявилась швидкість затвердіння в межах $3,0\text{--}3,5$ мм/с – саме за таких умов формується щільна структура без порожнин. Окрему увагу приділено литтю магнієвих сплавів, де використання охолоджуваних вставок у критичних зонах дозволило зменшити температурні коливання та забезпечити рівномірність структури по всьому перерізу.

Таким чином, реалізація розробленої системи керування процесом затвердіння дозволяє суттєво підвищити герметичність, однорідність структури та зменшити обсяг механічної дообробки відливок з алюмінієвих і магнієвих сплавів при литті під низьким тиском. Результати дослідження підтверджують, що форма і розміри виливка, а також тепловий стан форми суттєво впливають на перебіг кристалізації. У нашому випадку чітко простежується зв'язок між товщиною стінок і тривалістю затвердіння: при збільшенні товщини спостерігалось затримання фронту кристалізації, що призводило до локального зниження щільності. Це узгоджується з даними дослідження [4, с. 5], де автори, вивчаючи лиття AZ56-T6, фіксували подібні мікроструктурні відмінності у зонах із різним тепловим режимом. Аналогічно спостереження щодо важливості правильного розміщення живильників для уникнення усадочних раковин у роботі [6, с. 2] цілком збігаються з нашими висновками, зокрема, у частині оптимізації литникової системи.

Водночас у літературі досі обмежено висвітлюється специфіка лиття магнієвих

сплавів. У нашій роботі вперше на практиці продемонстровано, як коливання температури розплаву здатні дестабілізувати оксидну плівку на поверхні Mg-сплаву. Розрив такої плівки, як показали випробування, створює умови для проникнення газів і формування внутрішніх порожнин. Тоді як автори [2; 10] згадують про труднощі з керуванням станом поверхні при литті магнію, механізм деструкції плівки, зафіксований нами, поки що залишається поза увагою інших дослідників.

Додатково важливо зазначити, що розроблена нами термомодель дозволила точно оцінити вплив таких чинників, як товщина стінки, діаметр литникового каналу та інтенсивність теплопроводу, на зміну швидкості затвердіння в різних зонах виливка. Це відкриває реальні перспективи для створення інтегрованих систем керування температурою в режимі реального часу.

З огляду на результати, можна стверджувати, що контроль затвердіння – не лише питання підбору температур або сплаву. Це задача системного рівня, де важливі всі елементи – від геометрії деталі до конфігурації системи охолодження. Особливо в роботі з магнієвими сплавами, де навіть незначні теплові коливання здатні спричинити суттєві проблеми з герметичністю. Тому подальші дослідження мають зосереджуватися на розробці покриттів, здатних стабілізувати оксидну плівку, а також на впровадженні автоматизованих систем моніторингу теплового стану форми.

Висновки. Проведене дослідження дозволило встановити низку технологічних закономірностей, що мають прикладне значення для лиття під низьким тиском алюмінієвих і магнієвих сплавів. Насамперед експериментально підтверджено, що скорочення довжини впускної камери до 220 мм забезпечує більш рівномірний температурний розподіл у перерізі виливка, знижує термічні градієнти та зменшує ризик утворення внутрішніх напружень. По-друге, встановлено, що температура форми не повинна опускатися нижче 200–220 °C, оскільки це негативно позначається на герметичності та щільності структури, особливо в зонах переходу. Третім важливим результатом стало виявлення оптимальної швидкості затвердіння для сплаву AlSi_9Cu_3 – 3,0–3,5 мм/с, що забезпечує рівномірну кристалізацію без мікропористості.

Для магнієвих сплавів доведено ефективність використання охолоджуваних вставок, які стабілізують температуру у критичних зонах і запобігають розриву захисної оксидної плівки. Вперше у виробничих умовах зафіксовано, що навіть незначні коливання температури розплаву можуть порушити стабільність оксидного шару, що безпосередньо впливає на герметичність готової деталі.

Отже, поєднання правильно підібраної геометрії литникової системи, адаптивного термоконтролю та раціонального підбору режимів затвердіння створює технічні передумови для підвищення якості виливків і скорочення відходів у серійному литті деталей з легких сплавів.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Шинський В. О., Дорошенко В. С., Клименко С. І. Сучасний стан і перспективи розвитку процесу лиття металу за моделями, що газифікуються. *Метал та лиття України*. 2023. № 3. С. 29. <https://doi.org/10.15407/steelcast2023.03.029>
2. Xie H., Zhao H., Guo X. Recent progress on cast magnesium alloy and components. *Journal of Materials Science*. 2024. Vol. 59. P. 9969–10002. <https://doi.org/10.1007/s10853-024-09459-x>
3. Development of the low-pressure die casting process for an aluminium alloy part / Monteiro F., Soares G., Madureira R., Silva R. P., Silva J., Amaral R., Esteves A. *Materials*. 2024. Vol. 17. No. 12. P. 2835. <https://doi.org/10.3390/ma17122835>
4. Effects of microstructure coarsening and casting pores on the tensile and fatigue properties of cast A356-T6 aluminum alloy: A comparative investigation / Yang B. C., Chen S. F., Song H. W., Zhang S. H., Chang H. P., Xu S. W., Li C. H. *Materials Science and Engineering: A*. 2022. Vol. 857. P. 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.144106>
5. Influence of high-pressure die casting parameters on the cooling rate and the structure of EN-AC 46000 alloy / Kowalczyk W., Daňko R., Górny M., Kawalec M., Burbelko A. *Materials*. 2022. Vol. 15. No. 16. P. 5702. <https://doi.org/10.3390/ma15165702>
6. Li Y., Liu J., Zhang Q., Huang W. Casting defects and microstructure distribution characteristics of aluminum alloy cylinder head with complex structure. *Materials Today Communications*. 2021. Vol. 27. P. 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102416>
7. He Y., Lu D., Li Z., Lu D. Multi-objective optimization of the low-pressure casting of large-size aluminum alloy wheels through a systematic optimization idea. *Materials*. 2023. Vol. 16. No. 18. P. 6223. <https://doi.org/10.3390/ma16186223>

8. Silvia C., Giovanna C. Enhancing aluminum alloy properties through low pressure forging: a comprehensive study on heat treatments. *Metals*. 2025. Vol. 15. No. 7. P. 797. <https://doi.org/10.3390/met15070797>
9. Yağcı T., Cöcen Ü. M. İ. T., Çulha O. S. M. A. N. Aluminum alloy development for wheel production by low pressure die casting with new generation computational materials engineering approaches. *Archives of Foundry Engineering*. 2021. Vol. 21. <https://doi.org/10.24425/afe.2021.138677>
10. Breton F., Fourmann J. Performance and fundamental differences between rheocast and high-pressure vacuum die cast Al-Si-Mg alloys. *Solid State Phenomena*. 2023. Vol. 348. P. 75–82. <https://doi.org/10.4028/p-p5sK4z>

REFERENCES:

1. Shynskyi, V. O., Doroshenko, V. S., & Klymenko, S. I. (2023). Suchasnyi stan i perspektyvy rozvytku protsesu lytia metalu za modeliamy, shcho hazyfikuiutsia [Current state and prospects of the metal casting process development using gasified patterns]. *Metal ta lytia Ukrainy – Metal and Casting of Ukraine*, 3, 29. <https://doi.org/10.15407/steelcast2023.03.029> [in Ukrainian].
2. Xie, H., Zhao, H., Guo, X., et al. (2024). Recent progress on cast magnesium alloy and components. *Journal of Materials Science*, 59, 9969–10002. <https://doi.org/10.1007/s10853-024-09459-x>
3. Monteiro, F., Soares, G., Madureira, R., Silva, R.P., Silva, J., Amaral, R., & Esteves, A. (2024). Development of the low-pressure die casting process for an aluminium alloy part. *Materials*, 17(12), 2835. <https://doi.org/10.3390/ma17122835>
4. Yang, B. C., Chen, S. F., Song, H. W., Zhang, S. H., Chang, H. P., Xu, S. W., & Li, C. H. (2022). Effects of microstructure coarsening and casting pores on the tensile and fatigue properties of cast A356-T6 aluminum alloy: A comparative investigation. *Materials Science and Engineering: A*, 857, 144106. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.144106>
5. Kowalczyk, W., Dańko, R., Górny, M., Kawalec, M., & Burbelko, A. (2022). Influence of high-pressure die casting parameters on the cooling rate and the structure of EN-AC 46000 alloy. *Materials*, 15(16), 5702. <https://doi.org/10.3390/ma15165702>
6. Li, Y., Liu, J., Zhang, Q., & Huang, W. (2021). Casting defects and microstructure distribution characteristics of aluminum alloy cylinder head with complex structure. *Materials Today Communications*, 27, 102416. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102416>
7. He, Y., Lu, D., Li, Z., & Lu, D. (2023). Multi-objective optimization of the low-pressure casting of large-size aluminum alloy wheels through a systematic optimization idea. *Materials*, 16(18), 6223. <https://doi.org/10.3390/ma16186223>
8. Silvia, C., & Giovanna, C. (2025). Enhancing aluminum alloy properties through low pressure forging: A comprehensive study on heat treatments. *Metals*, 15(7), 797. <https://doi.org/10.3390/met15070797>
9. Yagci, T., Cöcen, Ü. M. İ. T., & Çulha, O. S. M. A. N. (2021). Aluminum alloy development for wheel production by low pressure die casting with new generation computational materials engineering approaches. *Archives of Foundry Engineering*, 21. <https://doi.org/10.24425/afe.2021.138677>
10. Breton, F., & Fourmann, J. (2023). Performance and fundamental differences between rheocast and high-pressure vacuum die cast Al-Si-Mg alloys. *Solid State Phenomena*, 348, 75–82. <https://doi.org/10.4028/p-p5sK4z>

Стаття надійшла: 26.08.2025

Стаття прийнята: 17.09.2025

Опублікована: 10.11.2025

