УДК 621.74.044:669.715
DOI https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-6-14

ВАКУУМУВАННЯ ПРЕС-ФОРМИ ЯК ФАКТОР ПІДВИЩЕННЯ ГЕРМЕТИЧНОСТІ ВИЛИВКІВ З АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ ПРИ ЛИТТІ ПІД 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

У статті представлено результати комплексного експериментального дослідження впливу вакуумування прес-форми на герметичність виливків з алюмінієвих сплавів при литті під тиском. Детально проаналізовано залежність виникнення внутрішніх дефектів, як-от пористість, газові включення та непроливи, від рівня залишкового тиску в порожнині форми перед упорскуванням розплаву. Установлено, що зниження тиску до 80–100 мбар суттєво зменшує імовірність утворення дефектів, особливо в тонкостінних деталях, що є критично важливим для забезпечення надійності, міцності, довговічності та експлуатаційної стабільності виробів. Експериментальні дослідження проводили на модернізованому промисловому ливарному обладнанні з інтегрованою вакуумною системою, цифровим моніторингом тиску та температури в режимі реального часу, а також з адаптивним керуванням технологічними параметрами, що забезпечувало стабільність процесу та точний контроль усіх параметрів лиття. Показано, що застосування вакуумування дає змогу знизити частку бракованих виробів із 7,2 % до 2,9 %, забезпечуючи рівномірне заповнення форми без утворення повітряних кишень та дефектів поверхні. Поєднання вакуумного режиму із цифровим контролем параметрів сприяє формуванню щільної мікроструктури з мінімальною пористістю та підвищує герметичність, міцність і надійність виробів, особливо складних корпусних деталей з підвищеними вимогами до якості. Результати дослідження підтверджують ефективність інтеграції вакуумного обладнання в промисловий процес лиття під тиском як надійного, економічно доцільного та технологічно обґрунтованого засобу підвищення якості продукції, стабілізації процесу та забезпечення високої точності виготовлення деталей у серійному виробництві.

Ключові слова: *лиття під тиском, вакуумування, алюмінієві сплави, герметичність, дефекти виливків, пористість, тиск у формі, модернізація, автоматизація.*

Kreitser Kyryll, Kozishkurt Evgeny. Vacuuming of the die mold as a factor for improving the tightness of aluminum alloy castings in pressure die casting

The article presents the results of a comprehensive experimental study on the influence of mold vacuuming on the tightness of aluminum alloy castings produced by pressure die casting. The dependence of internal defect formation, including porosity, gas inclusions, and misruns, on the level of residual pressure in the mold cavity prior to melt injection was analyzed in detail. It was established that reducing the pressure to 80–100 mbar significantly decreases the likelihood of defect formation, particularly in thin-walled components, which is critically important for ensuring the reliability, strength, durability, and operational stability of the castings. Experimental investigations were carried out on modernized industrial casting equipment equipped with an integrated vacuum system, digital real-time monitoring of pressure and temperature, and adaptive control of technological parameters, ensuring process stability and precise control of all casting parameters. The study demonstrated that the application of vacuuming reduces the proportion of defective castings from 7.2 % to 2.9 %, providing uniform mold filling without air pockets or surface defects. The combination of vacuum mode with digital process control promotes the formation of a dense microstructure with minimal porosity and enhances the tightness, mechanical performance, and reliability of castings, especially complex structural components with high-quality requirements. The results confirm the effectiveness of integrating vacuum equipment into the industrial die casting process as a reliable, economically feasible, and technologically justified approach to improving product quality, stabilizing the production process, and ensuring high dimensional accuracy of serially manufactured components.

Key words: *high-pressure die casting, vacuuming, aluminum alloys, tightness, casting defects, porosity, mold pressure, modernization, automation.*

Вступ. Проблема забезпечення герметичності виливків з алюмінієвих сплавів, отриманих методом лиття під тиском, на сьогоднішній день не втрачає актуальності, особливо в умовах серійного виробництва складних корпусних деталей для автомобільної, електротехнічної та авіаційної промисловості. На тлі постійного посилення вимог до якості, надійності й довговічності виробів, навіть незначні внутрішні дефекти, зокрема пори, мікропустоти, непроливи чи газові включення, можуть стати критичними щодо подальшої експлуатації виробу. У багатьох випадках саме мікропористість спричиняє зниження міцності з'єднань, зменшення опору до втоми, а також втрату герметичності в умовах високих температур або тиску [1; 2].

Попри те що сучасне лиття під тиском забезпечує високий рівень точності та повторюваності, без додаткових технологічних заходів важко гарантувати відсутність повітря в порожнині прес-форми під час упорскування розплаву. Одним із найбільш дієвих способів подолання цього недоліку визнано вакуумування – процес створення розрідження в ливарній формі безпосередньо перед заповненням її розплавом [3; 4].

Наукова новизна роботи полягає в установленні кількісної залежності між рівнем залишкового тиску в порожнині прес-форми (80–100 мбар) та зниженням частки дефектних виливків з алюмінієвих сплавів, підтвердженій експериментальними даними на серійному ливарному обладнанні. На відміну від попередніх досліджень, у роботі вперше здійснено комплексне поєднання вакуумного режиму із цифровим контролем тиску й температури в реальному часі, що дало змогу визначити оптимальні параметри «вакуум – інжекція» для AlSi9Mn та AlSi9Cu3(Fe) у промислових умовах. Запропонований підхід забезпечив подвоєння герметичності (до >1,2 МПа) та зниження пористості до 2,8 %, що не було кількісно описано в дослідженнях інших авторів.

Дослідження останніх років підтверджують, що застосування вакуумування в процесі лиття під тиском має суттєвий позитивний вплив на якість отриманих виливків. Найперше йдеться про підвищення ефективності заповнення прес-форми, особливо у випадках складної геометрії або наявності тонкостінних ділянок, де традиційне лиття часто не забезпечує достатньої плинності розплаву. Створення розрідженого середовища в порожнині форми дає змогу значно зменшити опір, який чинить повітря при русі фронту металу, а отже, імовірність утворення повітряних кишень або пасток газу значно знижується. Це, своєю чергою, мінімізує виникнення таких дефектів, як непроливи, внутрішні пори й пористість поверхні, що особливо важливо для відповідальних литих компонентів, де високі вимоги до герметичності та однорідності матеріалу [5; 6].

Результати експериментів із використанням сплавів системи Al-Si-Mg у режимі надвисокого вакуумування показали, що щільність і цілісність мікроструктури виливків суттєво покращується. Спостерігалося підвищення механічних характеристик – зокрема, міцності на розтяг і межі плинності – на 20–25 % порівняно з виробами, отриманими без застосування вакуумного режиму. Такий результат зумовлений відсутністю газових включень та зменшенням кількості внутрішніх мікропорожнин, які зазвичай формуються за наявності повітря в закритих зонах прес-форми [7].

Однак досягнення стабільного ефекту вакуумування не є тривіальним завданням і вимагає узгодження низки технологічних параметрів. Як показують дослідження, важливу роль відіграє точне часове узгодження моменту створення вакууму з початком упорскування. Якщо евакуація повітря не завершена повністю або відбувається із затримкою, ефективність вакуумного режиму суттєво знижується. Крім того, температурний стан прес-форми безпосередньо впливає на динаміку заповнення: надто холодна форма може спричинити передчасне затвердіння фронту розплаву, тоді як перегрів зменшує в'язкість сплаву, ускладнюючи контроль за процесом [8].

Не менш значущим чинником є швидкість руху плунжера, яка повинна бути адаптована до умов вакуумування. Надто повільне упорскування не забезпечує повного витіснення залишкового повітря, тоді як надто швидке може спричинити турбулентність, втрату спрямованості потоку та виникнення зворотних завихрень, що призводить до вторинного захоплення газу. Так, ключовим є дотримання узгодженого режиму «вакуум – інжекція» з точним контролем усіх динамічних параметрів, що забезпечує формування якісного виливка без критичних внутрішніх дефектів [9].

Технічна реалізація вакуумування передбачає встановлення систем відсмоктування повітря або газових сумішей через спеціальні вакуум-канали, зворотні клапани або автоматизовані клапанні блоки із сенсорною підтримкою. Використання таких пристроїв дає змогу забезпечити контрольований тиск у формі до моменту заповнення її розплавом, що значно знижує ризики формування мікропор [10]. У сучасних високоточних ливарних машинах

передбачено автоматизовану взаємодію між вакуумною системою та системою керування процесом упорскування. Це дає змогу змінювати параметри в реальному часі відповідно до сигналів із сенсорів тиску та температури, що значно підвищує надійність процесу [11].

Водночас варто зазначити, що ефективність вакуумування не є універсальною і потребує адаптації до кожного конкретного технологічного режиму. У низці робіт [12; 13] наголошується, що надто глибоке розрідження може призвести до передчасного охолодження фронту розплаву або утворення вакуумного «замикання» при складній геометрії порожнини. Так, проблема полягає не лише в досягненні розрідженого стану, а й у формуванні стійкого, керованого вакуумного поля, яке узгоджується з фазами впорскування і заповнення.

Питання збереження герметичності виливків у таких умовах пов'язане не тільки з наявністю пор, а й з мікроструктурними дефектами, які можуть виникати через термічний шок або локальні зони недоплаву. У цьому контексті вакуумування розглядається не як самостійна операція, а як інтегрований елемент цифрової системи керування ливарним процесом, що діє у зв'язку з іншими параметрами технологічного середовища – температурою розплаву, швидкістю плунжера, конфігурацією каналу литника [14].

Низка авторів [15; 16] зазначають, що зниження тиску нижче 70–80 мбар може погіршувати умови заповнення через зростання турбулентного складника. Це свідчить про наявність «критичного» рівня вакууму, який залежить від сплаву, конфігурації форми та швидкості впорскування. Однак для промислових умов лиття сплавів AlSi9Mn та AlSi9Cu3(Fe) ці межі в літературі висвітлені недостатньо, що й зумовлює актуальність проведеного нами дослідження.

Мета роботи – визначити вплив вакуумування прес-форми на герметичність виливків з алюмінієвих сплавів та обґрунтувати оптимальні режими вакуумування з урахуванням параметрів лиття. Окрему увагу приділено взаємодії вакуумної підсистеми з адаптивними цифровими контролерами, які регулюють хід упорскування залежно від сигналів із сенсорів тиску та температури. Експерименти проводили на базі модернізованої машини лиття під тиском із підтримкою вакуумного відведення та контролю фазового розрідження.

Так, дослідження зосереджується на практичному вимірі ефективності вакуумування при литті алюмінієвих сплавів, орієнтуючись на підвищення герметичності виливків без втрати продуктивності або ускладнення технології. Результати дослідження можуть бути корисними для фахівців, що займаються автоматизацією ливарного виробництва, проєктуванням прес-форм та оптимізацією технологічних режимів.

Методи та методики дослідження. Для визначення впливу вакуумування порожнини прес-форми на герметичність виливків з алюмінієвих сплавів організовано серію лабораторно-виробничих експериментів на ливарному устаткуванні, модернізованому під роботу у вакуумному режимі. Дослідження проводили з використанням сплаву AlSi9Mn – одного з найбільш поширених у виготовленні відповідальних корпусних деталей. Основна увага приділялася зміні частки дефектних виробів залежно від залишкового тиску в прес-формі перед упорскуванням розплаву. Результати роботи пройшли промислові випробування в BAMAX Poland Sp.zoo, Польща та в Державному підприємстві «Інженерний центр литва під тиском», Україна.

Результати та дискусії. На основі експериментальних даних установлено інтервал технологічної стійкості вакуумування: при тиску 80–100 мбар забезпечується мінімальна пористість та стабільне заповнення форми, тоді як подальше зниження тиску (<80 мбар) призводить до збільшення турбулентності, нерівномірного витіснення повітря та підвищеної імовірності газових включень. Це дає змогу визначити умовно «критичний» рівень вакууму для досліджених сплавів у межах 70–80 мбар, що узгоджується з тенденціями, відображеними в науковій роботі [17].

Процес лиття здійснювався на серійній горизонтальній машині лиття під тиском, до якої інтегровано вакуумний тракт з електронним клапаном, цифровим манометром та системою контролю тиску в реальному часі. Заміри проводили для п'яти рівнів залишкового тиску: атмосферний (≈1000 мбар), 300 мбар, 200 мбар, 100 мбар і 80 мбар. На кожному етапі фіксувалися показники герметичності на партії з не менш як 100 відливок.

Якість виливків оцінювали за допомогою оптичного контролю, капілярної дефектоскопії та рентгенографії. За результат браку вважали виливки з ознаками газових пор, усадочних раковин, поверхневої пористості або непроливів. Окрім цього, реєстрували температури розплаву, температури стінок прес-форми та параметри тиску впорскування, що дало змогу врахувати вплив супутніх технологічних факторів на якість відливки.

Отримані дані були статистично оброблені та відображені у вигляді графіка залежності

частки дефектних виробів від залишкового тиску у формі (рис. 1).

Як видно з рис. 1, при зниженні тиску нижче 200 мбар спостерігається чітке зменшення кількості браку: з 7,2 % за відсутності вакуумування до 2,9 % при досягненні рівня 80–100 мбар. Це дало змогу визначити оптимальний інтервал вакуумування, за якого досягається максимальне зниження кількості дефектів без ускладнення процесу лиття.

У процесі експериментів досліджено вплив вакуумування порожнини прес-форми на якість литих виробів з алюмінієвого сплаву AlSi9Cu3(Fe) в умовах високоточного лиття під тиском. Основний акцент зроблено на кількісній оцінці зменшення кількості дефектів, як-от усадкова пористість, газові включення та непроливи, залежно від залишкового тиску в порожнині форми перед упорскуванням розплаву.

Як видно з рис. 2, зі зниженням залишкового тиску перед упорскуванням від 0,6 до 0,1 бара частка бракованих виливків монотонно зменшується з 18,2 % до 4,3 %. Залежність має майже лінійний характер у дослідженому діапазоні, що свідчить про стабільне зниження ймовірності утворення газових та усадкових дефектів при поглибленні вакуумування. При тиску 0,1–0,2 бара спостерігається найбільший градієнт зменшення браку, що вказує на підвищену чутливість процесу заповнення до наявності повітря у формі. У зоні 0,4–0,6 бара зміна дефектності поступово стабілізується, що узгоджується з переходом від турбулентного до більш керованого режиму заповнення. Це підтверджує ефективність видалення повітря, що створювало би газові пастки, особливо у вузьких каналах та тонкостінних зонах деталі. Подібні ефекти описані й у роботах закордонних авторів, зокрема в дослідженні [14], де наголошується на критичності фазового заповнення за високої швидкості впорскування. Під час випробувань проводився також аналіз

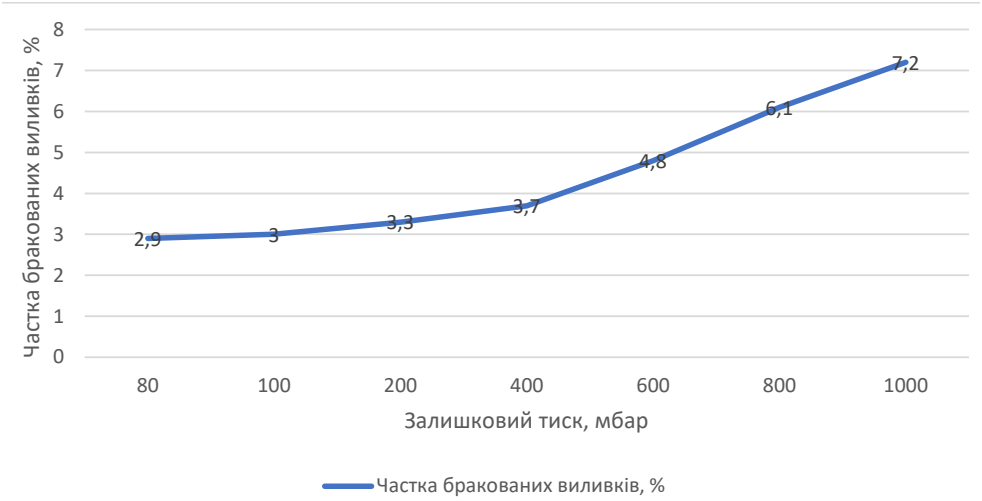

Рис. 1. Залежність кількості дефектів від рівня вакууму

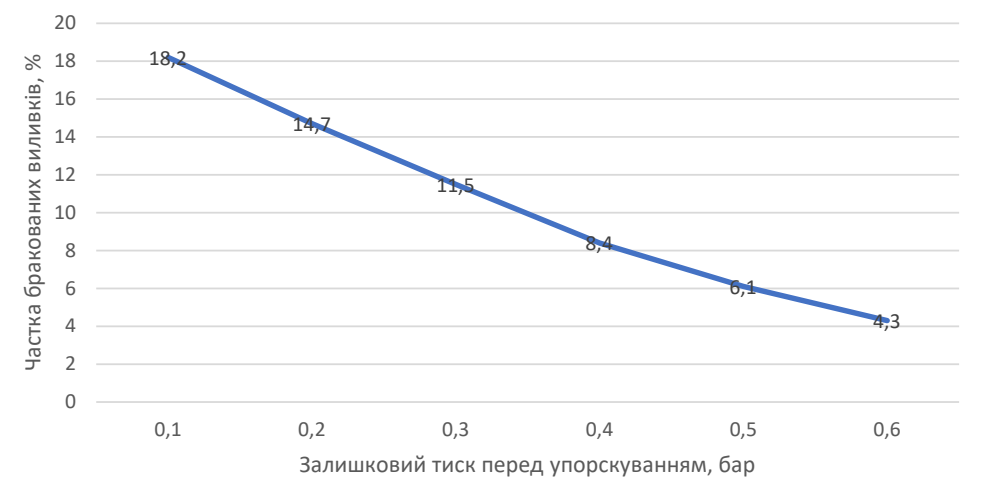

Рис. 2. Вплив залишкового тиску перед упорскуванням на частку дефектних виливків, %

температурного режиму прес-форми та його взаємозв'язку з герметичністю готових виливків. Як показано на рис. 3, найбільш стабільні результати досягали за температури форми в межах 225–235 °C. Перегрів до понад 250 °C призводив до формування усадочних пустот, що корелює з підвищеною інерційністю охолодження й утворенням локальних зон перегріву. Натомість температура нижче 210 °C знижувала плинність розплаву, що проявлялося у вигляді непроливів і дефектів заповнення.

Водночас досліджено кінетику процесу лиття: швидкість плунжера на момент упорскування становила 1,8–2,2 м/с, тиск упорскування – 65–75 МПа, а час витримки під тиском – 9–12 с. Саме поєднання контрольованого тиску й вакуумного режиму створювало умови для утворення рівномірної структури без мікропустот. У публікації [15] описано подібний ефект для сплавів AlSi10MnMg, де якість виливків покращувалася при поєднанні високої швидкості впорскування з мінімальним умістом повітря в порожнині.

Порівняння структури зламів бракованих і придатних виливків, виконане методом оптичної мікроскопії, показало чітку різницю в пористості (до 9 % у випадку без вакууму проти 2–3 % з вакуумуванням). Ці результати підтверджують висновки дослідження [16], де покращення якості лиття досягалося шляхом оптимізації геометрії системи лиття, але водночас підкреслювалась важливість чистоти газового середовища.

Емпірична обробка результатів показала, що залежність частки пористості P від залишкового тиску p у дослідженому діапазоні може бути апроксимована степеневою формою:

$$P = k \cdot p^{n},$$

де для сплаву $AlSi_9Mn$ отримано $k = 0{,}012$ та $n \oplus 0{,}82$. Це узгоджується з тенденціями, наведеними в роботах [15; 16]

На основі отриманих даних сформовано узагальнену таблицю основних параметрів та результатів (таблиця 1).

Таблиця 1

Порівняльні показники якості виливків при використанні та відсутності вакуумування

Параметр	Без вакуумування	З вакуумуванням
Частка бракованих виливків, %	7,2	2,9
Середній рівень пористості, %	9,1	2,8
Герметичність (випробування тиском), МПа	≤0,6	>1,2
Коефіцієнт повторюваності якості (RSD), %	6,4	2,2

Узагальнені результати, подані в Таблиці 1, чітко демонструють позитивний вплив вакуумування на якість виливків. Вакуумний режим забезпечує суттєве скорочення дефектності, стабільніше заповнення порожнини форми та мінімізацію газових включень порівняно зі стандартним циклом лиття. Зниження середнього рівня пористості з понад 9 % до менш ніж 3 % підтверджує формування однорідної

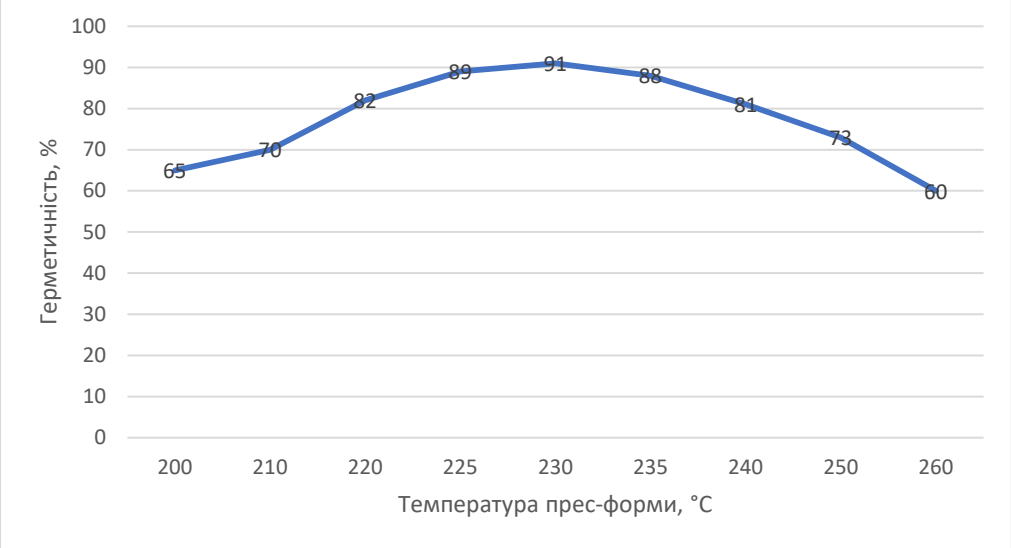

Рис. 3. Залежність рівня герметичності виливків від температури прес-форми

мікроструктури без мікропустот, а підвищення герметичності до понад 1,2 МПа свідчить про покращення щільності та структури матеріалу. Водночас зменшення коефіцієнта варіації майже втричі вказує на підвищення технологічної стабільності та повторюваності процесу лиття у вакуумному режимі, що є важливою перевагою для серійного виробництва.

Окремо варто звернути увагу на зменшення коефіцієнта варіації результатів (RSD) – з 6,4 % до 2,2 %. Це означає, що процес став не лише якіснішим, а й більш стабільним у повторних циклах. Така однорідність особливо важлива в умовах безперервного виробництва, де мінімізація коливань забезпечує економію ресурсів і стабільність кінцевого продукту. Загалом, усі наведені параметри свідчать про практичну доцільність упровадження вакуумування в цикл лиття, особливо при виробництві герметичних або тонкостінних деталей із підвищеними вимогами до якості поверхні та внутрішньої структури. Проведене дослідження доводить, що інтеграція вакуумного тракту до циклу лиття під тиском дає змогу істотно знизити частку дефектів без негативного впливу на продуктивність чи собівартість процесу. Результати можуть бути рекомендовані до впровадження в серійне виробництво відповідальних корпусних елементів, де критичне значення має герметичність та щільність металу.

Хоча такі технології були раніше впроваджені у виробництві магнієвих виливків (див. [8]), наше дослідження адаптує ці підходи до алюмінієвих сплавів і підкріплює їх конкретними кількісними показниками. Це надає можливість удосконалити систему контролю й зниження частоти відмов у критично навантажених деталях.

Висновки. Експериментальні дослідження підтверджують, що вакуумування порожнини прес-форми істотно підвищує якість литих виробів з алюмінієвих сплавів. Зафіксовано чітку тенденцію до зменшення дефектності та пористості, що супроводжується формуванням щільнішої та більш однорідної мікроструктури. Виявлений оптимальний діапазон залишкового тиску 80–100 мбар забезпечує стабільне заповнення форми без утворення повітряних пасток і дефектів, характерних для тонкостінних і складноконтурних ділянок деталей.

Результати випробувань герметичності демонструють суттєве підвищення опірності литих виробів до внутрішнього тиску, що свідчить про підсилення структурної цілісності матеріалу та відсутність макро- й мікропорожнин. Зменшення коефіцієнта варіації (RSD) вказує на підвищення повторюваності та стабільності процесу лиття при застосуванні вакуумного режиму, що є важливим фактором у серійному виробництві відповідальних корпусних елементів.

Температурний режим прес-форми відіграє визначальну роль у забезпеченні герметичності: найменша кількість дефектів зафіксована в інтервалі 225–235 °C. Відхилення від цих меж призводить до зниження плинності розплаву або формування усадочних пустот через локальні зони перегріву. Поєднання вакуумування із цифровим контролем температури та тиску забезпечує керовану кінетику заповнення, що підвищує стабільність процесу та якість відливок.

З теоретичного боку отримані результати уточнюють механізм впливу вакуумування на структуру виливків. Зниження залишкового тиску в порожнині форми мінімізує стискання газів перед фронтом розплаву, усуває турбулентні зони та забезпечує більш ламінарний характер заповнення. Це сприяє рівномірному витісненню повітря й запобігає зародженню мікропор у ділянках з уповільненою кристалізацією. Так, дослідження розширює наукові уявлення про формування пористості при високошвидкісному литті під тиском та демонструє, що контроль фазового режиму «вакуум – інжекція» є критичним чинником для отримання щільної та герметичної структури алюмінієвих сплавів.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Pidgurskyi M., Pidgurskyi I., Stashkiv M., Ihnatieva V., Danylchynko S., Bykiv D., Pidluzhnyi O. Peculiarities of studying the stress-strain state of structural steel perforated beams using the finite element method. *Scientific Journal of TNTU.* 2023. Vol. 111(3). P. 126–138. https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2023.03.126.

2. Niu Z., Liu G., Li T., Ji S. Effect of high pressure die casting on the castability, defects and mechanical properties of aluminium alloys in extra-large thin-wall castings. *Journal of Materials Processing Technology.* 2022. Vol. 303. Article ID 117525. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2022.117525.

3. Nunes H., Emadinia O., Vieira M. F., Reis A. Low-and High-Pressure Casting Aluminum Alloys: A Review. *Recent Advancements in Aluminum Alloys.* 2023. https://doi.org/10.5772/intechopen.109869.

4. Réger M., Horváth R., Fábián E.R., Réti T. Modelling the impregnation of a pressure-tight casting. *International Journal of Metalcasting.* 2025. Vol. 19(1). P. 165–175. https://doi.org/10.1007/s40962-024-01272-1.

5. Li D., Slater C., Cai H., Hou X., Li Y., Wang Q. Joining technologies for aluminium castings – A review. *Coatings.* 2023. Vol. 13(5). Article 958. https://doi.org/10.3390/coatings13050958.

6. Gyarmati G., Kéri Z., Mende T., Molnár D. Analysis of the quality of incoming AlSi9Mn alloy ingots. *International Journal of Metalcasting.* 2024. Vol. 18(2). P. 1723–1738. https://doi.org/10.1007/s40962-023-01146-y.

7. Yang J., Liu B., Shu D., Li H., Yang Q., Hu T., Tang X. Effect of ultra vacuum assisted high pressure die casting on the mechanical properties of Al-Si-Mn-Mg alloy. *Journal of Alloys and Compounds.* 2025. Vol. 1026. Article ID 180531. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.180531.

8. Kan M., Ipek O., Koru M. An investigation into the effect of vacuum conditions on the filling analysis of the pressure casting process. *International Journal of Metalcasting.* 2023. Vol. 17(1). P. 430–446. https://doi.org/10.1007/s40962-022-00770-4.

9. Trometer N., Godlewski L.A., Prabhu E., Schopen M., Luo A.A. Effect of vacuum on die filling in high pressure die casting: water analog, process simulation and casting validation. *International Journal of Metalcasting.* 2024. Vol. 18(1). P. 69–85. https://doi.org/10.1007/s40962-023-01002-z.

10. Stalnichenko O., Lysenko T., Ponomarenko O., Kreitser K., Kozishkurt E. Vacuum technology for magnesium alloys during die casting of radiators. *Advanced Manufacturing Processes VI.* Cham: Springer, 2025. https://doi.org/10.1007/978-3-031-82746-4_20.

11. Soares G., Neto R., Madureira R., Soares R., Silva J., Silva R.P., Araújo L. Characterization of Al alloys injected through vacuum-assisted HPDC and influence of T6 heat treatment. *Metals.* 2023. Vol. 13(2). Article 389. https://doi.org/10.3390/met13020389.

12. Jiao X. Y., Zhang Y. F., Wang J., Nishat H., Liu Y. X., Liu W. N., Xiong S. M. Characterization of externally solidified crystals in a high-pressure die-cast AlSi10MnMg alloy and their effect on porosities and mechanical properties. *Journal of Materials Processing Technology.* 2021. Vol. 298. Article ID 117299. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117299.

13. Réger M., Horváth R., Fábián E. R., Réti T. Impregnation problems of aluminum castings. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2024. Vol. 1313(1). Article ID 012007. https://doi.org/10.1088/1757-899X/1313/1/012007.

14. Liu W., Peng T., Kishita Y., Umeda Y., Tang R., Tang W., Hu L. Critical life cycle inventory for aluminum die casting: A lightweight-vehicle manufacturing enabling technology. *Applied Energy.* 2021. Vol. 304. Article ID 117814. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117814.

15. Jiao X. Y., Wang P. Y., Liu Y. X., Wang J., Liu W. N., Wan A. X., Xiong S. M. Fracture behavior of a high pressure die casting AlSi10MnMg alloy with varied porosity levels. *Journal of Materials Research and Technology.* 2023. Vol. 25. P. 1129–1140. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.05.281.

16. Kang H. J., Jang H. S., Oh S. H., Yoon P. H., Lee G. H., Shin S. M., Choi Y. S. Effects of gate system design on pore defects and mechanical properties of pore-free die-cast Al-Si-Cu alloy. *Materials Today Communications.* 2022. Vol. 31. Article ID 103673. https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.103673.

17. Szalva P., Orbulov I. N. The effect of vacuum degree on the porosity and mechanical properties of die cast AlSi9Cu3(Fe) aluminum alloy. 2018. URL: https://real.mtak.hu/89281/1/IJMC-D-18-00211_R2_REAL.pdf?utm_source=chatgpt.com

REFERENCES:

1. Pidgurskyi, M., Pidgurskyi, I., Stashkiv, M., Ihnatieva, V., Danylchynko, S., Bykiv, D., & Pidluzhnyi, O. (2023). Peculiarities of studying the stress-strain state of structural steel perforated beams using the finite element method. *Scientific Journal of TNTU*, 111(3), 126–138. https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2023.03.126.

2. Niu, Z., Liu, G., Li, T., & Ji, S. (2022). Effect of high pressure die casting on the castability, defects and mechanical properties of aluminium alloys in extra-large thin-wall castings. *Journal of Materials Processing Technology*, 303, art. 117525. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2022.117525.

3. Nunes, H., Emadinia, O., Vieira, M. F., & Reis A. (2023). Low-and high-pressure casting aluminum alloys: a review. *Recent Advancements in Aluminum Alloys*. https://doi.org/10.5772/intechopen.109869.

4. Réger, M., Horváth, R., Fábián, E. R., & Réti, T. (2025). Modelling the impregnation of a pressure-tight casting. *International Journal of Metalcasting*, 19(1), 165–175. https://doi.org/10.1007/s40962-024-01272-1.

5. Li, D., Slater, C., Cai, H., Hou, X., Li, Y., & Wang, Q. (2023). Joining technologies for aluminium castings – a review. *Coatings*, 13(5), art. 958. https://doi.org/10.3390/coatings13050958.

6. Gyarmati, G., Kéri, Z., Mende, T., & Molnár, D. (2024). Analysis of the quality of incoming AlSi9Mn alloy ingots. *International Journal of Metalcasting*, 18(2), 1723–1738. https://doi.org/10.1007/s40962-023-01146-y.

7. Yang, J., Liu, B., Shu, D., Li, H., Yang, Q., Hu, T., & Tang, X. (2025). Effect of ultra vacuum assisted high pressure die casting on the mechanical properties of Al-Si-Mn-Mg alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 1026, art. 180531. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.180531.

8. Kan, M., Ipek, O., & Koru, M. (2023). An investigation into the effect of vacuum conditions on the filling analysis of the pressure casting process. *International Journal of Metalcasting*, 17(1), 430–446. https://doi.org/10.1007/s40962-022-00770-4.

9. Trometer, N., Godlewski, L. A., Prabhu, E., Schopen, M., & Luo, A. A. (2024). Effect of vacuum on die filling in high pressure die casting: water analog, process simulation and casting validation. *International Journal of Metalcasting*, 18(1), 69–85. https://doi.org/10.1007/s40962-023-01002-z.

10. Stalnichenko, O., Lysenko, T., Ponomarenko, O., Kreitser, K., & Kozishkurt, E. (2025). Vacuum technology for magnesium alloys during die casting of radiators. Advanced Manufacturing Processes VI. Springer: Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-82746-4_20.

11. Soares, G., Neto, R., Madureira, R., Soares, R., Silva, J., Silva, R. P., & Araújo, L. (2023). Characterization of Al alloys injected through vacuum-assisted HPDC and influence of T6 heat treatment. *Metals*, 13(2), art. 389. https://doi.org/10.3390/met13020389.

12. Jiao, X. Y., Zhang, Y. F., Wang, J., Nishat, H., Liu, Y.X., Liu, W. N., & Xiong, S. M. (2021). Characterization of externally solidified crystals in a high-pressure die-cast AlSi10MnMg alloy and their effect on porosities and mechanical properties. *Journal of Materials Processing Technology,* 298, art. 117299. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117299.

13. Réger, M., Horváth, R., Fábián, E. R., & Réti, T. (2024). Impregnation problems of aluminum castings. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1313(1), art. 012007. https://doi.org/10.1088/1757-899X/1313/1/012007.

14. Liu, W., Peng, T., Kishita, Y., Umeda, Y., Tang, R., Tang, W., & Hu, L. (2021). Critical life cycle inventory for aluminum die casting: a lightweight-vehicle manufacturing enabling technology. *Applied Energy*, 304, art. 117814. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117814.

15. Jiao, X. Y., Wang, P. Y., Liu, Y. X., Wang, J., Liu, W. N., Wan, A. X., & Xiong, S. M. (2023). Fracture behavior of a high pressure die casting AlSi10MnMg alloy with varied porosity levels. *Journal of Materials Research and Technology*, 25, 1129–1140. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.05.281.

16. Kang, H. J., Jang, H. S., Oh, S. H., Yoon, P. H., Lee, G. H., Shin, S. M., & Choi, Y. S. (2022). Effects of gate system design on pore defects and mechanical properties of pore-free die-cast Al-Si-Cu alloy. *Materials Today Communications*, 31, art. 103673. https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.103673.

17. Szalva, P., & Orbulov, I. N. (2018). The effect of vacuum degree on the porosity and mechanical properties of die cast AlSi9Cu3(Fe) aluminum alloy. Retrieved from https://real.mtak.hu/89281/1/IJMC-D-18-00211_R2_REAL.pdf?utm_source=chatgpt.com

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 24.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 13.01.2025
Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.03.2026