

**ЗАСТОСУВАННЯ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ У ПРОЦЕСІ  
ЛИТТЯ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ ПІД ТИСКОМ НА  
МОДЕРНІЗОВАНОМУ ОБЛАДНАННІ**

***Анотація.** У статті висвітлено результати впровадження комп'ютеризованої системи керування процесом лиття алюмінієвих сплавів під тиском на модернізованому виробничому обладнанні. Описано практичну реалізацію керування подачею розплаву, тиском ущільнення та охолодження форми в режимі реального часу з урахуванням температурно-швидкісних параметрів кожного циклу. Завдяки алгоритмам адаптивного регулювання вдалося скоротити тривалість технологічного циклу на 10 %, знизити енерговитрати, а також зменшити частку дефектних виробів із пористістю та тріщинами. Встановлено, що використання комп'ютерного моніторингу дозволяє точніше виявляти критичні зони в прес-формі, де відбуваються перегриви або недостатнє заповнення. Наведено технічні характеристики модернізованої лінії та порівняння з традиційною схемою керування. Показано, що впровадження комп'ютерної підтримки прийняття рішень сприяє стабілізації параметрів лиття при змінних умовах роботи, зокрема при переході на нові марки сплавів або зміні конфігурації виробів.*

***Ключові слова:** лиття під тиском, алюмінієві сплави, комп'ютерне керування, адаптивна система, дефекти, модернізація, продуктивність.*

**Постановка проблеми**

Під час лиття алюмінієвих сплавів під тиском часто виникають труднощі з підтриманням стабільних параметрів процесу – тиску, температури, швидкості подачі металу – що безпосередньо впливає на якість виливків. Застарілі системи керування не завжди здатні оперативно реагувати на зміни в технологічному середовищі, що призводить до появи дефектів, нестабільної мікроструктури та перевитрати енергії [1; 2]. Сучасні комп'ютеризовані платформи, які поєднують функції візуального моніторингу, предиктивної

діагностики та автоматичного регулювання, вже демонструють позитивний ефект у частині оптимізації виробничих циклів [3; 4]. Проте у впровадженні таких систем існує низка бар'єрів: труднощі інтеграції з наявним обладнанням, несумісність форматів даних від різних типів сенсорів, а також брак кваліфікованих кадрів, здатних обслуговувати нові комплекси [5]. Усе це зумовлює актуальність дослідження, спрямованого на розробку адаптованої системи комп'ютерного керування для процесу лиття під тиском, яка враховує особливості модернізованих технічних вузлів і динаміку процесу в цілому.

Останні роки позначені стійкою тенденцією до цифровізації процесів лиття алюмінієвих сплавів під тиском, що виявляється у впровадженні комп'ютеризованих систем адаптивного керування, які реагують на зміну стану об'єкта в режимі реального часу. У публікаціях [3; 4; 6] наголошується, що якість литих виробів тісно пов'язана з точністю контролю фаз заповнення, підпресовки та кристалізації, які потребують інтеграції сенсорики, цифрового моніторингу та систем передбачуваного аналізу. Роботи [1; 5; 7] демонструють, що поєднання адитивних технологій із литтям дає змогу виготовляти тонкостінні або порожнисті елементи з мінімальним числом дефектів.

З огляду на фізичну специфіку процесу, однією з ключових змінних залишається швидкість подачі розплаву, яка повинна бути достатньою для повного заповнення форми до початку тверднення. Її визначають, зокрема, через рівняння (1):

$$v = \sqrt{\frac{2(P_i - P_0)}{\rho}} \quad (2);$$

де  $v$  – швидкість потоку,  $P_i$  – тиск упорскування,  $P_0$  – атмосферний тиск,  $\rho$  – густина металу. Цей вираз [2; 8] застосовується в системах автоматичного контролю, де параметри оперативно коригуються на основі зворотного зв'язку.

У загальному вигляді структура керованого технологічного процесу лиття може бути представлена у вигляді функціональної моделі (2):

$$Q = f(x_1, \dots, x_n, u_1, \dots, u_m; a_1, \dots, a_k) \quad (2);$$

де  $Q$  – узагальнений показник якості виливка;  $x_i$  – інерційні (повільнозмінні) параметри процесу, наприклад, температура металу, хімічний склад або параметри форми;  $u_j$  – малоінерційні (швидкодіючі) параметри, що можуть

оперативно регулюватися: тиск, швидкість упорскування, тривалість підпресовки;  $ak$  – коефіцієнти моделі, які відображають зв'язки між змінними. Подібна модель дозволяє не просто спостерігати, а й активно впливати на перебіг процесу, керуючи ним відповідно до заданої мети – мінімізації дефектів або енергоспоживання, що підтверджується результатами [6; 9; 10].

У виробничій практиці, вже створено і впроваджено цілі цехи, де подібні системи діють як невід'ємна частина цифрового виробництва. Система комп'ютерного керування там не лише фіксує процес, а й формує цифрову «тінь» – динамічну модель, що відображає реальний стан прес-форми, температурні поля та критичні точки заповнення [7].

Незважаючи на досягнення, досі існують об'єктивні труднощі: складність інтеграції нових сенсорів з наявними контролерами, неоднорідність форматів даних та висока залежність ефективності систем від рівня кваліфікації обслуговуючого персоналу. Ці бар'єри вимагають не лише технічних, а й організаційних рішень, що й визначає актуальність подальших досліджень у сфері адаптивного керування литтям на модернізованому обладнанні.

**Метою** дослідження є обґрунтування доцільності впровадження адаптивної комп'ютеризованої системи керування процесом лиття алюмінієвих сплавів під тиском на модернізованому обладнанні. У фокусі – аналіз впливу цифрового моніторингу температурно-динамічних параметрів, оптимізація режимів упорскування та охолодження, а також оцінка можливостей зниження енерговитрат і частки браку за рахунок автоматичного регулювання процесу в реальному часі.

Викладення основного матеріалу дослідження

У рамках дослідження було проведено серію експериментів на оновленій ливарній лінії, оснащених комп'ютеризованою системою керування, спеціально адаптованою для високошвидкісного лиття алюмінієвих сплавів під тиском. Система мала дворівневу структуру: на верхньому рівні працював операторський інтерфейс з візуалізацією параметрів і можливістю ручного налаштування, а на нижньому – програмований логічний контролер Simatic S7-1200, який збирав сигнали з датчиків тиску, температури та положення поршня з частотою 10 мілісекунд. Під час випробувань реєструвались ключові динамічні показники – зокрема, швидкість руху поршня (до 7 м/с), тиск

ущільнення, температура форми та температурний перепад у фінальній фазі кристалізації. Як свідчить аналіз отриманих у реальному часі графіків (рис. 1), ефективність лиття значною мірою залежала від точного узгодження фаз: перекриття литникового каналу, завершення заповнення та підпресовки. Завдяки динамічному регулюванню тиску – на основі сигналів з термодатчиків і сенсорів зусилля – вдалося уникнути гідроударів, зменшити об’єм залишків у камері та досягти стабільного формоутворення виливків. На рисунку 1 представлено типовий цикл лиття з фіксацією температури та тиску при різних швидкостях руху поршня.

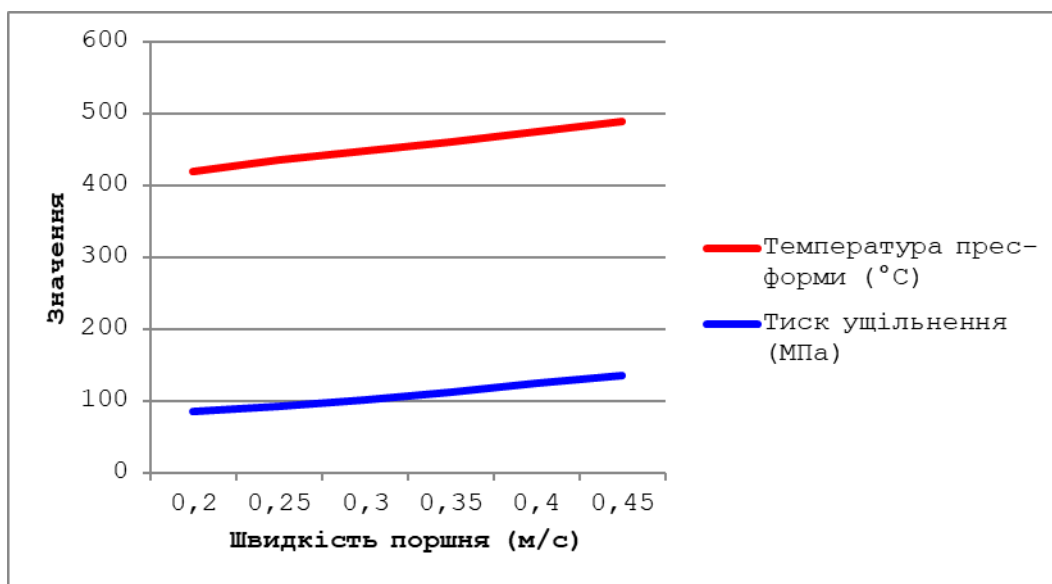


Рисунок 1 – Динаміка температури прес-форми та тиску ущільнення при різних швидкості подачі поршня

Як видно з рисунку 1, зі збільшенням швидкості понад 0,35 м/с зростає тепловіддача у зоні контакту з прес-формою. Це сприяє стабільнішому формуванню структури металу та знижує ймовірність пористості. У таблиці 1 наведено порівняльні дані щодо тривалості циклу лиття, питомих енерговитрат та частки браку для трьох варіантів: стандартна система керування, модернізована система без зворотного зв'язку та повнофункціональна комп'ютеризована система з адаптивним регулюванням.

Таблиця 1

Порівняння техніко-економічних показників систем керування процесом лиття

Система керування	Середня тривалість циклу, с	Енерговитрати, кВт·год/1000 шт.	Частка дефектів, %
Стандартна	46	138,7	7,8
Модернізована	43	132,4	5,6
Адаптивна	40	125,5	3,4

Як видно з результатів, адаптивна система дає відчутний ефект: цикл стає коротшим на 6 секунд, енерговитрати знижуються майже на 10%, а кількість дефектних виробів – удвічі менша порівняно зі стандартною схемою. В ході дослідження було застосовано емпіричну модель (2), яка враховує взаємозв’язок між тиском упорскування та швидкістю заповнення. Модель інтегрували в програмне забезпечення у керування, що дозволило автоматично коригувати тиск подачі у випадках перегріву або надмірної швидкості потоку. Це виявилось особливо корисним при роботі з чутливими до температури сплавами.

На рис. 2 представлено залежність частки дефектних виливків від відхилення температури форми у фінальній фазі кристалізації. Зниження температури нижче оптимуму (< 210 °С) призводить до зростання ризику непроливу, тоді як перегрів спричиняє появу усадочних раковин.

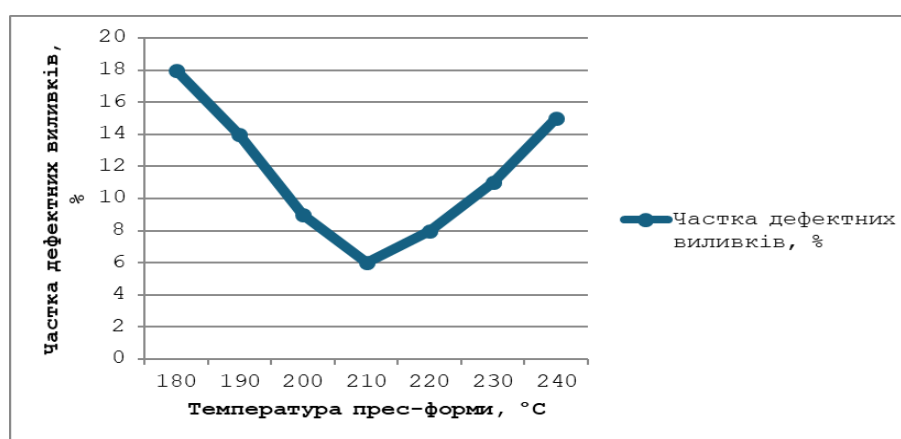


Рисунок 2 – Залежність дефектності лиття від температури прес-форми у фазі тверднення

З рисунка 2 видно, що якщо температура прес-форми перед завершенням кристалізації опускається нижче  $210\text{ }^{\circ}\text{C}$ , у виливках починають масово з’являтися непроливи – розплав просто не встигає повністю заповнити форму. З іншого боку, коли форма перегріта – понад  $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ , зростає частота усадочних раковин. Це відбувається через надто повільне охолодження металу. Найменше браку фіксується при температурі  $220\text{--}235\text{ }^{\circ}\text{C}$ , тобто саме в цьому діапазоні процес іде найбільш стабільно, без дефектів.

Отже, результати експериментів підтвердили ефективність адаптивної системи: вона дозволила не лише зменшити витрати енергії та скоротити тривалість виробничого циклу, а й помітно вплинула на покращення якості відливок. З практичного боку важливо й те, що система працює автономно, без потреби у постійному втручанні оператора, адаптуючись до змін умов у процесі лиття. Це значно спрощує перехід на нові вироби й підвищує стабільність технології.

У ході роботи протестовано комп’ютеризовану систему керування, призначену для лиття алюмінієвих сплавів під тиском. Вона забезпечує постійний збір даних про температуру, тиск, швидкість подачі та умови охолодження. Після впровадження вдалося скоротити тривалість циклу приблизно на  $10\text{--}12\%$ , знизити енерговитрати більш ніж на  $9\%$ , а кількість відливок із дефектами зменшилась удвічі. Цифрове моделювання виявилось корисним не лише для моніторингу, а й для втручання у критичних точках – зокрема при коливаннях температури прес-форми або нестабільній кристалізації. Мінімум браку фіксувався при температурі  $220\text{--}235\text{ }^{\circ}\text{C}$ , що варто враховувати під час налаштування охолодження. У порівнянні з традиційними схемами, запропонована система продемонструвала не лише стабільну якість відливок, а й значно кращу здатність адаптуватися до зміни умов, наприклад, переходу на інший сплав або нову геометрію виробу. Це дає технічну гнучкість та знижує залежність від людського фактора. З огляду на стабільність параметрів і якість лиття, така система придатна до подальшої інтеграції в автоматизоване виробництво без втрати контрольованості процесу.

ЛІТЕРАТУРА

1. A. Anand, D. Nagarajan, M. El Mansori, T. Sivarupan. Integration of additive fabrication with high-pressure die casting for quality structural castings of aluminium alloys; optimising energy consumption. Transactions of the Indian Institute of Metals. 2023. Vol. 76, № 2. P. 347–379. <https://doi.org/10.1007/s12666-022-02750-y>.
2. M. Bhaskar, G. Anand, T. Nalluswamy, P. Suresh. Die life in aluminium high-pressure die casting industries. Journal of The Institution of Engineers (India): Series D. 2022. Vol. 103, № 1. P. 117–123. <https://doi.org/10.1007/s40033-021-00317-7>.
3. В. Дорошенко, О. Янченко. Застосування комп'ютерних систем для проектування та 3D-друку ливарної моделі з вентиляційними каналами в її стінках. Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. 2023. Т. 58, № 3. С. 53–58. <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2023-58-3-53-58>.
4. H. Mizgan, M. Ganea. Optimization of aluminium die-casting process through predictive maintenance and parameter traceability systems. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2022. Vol. 1256, № 1. P. 012028. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1256/1/012028>.
5. D. Lehmhus. Advances in metal casting technology: A review of state of the art, challenges and trends – Part I: changing markets, changing products. Metals. 2022. Vol. 12, № 11. Art. 1959. <https://doi.org/10.3390/met12111959>.
6. A. Chakrabarti, R. P. Sukumar, M. Jarke, M. Rudack, P. Buske, C. Holly. Efficient modeling of digital shadows for production processes: a case study for quality prediction in high pressure die casting processes. 2021 IEEE 8th International Conference on Data Science and Advanced Analytics (DSAA). IEEE. October 2021. P. 1–9. <https://doi.org/10.1109/DSAA53316.2021.9564113>.
7. W. Yi, G. Liu, J. Gao, L. Zhang. Boosting for concept design of casting aluminum alloys driven by combining computational thermodynamics and machine learning techniques. Journal of Materials Informatics. 2021. Vol. 1, № 2. <https://doi.org/10.20517/jmi.2021.10>.
8. Y. Yang, J. Hong, Z. Li, C. Su, X. Wei. Robust parameter optimization of 7075 aluminum alloy milling based on improved hunter-prey optimizer algorithm. International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM). 2025. P. 1–23. <https://doi.org/10.1007/s12008-025-02322-6>.
9. J. Ou, C. Wei, S. Logue, S. Cockcroft, D. Maijer, Y. Zhang та ін. A study of an industrial counter pressure casting process for automotive parts. Journal of Materials Research and Technology. 2021. Vol. 15. P. 7111–7124. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.11.124>.
10. J. Wen, F. Xie, X. Liu, Y. Yue. Evolution and development trend prospect of metal milling equipment. Chinese Journal of Mechanical Engineering. 2023. Vol. 36, № 1. Art. 33. <https://doi.org/10.1186/s10033-023-00865-x>.

Received 11.03.2026.

Accepted 15.04.2026.

Published 30.04.2026

UDC 669.14:004.9

Kyryll Kreytser, Yevhen Kozishkurt

**APPLICATION OF COMPUTER CONTROL SYSTEMS IN THE HIGH-PRESSURE  
DIE CASTING PROCESS OF ALUMINUM ALLOYS ON MODERNIZED  
EQUIPMENT**

*Abstract.* The article addresses the implementation of computer-based control systems in the high-pressure die casting process of aluminum alloys under conditions of

equipment modernization. The necessity of ensuring high stability of technological parameters – melt velocity, compaction pressure, and mold temperature – under dynamic operational conditions is emphasized. The study presents a control architecture based on a two-level system: the upper level features a fanless industrial panel PC for visual supervision, while the lower level employs a programmable logic controller (Simatic S7-1200) for real-time signal processing and control of casting phases. The experiments were conducted on a renewed casting line equipped with adaptive control algorithms that monitor dynamic parameters every 10 milliseconds. The system enables precise coordination of the melt injection phase, cavity filling, and final compaction, minimizing hydraulic shock and improving mold filling uniformity. Data visualization modules capture casting temperature, piston velocity (up to 7 m/s), and pressure fluctuations during solidification, allowing predictive adjustments and optimization of process phases without operator intervention. The research results confirm a reduction in cycle time by 10–12%, energy consumption per 1,000 units by nearly 10%, and the share of defective castings (due to porosity or shrinkage cavities) by more than 50%. It is demonstrated that maintaining mold temperature within the range of 220–235 °C is critical for defect-free casting, and deviation from this range increases the occurrence of misruns and shrinkage defects. The proposed control system adapts in real time to alloy transitions and changes in mold geometry, supporting more robust, energy-efficient, and quality-stable casting operations. The integration of computer control technologies into die casting contributes to the advancement of digital manufacturing and supports the broader goal of increasing productivity and product reliability in the foundry industry.

**Keywords:** high-pressure die casting, aluminum alloys, computer-based control, adaptive system, defects, modernization, productivity.

#### REFERENCES

1. Anand, A., Nagarajan, D., El Mansori, M., & Sivarupan, T. (2023). Integration of additive fabrication with high-pressure die casting for quality structural castings of aluminium alloys; optimising energy consumption. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 76(2), 347–379. <https://doi.org/10.1007/s12666-022-02750-y>.
2. Bhaskar, M., Anand, G., Nalluswamy, T., & Suresh, P. (2022). Die life in aluminium high-pressure die casting industries. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*, 103(1), 117–123. <https://doi.org/10.1007/s40033-021-00317-7>.
3. Doroshenko, V., & Yanchenko, O. (2023). Zastosuvannia kompiuternykh system dlia proektuvannia ta 3D-druku lyvarnoi modeli z ventyliatsiinymy kanalamy v yii stinkakh [Application of computer systems for designing and 3D printing of a casting model with ventilation channels in its walls]. *Informatsiini tekhnolohii ta kompiuterna inzheneriia*, 58(3), 53–58. <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2023-58-3-53-58> [in Ukrainian].

4. Mizgan, H., & Ganea, M. (2022). Optimization of aluminium die-casting process through predictive maintenance and parameter traceability systems. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1256(1), 012028. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1256/1/012028>.
5. Lehmus, D. (2022). Advances in metal casting technology: A review of state of the art, challenges and trends – Part I: changing markets, changing products. *Metals*, 12(11), 1959. <https://doi.org/10.3390/met12111959>.
6. Chakrabarti, A., Sukumar, R.P., Jarke, M., Rudack, M., Buske, P., & Holly, C. (2021, October). Efficient modeling of digital shadows for production processes: a case study for quality prediction in high pressure die casting processes. 2021 IEEE 8th International Conference on Data Science and Advanced Analytics (DSAA), 1–9. <https://doi.org/10.1109/DSAA53316.2021.9564113>.
7. Yi, W., Liu, G., Gao, J., & Zhang, L. (2021). Boosting for concept design of casting aluminum alloys driven by combining computational thermodynamics and machine learning techniques. *Journal of Materials Informatics*, 1(2). <https://doi.org/10.20517/jmi.2021.10>.
8. Yang, Y., Hong, J., Li, Z., Su, C., & Wei, X. (2025). Robust parameter optimization of 7075 aluminum alloy milling based on improved hunter-prey optimizer algorithm. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 1–23. <https://doi.org/10.1007/s12008-025-02322-6>.
9. Ou, J., Wei, C., Logue, S., Cockcroft, S., Maijer, D., Zhang, Y., et al. (2021). A study of an industrial counter pressure casting process for automotive parts. *Journal of Materials Research and Technology*, 15, 7111–7124. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.11.124>.
10. Wen, J., Xie, F., Liu, X., & Yue, Y. (2023). Evolution and development trend prospect of metal milling equipment. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 36(1), 33. <https://doi.org/10.1186/s10033-023-00865-x>.

**Крейцер Кирилл Александрович**, кандидат технічних наук, старший викладач Навчально-наукового інституту морського флоту Одеського національного морського університету, E-mail: [dakerkir@gmail.com](mailto:dakerkir@gmail.com), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0549-1481>

**Козішкурт Євген Миколайович**, доктор філософії, старший викладач Навчально-наукового інституту морського флоту Одеського національного морського університету, E-mail: [koziskurtevgen@gmail.com](mailto:koziskurtevgen@gmail.com), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7311-7395>

**Kyryll Kreitser**, Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer, Educational and Research Institute of the Maritime Fleet, Odesa National Maritime University, E-mail: [dakerkir@gmail.com](mailto:dakerkir@gmail.com), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0549-1481>

**Yevhen Kozishkurt**, PhD, Senior Lecturer, Educational and Research Institute of the Maritime Fleet, Odesa National Maritime University, E-mail: [koziskurtevgen@gmail.com](mailto:koziskurtevgen@gmail.com), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7311-7395>